

化合物半导体



• CHINA

季刊 2017年 第3期

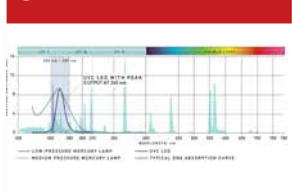
原子层沉积



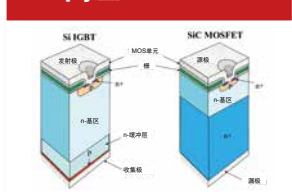
氧化镓器件



UV LED



SiC高压MOSFET



溅射优异的GaN



新型固态 光电倍增管



AIXTRON

Our technology. Your future.

您认为,

全球大趋势需要 性能最佳的三五族化合物材料.

我们也这样认为.

AIX 2800G4-TM

三维传感
增强现实
自动驾驶
云计算
物联网/5G
下一代显示设备



发现AIX 2800G4-TM.

实现砷磷基材料下一
代应用的创纪录设备.



使用市场顶尖的技术
实现行业内最佳良率
和最高生产力.



您的技术信息平台

一系列产品—包括
国际专业技术杂志的中文版、网上
出版物、会议、培训和活动

欢迎免费索阅或参与活动

www.actintl.com.hk



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、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约十多万专业读者。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。

香港
852-28386298

深圳
86-755-25988571

上海
86-21-62511200

北京
86-10-67484833

武汉
86-27-59221554



封面故事 Cover Story

- 12 新型固态光电倍增管
Building better low-light detectors
- 汪莱, 郑纪元, 郝智彪, 罗毅; 清华大学电子工程系

业界动态 Industry

- 5 原子层沉积技术的迷人属性
The attractive attributes of atomic layer deposition
- 8 氧化镓: 碳化硅和氮化镓的接棒者
Gallium oxide: ready to take on GaN and SiC
- 10 实现金刚石 GaN 的商品化
Commercialising diamond GaN

技术 Technology

- 20 评估UV LED的能力
Evaluating the capability of UV LEDs
- Leo Schowalter, Crystal IS
- 23 对SiC高压MOSFET的关键看法
A critical look at the SiC, high-voltage MOSFET
- Munaf Rahimo, 瑞士ABB半导体有限公司

科技前沿 Research Review

- 28 不对称结构加速InP基HEMT
Asymmetry accelerates InP-based HEMT
- 29 提升日盲探测器的增益
Increasing the gain of solar-blind detectors
- 30 溅射优异的GaN
Sputtering superior GaN
- 4 编者话 Editor's note
- 32 广告索引 Advertisement Index

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.

关于雅时国际资讯 (ACT International)

雅时国际资讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品 - 包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动 - 为跨国公司与中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站, 以及各种技术会议, 服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约十多万专业读者。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 100,000 professional readers in fields of electronic manufacturing, vision system design, laser/photonics, RF/microwave, cleanroom and contamination control, compound semiconductor, 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



扫一扫
免费下载电子书

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)



www.iqep.com

5G 发展驱动，化合物半导体未来五年 年均增长将超过 11%

据 Knowledge Sourcing Intelligence 公司市场研究报告预测：受 5G 通信发展的驱动，化合物半导体市场 2017 年将达到 404.52 亿美元，未来几年将保持增长，到 2022 年将达到 689.15 亿美元，年均增长率为 11.24%。



该报告显示：2016 年，消费电子占据主要市场份额，由 GaAs 基太阳能电池驱动的智能手机的引入是增长的重要驱动力，加上市场上智能手机和其他智能设备的数量也有一定增加。此外，不断增长的 LED 应用进一步推动了消费电子市场的增长。

随着人们对电力应用的需求不断增长，加上无线基础设施的发展，在未来一段时间内，预计将推动化合物半导体市场的持续增长。报告预计北美将以温和的速度增长，主要需求来自美国。而在亚太地区，由于工业化和城市化进程的迅速发展，预计将以较高的速度增长，尤其是在印度、中国和韩国等新兴经济体。

5G 通信不仅需要超带宽，更需要高速接入，低接入时延，低功耗和高可靠性以支持海量设备的互联。氮化镓技术正助力 5G 移动通信在全球加速奔跑，5G 移动通信将从人与人通信拓展到万物互联，预计 2025 年全球将产生 1000 亿的连接。

“到 2030 年，第三代半导体产业力争全产业链进入世界先进行业，部分核心关键技术国际引领，核心环节有 1 至 3 家世界龙头企业，国产化率超过 70%。”这是第三代半导体产业技术创新战略联盟理事长吴玲女士所描述的我国半导体产业未来的发展前景。

半导体产业发展至今经历了三个阶段，第一代半导体材料以硅 (Si) 为代表，第二代半导体材料以砷化镓 (GaAs) 为代表，第三代半导体材料以氮化镓 (GaN)、碳化硅 (SiC)、氧化锌 (ZnO) 等宽禁带材料为代表。与前两代产品相比较，第三代半导体具有显著的性能优势。包括具有高击穿电场、高饱和电子速度、高热导率、高电子密度、高迁移率等特点，因此也被业内誉为固态光源、电力电子、微波射频器件的“核芯”，以及光电子和微电子等产业的“新发动机”。

由于第三代半导体具有很好的应用前景，未来市场潜力巨大，已被纳入我国战略发展的重要产业。例如，从 2004 年开始，我国政府就第三代半导体材料研究与开发进行了相应的部署，并启动了一系列的重大研究项目。2013 年，科技部在 863 计划新材料技术领域项目征集指南中也特别指出要将第三代半导体材料及应用列入重要内容。

据专家介绍，与第一代、第二代半导体材料及集成电路产业上的多年落后、很难追赶国际先进水平的形势不同，我国在第三代半导体领域的研究工作一直紧跟世界前沿，工程技术水平和国际先进水平差距不大。因此，应该积极把握机遇，努力发展，实现超越。

赵雪芹

社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak

adonism@actintl.com.hk

主编 Editor in Chief

赵雪芹 Sunnie Zhao

sunniez@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

雅时国际通讯 ACT International

香港九龙 B,13/F, Por Yen Bldg,

长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,

百欣大厦 Cheung Sha Wan,

13楼B室 Kowloon, Hong Kong

Tel: (852) 2838 6298

Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200

Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 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



原子层沉积技术的迷人属性

无氨的原子层沉积方法可以制作具有高度平滑和均匀的 GaN 层。

RICHARD STEVENSON

使用 MOCVD 技术来生长 GaN 膜层是大多数商业器件生产的核心工艺。采用这种生长技术所制造的 LED 可作为显示屏的背光源，为家庭、办公室及公共场来提供照明；它还可用于生产蓝绿激光器，用于光盘的数据读取和图像的投影；它还可用于生产射频及功率电子设备中的高电子迁移率晶体管 (HEMT)，在雷达、无线通信及电力供应等方面获得应用。

MOCVD 技术获得了广泛、巨大的成功，采用 MOCVD 生长 GaN 显然有着它的优点。然而，这种工艺也存在不尽如人意之处，这体现在 GaN 膜的生长是通过一种镓基前驱体与氨在高温下的相互作用而得以形成的。

MOCVD 的另外一些缺点是与所使用的硬件相关。为生长 GaN 而设计的 MOCVD 反应器设备必须能够承受超过 1000℃ 的高温，这使得它们的制造及运营成本十分昂贵。晶圆的尺寸也是一大挑战，为了适应更大尺寸的晶圆，在进行反应器的制造时显然需要更大的投资。

MOCVD 另一个主要的弊病是在于使用氨作为氮源。这种具有腐蚀性的、极度有害的气体必须要万般小心地去处理，在生产线的下游还需要部署废气处理系统，以去除所有生长工艺中没被用完的氨气残余。

采用 MOCVD 技术生长的 GaN 薄膜在其本身属性上也存在有缺点。由于其在化合物的化学计量比上不够完美，使得薄膜在原子尺度上并不平整，并且在膜层中还会充斥着氢原子。后一个缺点将导致膜层材料刻蚀速率的变化，从而会降低器件的性能。例如，如果氢原子扩散到了 GaN 晶

体管的栅极，它就会使器件的阈值电压产生漂移。

现在，位于美国德克萨斯州 Austin 的 Nano-Master 公司开创了一种全新的、无氨的原子层沉积 (ALD) 工艺来生长 GaN 薄膜，它能够消除所有上述这些与 GaN 薄膜生长相关的缺点。

该公司销售的 NLD-4000 ALD 设备售价约为 25 万美元，相对应的 MOCVD 反应器售价超过



Nanomaster NLD-4000使用的反应前驱体装置被安置在专用的机柜中。



由于衬底与泵室间的间隙非常小，平面电感等离子体耦合系统能大大缩短抽真空的时间。

100 万美元，而且该设备能覆盖 2 英寸到 450mm 直径衬底的薄膜沉积。

传统的 ALD 方法中包含着先后馈入两种不同前驱体的重复循环过程，每个循环只生长一个原子层的薄膜。相比之下，Nano-Master 所开创的工艺与其有着一个关键的差别：在这个工艺中，处于等离子态的氮源是被持续提供的，这可使得整个工艺循环的次数可以减半。

设备的发展过程

这项由 Nano-Master 制造的无氨 ALD 设备的起源要追溯到公司董事长兼 CEO Birol Kuyel 身上。在上世纪 80 年代，当他在 AT&T 工作时，他就致力于研究用等离子体增强 CVD 技术来生长 SiN 膜层。

“那时我发现，当你采用氨反应工艺时，你无法同时兼顾沉积膜层的均匀性和化学计量比”，Kuyel 说道。但当他转向预激活的氮工艺时，他发现它能够独立地控制 SiN 膜层的化学计量比及其物理特性。“我们获得了成功，我们制备出的薄膜含氢量很低，我们以此还申请到了专利”，Kuyel 解释道。

随后的发展里程碑则产生在约 10 年以前，当时 Arkansas 大学的一个教授找到了 Kuyel 并与他开展合作，现在 Kuyel 已经成为了 Nano-Master 的 CEO。当时那个教授希望拥有一台能够生长 GaN 的传统 MOCVD 设备，但他没有足够的预算。所以 Kuyel 建议他购置一台等离子增强 MOCVD

设备——不用氨，而是用氮。这项改变使得生长温度降低到了大约 600℃，而且硬件的成本更低、更为简单，同时还可省略了氨气减排处理装置。

等离子体增强 MOCVD 被证明是一个巨大的成功，“他说他们获得了世界上最好的氮化镓膜层”，Kuyel 说道。这些学者们对于这样的结果实在是太满意了，以至于他们不愿意与 Nano-Master 分享他们成功的具体细节。然而，Kuyel 知道，这个生长技术包括有等离子体激活的 N₂，并且所生长 GaN 薄膜的含氢量水平非常之低。

这样的成功使 Kuyel 和他的同事们想知道，如果把氮等离子体工艺运用到 ALD 上那情况又将会怎样。但他们手头没有足够的资金来支持他们在这个想法上的追求，直到去年初，他们因这种新颖的生长设备而赢得了一份订单，才使他们的这一追求得以实现。多亏了之前制造其他生长系统所积累下的知识，他们第一次尝试就大功告成，在 2015 年底，这种新颖的 ALD 反应器就被推向了市场。

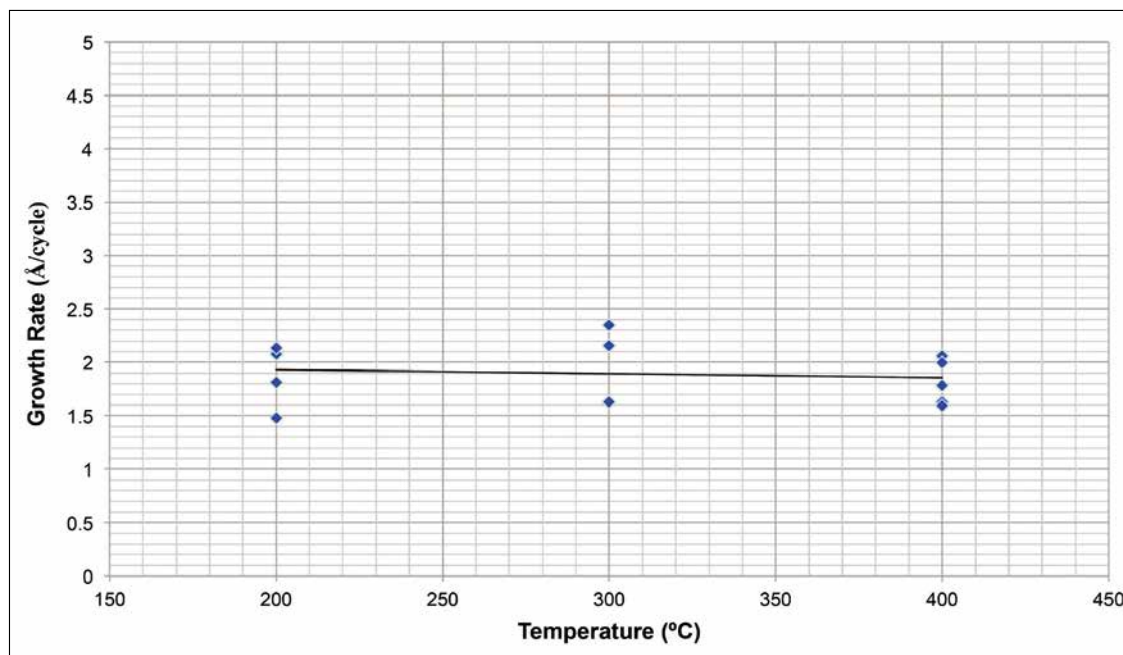
为了避免等离子体对 GaN 薄膜产生损伤，该设备特意将等离子体腔室与 ALD 腔室分离。氮等离子体在 ALD 腔室的上方形成，并通过喷淋头引入到 ALD 腔室，这个喷淋头能够“杀死”等离子体注入的激活氮。“进行氮的化学反应，你不需要氮离子——你需要的就是天然的氮，但它们需要处于激活状态”，Kuyel 说道。

这项技术采用了脉冲式馈入镓前驱体，该脉冲持续 20ms 到 60ms 之间，生长温度则在 200℃ 至 400℃ 之间。这使得这个设备所生长的薄膜厚度与温度、脉冲宽度以及循环时间都没有关系。“我们现在的成果是，我们现在生长的（原子）层数将只受到工艺循环次数的控制”，Kuyel 说道。

Nano-Master ALD 设备的另一大优势在于



为了防止氧化，晶圆在生长后被放置于闭锁的预真空室中，进行氮气冲洗和冷却。



膜层生长速率只受到工艺循环次数的影响，与温度的关联很小。

它非常快速的抽真空时间来满足典型生长所需 0.2~0.3Torr 的真空要求，这是源于采用了平面电感等离子体耦合系统，而没有使用基于柱体或线圈结构的系统。通过调整系统的结构，使得衬底和泵室间的间隙很小，只有几个厘米。

难以置信的膜层平坦性

这项设备的能力获得了令人称道的结果。例如，在 6 英寸衬底上生长的薄膜在厚度上的差异在 1 Å 以下。“所有的（测试）点都含有相同数量的原子”，Kuyel 强调道，“MOCVD 生长膜层厚度将取决于气流分布模式、反应物的浓度等因素。但这个 ALD 技术没有。”

当在硅上生长 GaN 薄膜时，它会与衬底形成一个非常强的键合，“我们甚至不需要对硅片表面进行任何特殊的预处理步骤”，Kuyel 评论道。

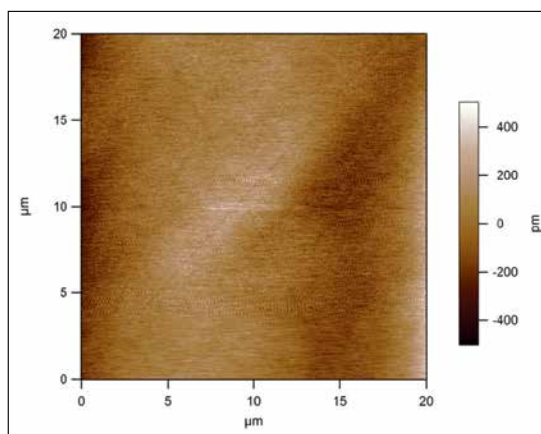
Nano-Master 的 ALD GaN 生长设备的主要缺点是它缓慢的生长速度，尽管它已经快于许多其他的 ALD 工艺，这是由于只需要对镓源进行脉冲注入，其生长速率最高可保持在每秒几埃。但这一速率实际上已使该技术无法用于芯片生产的单晶圆工艺腔室中来生长较厚的膜层。

鉴于这项技术的应用还处于起步阶段，我们还不清楚哪儿将是它的最好应用所在。Kuyel 说道，一种选择是在一个高真空环境中建造一个 ALD 腔室和 MOCVD 腔室相结合的混合型系统，并在该两个腔室间配置相应的晶圆传输设施。他相信这种方法能被用于制造蓝色激光器件，它将

能够从 ALD 的高质量膜层生长中受益。

Nano-Master ALD 系统的另一可能应用是用来制造反射镜。它使用一种三氯化镓源，可以生长表面粗糙度在皮米量级的膜层。“这将比你在光学元件中的镜面材料性能还要优秀”，Kuyel 解释道，“这就是为什么我的采用多层介电材料来制造反射镜的设想是可能实现的”。

未来的计划将包括提升人们对该种设备的关注，并促进它的市场销售。Kuyel 想着要去制造双腔室系统，这既可以是由一对 ALD 腔室组成，也可以是一个结合 ALD 腔室和 MOCVD 多腔室的组合式设备，或者是一个多晶圆的批量处理设备。未来还有可能采用这些设备去沉积氧化物，例如二氧化铪膜层，这将可能会为下一代逻辑器件的发展提供帮助。无论如何，显而易见的是这种新颖的 ALD 设备将有着光明的发展前景。



采用无氨ALD系统沉积的GaN薄膜具有极高的平坦性。

氧化镓： 碳化硅和氮化镓的接棒者

据报道，在大量投资基金的支持下，Flosfia 正准备推出性能优异、价格适中的氧化镓器件产品。

2017年3月初，据日本京都大学的创业型公司 Flosfia 透露，它们已经赢得了不可思议的7.5 亿日元（540 万英镑）的融资，该资金将用于刚玉型晶体结构的氧化镓肖特基势垒二极管和 MOSFET 器件的商业化生产。

充足的资金来自于各个新、老投资者，包括 Yaskawa Electric, Future Venture Capital, Energy & Environment Investment 等机构。Flosfia 将开发自己的生产线，以期在 2018 年开始商业化生产。

Flosfia 的市场部副总裁 Takuto Igawa 表示：“我们在此轮融资中拥有了现有的、全新的和战略性的投资者，这标志着我们公司技术的先进性，预示着我们正不断向前发展”，“Yaskawa 是全球最大的全球化工业企业之一，它是以投资者和器件用户的双重身份加入到我们的业务中”。

Flosfia 成立于 2011 年 3 月，由京都大学研究人员 Toshimi Hitora, Shizuo Fujita 和 Kentaro Kaneko

共同创立，旨在对名为“Mist Epitaxy”方法的一项化学气相沉积工艺实现商业化。不同于世界其他地区对 GaN 或 SiC 外延生长的方法研究，Flosfia 的研究人员开发了一种新型的制备方法，它是将氧化镓层沉积于蓝宝石衬底上来制备功率器件。

氧化镓 (Ga_2O_3) 具有五个不同的相态，其中， α 相具有与 Al_2O_3 或蓝宝石相同的刚玉型晶体结构，这为研究者在蓝宝石衬底上实现无应力 Ga_2O_3 层的沉积的提供了研发思路。

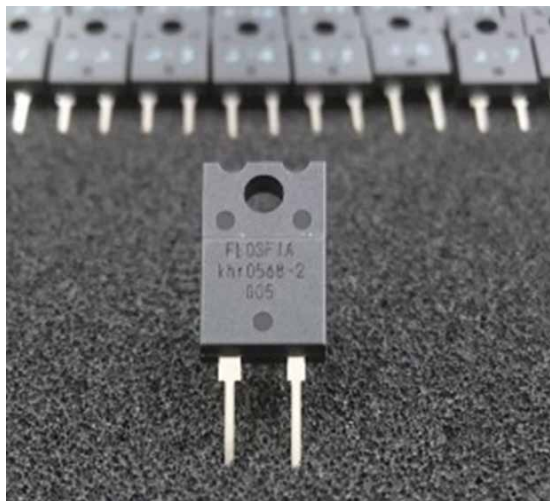
事实上，早在 2008 年，Flosfia 联合创始人和技术先驱，Shizuo Fujita 教授就已经成功地将 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜沉积在蓝宝石衬底上。而如今，Flosfia 通过不断地优化薄膜生长的过程，已实现了在 4 英寸蓝宝石衬底上制作无位错的氧化镓外延层，这一新型工艺的研发成功是实现氧化镓能实现与业界传统硅的成本相媲美的关键性一步。

Fujita 及其在 Flosfia 的同事们还开发了一种“剥离 (lift-off)”工艺专利，它可将 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 层从蓝宝石衬底转移到高导热性的金属支撑层之上，减轻了存在于 SiC 和 GaN 功率器件上的热学控制问题。

据研究人员称，用该工艺进行晶圆加工不仅产额高并且容易处理。Flosfia 对外董事 Naonori Kurokawa 还强调：“使用蓝宝石衬底比使用碳化硅衬底要便宜得多。”

他补充道：“尽管我们还不能透露剥离工艺的细节，但我们可以说，该工艺不会在制造阶段遇到瓶颈性问题，因此，我们已准备将其实现商业化的供货”。

从器件的角度来看， Ga_2O_3 的 Baliga 品质因子要比 SiC 高出二十倍。对于各种应用来说，陶瓷



Flosfia公司的氧化镓器件将会首先应用于功率因数校正。

氧化物的带隙约为 5eV，远远高于 SiC 和 GaN 的带隙，后两者都不到 3.5eV。

因此，这种陶瓷氧化物器件可以承受比 SiC 或 GaN 器件更高的工作电压，导通电阻也更低，正如 Flosfia 在 2015 年所首发的肖特基势垒二极管 (SBD) 那样，521V 耐压器件的导通电阻为 $0.1\text{m}\Omega\text{cm}^2$ ，低于目前任何市售 SiC 二极管的导通电阻数值。

值得注意的是，该公司在同一时间还发布了 855V 耐压的肖特基势垒二极管，其导通电阻为 $0.4\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 。

“尽管我们的企业创立还只有六年，但是我公司二极管的导通电阻已经打破了世界纪录”，Kurokawa 表示，“我们的 600V、5A 器件也即将上市，在最近几年中我们将有更大的发展”。

面向商业化

目前，Flosfia 正与其工业伙伴，日本的机器人制造商——Yaskawa Electric 展开合作，来生产 SBD 器件样



Flosfia 首席执行官 Toshimi Hitora 表示：已做好将氧化镓肖特基势垒二极管和 MOSFET 推向市场的准备。

品，并采用行业标准 TO-220 封装，该产品预计于 2018 年发布。

Igawa 说：“根据器件样品测试结果，我们将尽快确定最终的产品规格”，“我们 600V、5A 的器件也即将面世。”

Flosfia 的另一个目标是，在 2019 年生产 MOSFET 器件样品，并在 2020

年实现该 MOSFET 的商业化生产。“我们将瞄准世界各地的市场，我们的第一个产品将是 600V、5A 的二极管，该产品将用于功率因数校正上”，Igawa 表示道。

随着器件开发和性能提升，Flosfia 仍然需要解决一个关键性的要素问题：成本。Flosfia 的研发初衷就是能提供与硅晶圆成本相当的器件。而 Flosfia 总裁 Toshimi Hitora 表示，这一设想正在趋于实现。

“我们仍然处于研发阶段，所以我们无法确认器件的最终成本。然而，2018 年我们将量产肖特基势垒二极管，届时氧化镓器件将能与 GaN 和 SiC 器件达到成本平价”，他说：“到 2019 年，我们将能做到与硅晶圆的成本平价。”

“Mist Epitaxy 是一种安全、低成本和节能的技术，它可用于氧化物半导体材料的生长，以降低功率器件的成本和拓展它的使用范围”，Toshimi Hitora 补充道。



EVATEC

立足科技前沿， 引领薄膜量产技术

Visit us at SEMICON Taiwan, Sept 13-15, Booth 692



Our thin film production solutions reduce your process development times, enhance yields or increase tool throughput.

Chose Evatec for our know-how in the precision AlScN films required for BAW filters in **5G mobile networks**, cost-effective AlN deposition on Si for **GaN Power Devices**, high throughput RDL/UBM processes in **FOWLP**, precise bandpass filter technology for **3D Sensing & Gesture Recognition** in next generation smart consumer devices and driving down your costs in **HB-LED** production.

To find out more about Evatec processes and platforms visit www.evatecnet.com or contact your local office.



DKSH (China) Co., Ltd • Tel: +86 21 5383 8811 • E-mail: cn.spe@dksh.com

ADVANCED PACKAGING • PHOTONICS • MEMS • OPTOELECTRONICS • POWER DEVICES • WIRELESS • THE THIN FILM POWERHOUSE
www.evatecnet.com

实现金刚石 GaN 的商品化

英国的一个耗资数百万英镑的项目能够充分释放金刚石基 GaN 的潜力吗？——Rebecca Pool 问。

由于半导体行业对于速度和能量效率的要求有增无减，因此，对于强势氮化镓 (GaN) 晶体管的全球需求量不断地攀升。

鉴于 GaN 具有高的电子迁移率和功率密度，因而成为了雷达、卫星和电子战等 RF 电子应用的首选半导体材料。

但是，功率的获得是要付出代价的，在该场合中那就是热量。虽然基于 GaN 的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在超过 300 GHz 的频率条件下达到了最高 40 W/mm 的惊人 RF 功率电平，可是自发热意味着此类器件只能可靠地工作至 10 W/mm 的功率密度。不过，英国的一个耗资数百万英镑的研究项目似乎即将充分实现 GaN 功率密度的性能潜力，研究人员采取的方法是把衬底从碳化硅 (SiC) 替换为金刚石，并且整合新颖的冷却方案以把功率性能提升 5 倍之多。

今年年初该项目「集成化 GaN- 金刚石微波电子器件：从材料、晶体管到 MMIC」启动，将开发金刚石基 GaN HEMT 和单片微波集成电路 (MMIC)，以求消除对当前 GaN 电子器件的性能造成限制的热管理问题。

金刚石具备极高的热传导性，而且由于该特性的缘故，金刚石衬底拥有使晶体管中的散热效率最高提升 5 倍（相比于 SiC 衬底）的潜力。来自布里斯托尔大学的该项目负责人、物理学家 Martin Kuball 多年来一直在开发金刚石基 GaN 器件，并且相信现在是时候进一步推动这项技术向前发展了。

他说：“许多产业合作伙伴希望获得较高功率的微波电子器件，但是主要受限于电子器件的排热。”

“为此，我们已经参与了很多旨在开发金刚石基 GaN 的项目，而且现在我相信这为英国完成一个全集成化项目提供巨大的机遇。”

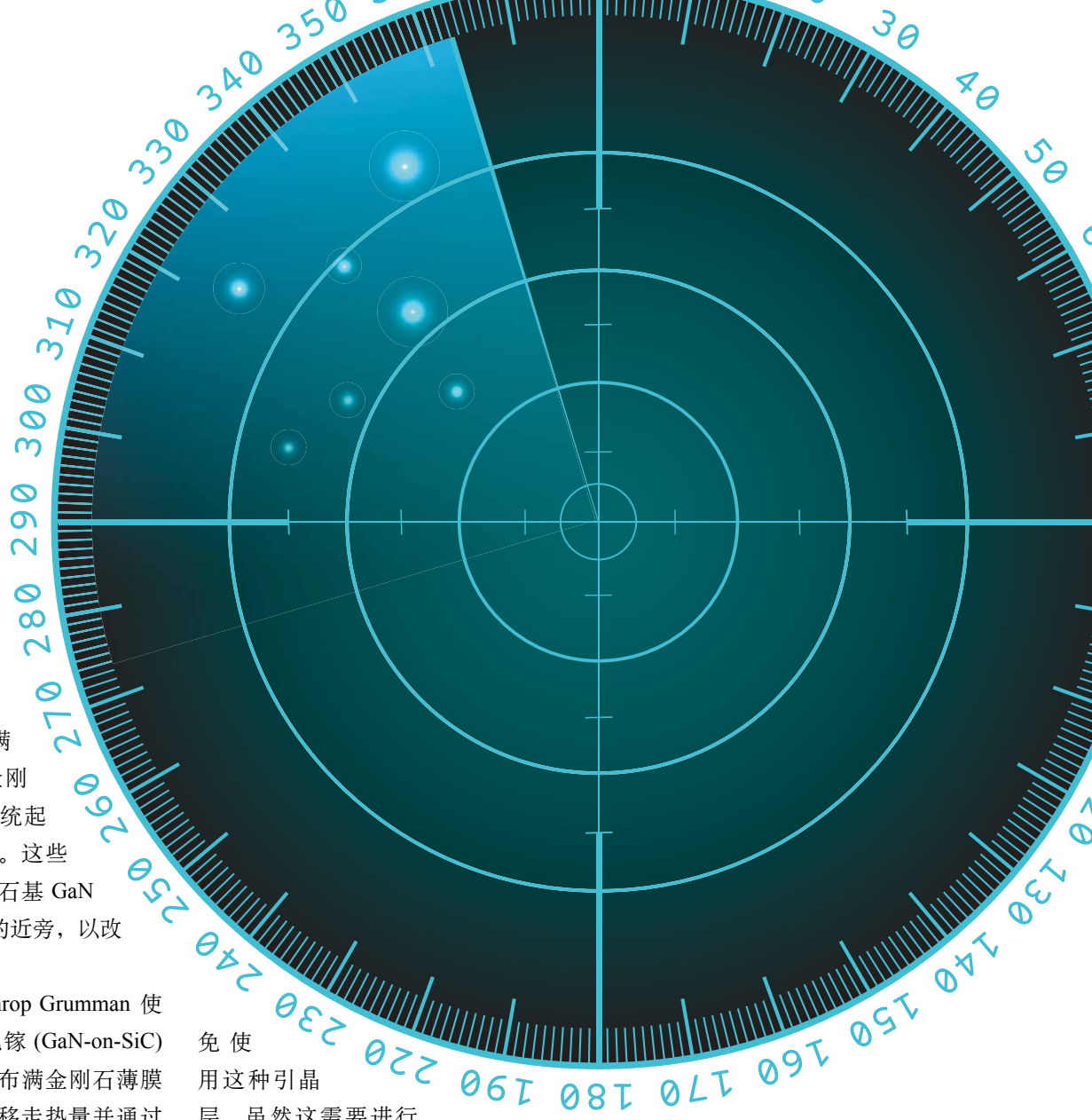
的确，这个由英国工程与物理科学研究委员会 (EPSRC) 资助的项目已经吸引了众多的业界厂商，包括 MACOM、Plessey Semiconductors、IQE、Element Six、罗技 (Logitech) 和英国国家微电子研究所。布里斯托尔大学、卡迪夫大学、剑桥大学、伯明翰大学和格拉斯哥大学也都参与其中。而且，Kuball 还强调指出该项目赢得了航空航天界越来越高的关注度，进而把欧洲航天局以及空中客车防务与航天公司揽入阵中。

至关重要的是，许多欧洲的业界厂商都担心：对《美国军需物品清单》上所列的国防相关产品和服务的贸易进行管制的《美国国际武器贸易条例》(ITAR) 将限制最先进 GaN 微波技术的市场准入。

Kuball 说：“我设想，金刚石基 GaN MMIC 将陷入 ITER 的不利对待之中，因此要让这项技术进入欧洲将涉及大量的文书工作，而且是非常痛苦的过程。虽然需要解决的难题有很多，但是，通过控制从外延生长到最终应用的完整供应链，我们就能更容易地引入新的器件设计理念。”

冷却芯片

新型器件设计的一个关键部分是给金刚石基 GaN 芯片纳入新颖的冷却系统。在作为美国国防高级研究局计划一部分的「芯片内部 / 芯片间增强型冷却 (ICECool)」研究项目中，雷神、Northrop Grumman 和 BAE Systems 等业界巨头已经设计了针对此类器件的不同微电子冷却机构设置。



举个例子说，雷神公司开发了一种充满冷却剂的大宽高比金刚石微通道系统，该系统起一个热交换器的作用。这些微通道被安置在金刚石基 GaN MMIC 内部已知热点的近旁，以改善热性能。

与此同时，Northrop Grumman 使蚀刻到碳化硅基氮化镓 (GaN-on-SiC) 芯片基底中的微通道布满金刚石薄膜涂层。这些通道快速移走热量并通过在一块比较大的面积上对其进行散播而降低了热通量。据 Kuball 称，英国这个最新的研究项目将尝试使用新的方法。研究人员将不会透露具体细节，但着重说明了项目团队将如何优化接近有源 GaN 器件区域的金金刚石的热传导能力。

例如，在当今的金刚石基 GaN 器件中，在 GaN 表面需要沉积一个薄电介质层来实现金刚石在 GaN 表面的引晶和淀积。令人遗憾的是，这种“GaN-电介质层-金刚石”交界面的导热性很差。

因此，考虑到这一点，Kuball 和同事们首先希望通过去除该引晶层以及优化附近的金刚石晶粒结构来减小热阻。Kuball 说：“我们的团队中有一些非常擅长金刚石生长的组员，包括来自卡迪夫大学和布里斯托尔大学的研究人员，而且我们相信我们能够避

免使用这种引晶层。虽然这需要进行测试，但是我们坚信自己可以做到。”

与美国过去进行的研究类似，该项目小组也打算探究微流体的使用，不过此次将把新颖的相变材料引入到通道中，以进一步改善散热。Kuball 把它描述为一种‘比传统微流体有力得多的方法’。

他说：“假如采用了某种相变材料，那么为了相变的发生需要额外的能量，从而改善了微通道中液体的热传输能力。”

据 Kuball 透露，他的团队拥有多种把微流体通道引入到外延层的方法，并且补充说：“关于如何构建不同于已有制作方案的微流体通道的壁面，我们有一些其他的想法。”

那么现在该做什么呢？在这个为期 5 年的项目的最初 2 年里，Kuball 希望完成的工作包括：优化外延生长、

开发新颖的微流体、对新的设计构思进行试验和制作可工作的器件。他补充道：“我们希望在第二年内能够提供少量的早期试用器件。”

而到 2021 年该项目结束时，他预期可成功打造一款全面优化的器件，并且还希望已与产业合作伙伴成立了一家衍生子公司 (spin-out company)。

他说：“我们需要面对许多挑战，从引晶层到微流体的集成均在其列。而且，调节应力和晶圆片翘曲度将不会是微不足道的小事。”

他补充道：“不过据我看来有一点是很明显的，那就是对于即将运作这个项目我感到非常兴奋。我们拥有这么好的一支由产业支持者组成的研究团队，而在开发新的技术时，这是极为关键的。”

新型固态光电倍增管

通过 GaN/AlN 周期堆栈结构创造具有高灵敏度和优异可控性的雪崩光电二极管。

汪莱, 郑纪元, 郝智彪, 罗毅
清华大学电子工程系 北京 100084

赫兹于 19 世纪末期发现了光电效应，爱因斯坦引入光子理论来解释光电效应，为光电子学的迅猛发展奠定了基础。基于光电效应的光电倍增管 (PMT) 是目前最为成熟的微弱信号探测器，起源于二十世纪三十年代。PMT 是一种真空器件，具有玻璃或石英外壳。入射光子透过外壳激励光电阴极产生阴极电子发射，随后在高电场驱动下加速，与打拿极 (Dynodes) 发生碰撞激发出新的电子，经过多级碰撞实现电子数量的显著倍增。在打拿极链的末端设置一个阳极，用来收集倍增电子。制作光电倍增管要保证高真空，防止电子加速过程将残余气体离化，产生的阳离子向相反方向加速并碰撞离化，从而形成离化的正反馈环，使器件击穿。

光电倍增管的优点在于它可以稳定地工作在恒定偏置电压下并获得高增益、低噪声和高的响应速度。缺点是体积大、笨重、外壳易碎、不易集成、量子效率低。从光电子学的发展趋势来看，固态器件取代真空器件是大势所趋。比如使用晶体管和集成电路代替电子管。使用发光二极管 (LED) 来替代白炽灯和荧光灯。然而目前在微弱信号探测领域，真空器件 PMT 还处于主导地位。

主流的半导体微弱光信号探测器是雪崩光电二极管 (APD)。半导体材料中的雪崩现象指的是在高电场驱动下载流子离化碰撞发生数目倍增的效应，微弱光信号入射后产生的微量光生电荷在经历雪崩后数目得到放大，产生的倍增电荷被电极收集产生显著的响应，因此具有高灵敏性。雪崩最核心的物理过程是离化碰撞。在高电场驱动下具有高能量的电子或者空穴将半导体材料中价带电子激发到导带形成电子空穴对的过程就是离



化碰撞。在每一次离化碰撞中，如果是电子主导的离化碰撞，载流子由初始高能电子变成两个低能电子和一个空穴，如果是空穴主导的离化碰撞，载流子由初始高能空穴变成两个低能空穴和一个电子。可见，载流子的数目由初始的 1 个变成 3 个，得到放大。

由于电子空穴在电场驱动下沿着相反的方向运动，如果整个倍增过程中只有一种载流子可以发生离化碰撞，那么雪崩过程单向发生，此时的离化碰撞叫做单极离化。如果两种载流子都可以发生离化碰撞，雪崩过程向两个方向交叠发生，



此时的离化碰撞叫做双极离化。

APD 在反偏电压从小变大的过程中经历非离化区，单极离化区和双极离化区。在单极离化区，器件可以工作在恒定偏压下，增益稳定，这种工作模式叫做线性工作模式。线性 APD 不会产生击穿现象，在恒定伺服电路工作中。然而传统 APD 在线性模式下的增益比较低，需要将偏置电压置于击穿电压之上来触发双极离化，由于雪崩过程向两个方向交叠发生形成正反馈环，增益非常大，但同时器件无法稳定地工作在击穿电压之上，需要周期性地将器件电压降低到击穿点之下来淬灭

雪崩。这种工作模式叫做盖革模式。目前主流的单光子 APD 都选择工作于盖革模式之下。盖革模式需要复杂的周期性淬灭伺服电路，而且器件只有在周期性偏压到达高电位的时候才能有效探测光子，因此应用比较受限，主要应用于可预报单光子源的探测等应用场合。

可以看到，决定 APD 是否能够工作于线性模式关键是电子和空穴的离化能力的差异性。在 APD 中，载流子的离化能力主要由离化系数这一指标表示。离化系数是同一个载流子沿电场方向发生两次离化碰撞所需要的平均距离的倒数。比

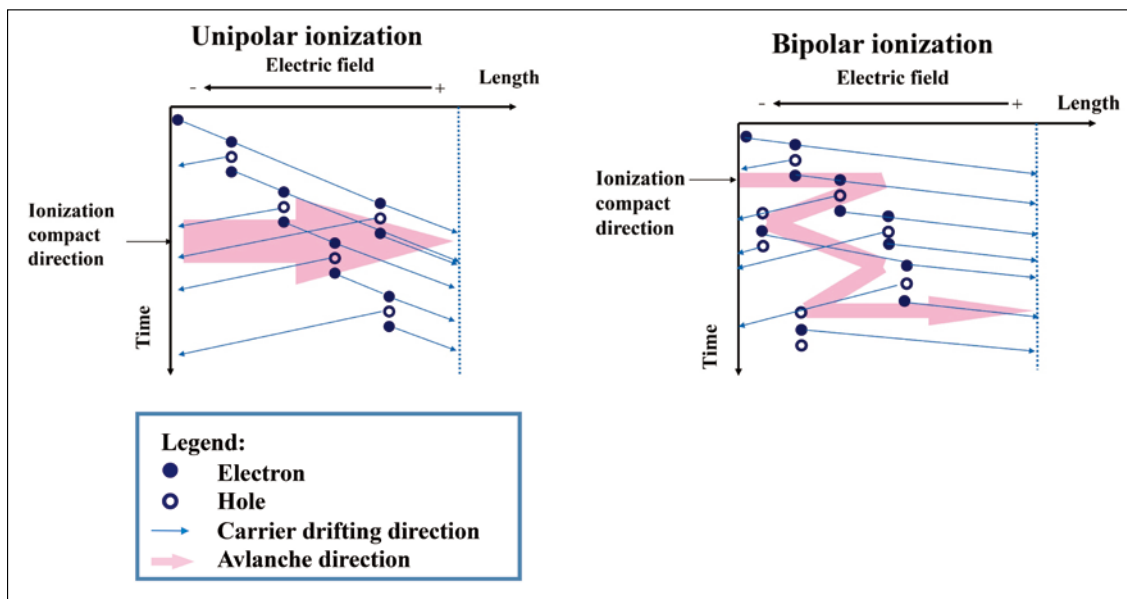


图1. 单极化和双极化。 (a) 在单极化APD中，只有一种载流子可以发生离子化碰撞，那么雪崩过程单向发生。 (b) 在双极化APD中，两种载流子都可以发生离子化碰撞，雪崩过程向两个方向交叠发生。

如电子的离子化系数如果是 $10^4/\text{cm}$ ，则表示电子离子化碰撞的平均距离是 $1\mu\text{m}$ ，一般载流子的离子化系数越大则表示其离子化能力越强。

离子化系数与离子化阈值能量（载流子能够触发离子化碰撞所需的最低能量），载流子运动受到的散射速率和外加场强存在很强的联系。离子化阈值能量越低，散射速率越小，外加场强越大，则离子化系数越高。

离子化阈值能量与材料能带有关，实际材料能带比较复杂，表现为非抛物线性，能谷众多和各向异性。离子化阈值能态一般处于高阶能谷或能带。这就要涉及谷间散射的问题。半导体材料中普遍存在的畸变势散射和极化光学声子散射都能使载流子频繁地改变动量，当载流子能量足够大，处于多个能谷的交界处时，有一定概率在声子辅助下发生谷间散射。

在线性模式 APD 中，一种载流子的离子化系数需要远高于另一种，这需要两种载流子的离子化阈值能量或散射情况有显著差异，使得两种载流子的离子化系数之比 k （小离子化系数比大离子化系数）接近 0。一般情况下， k 值不会为 0，离子化系数弱的载流子也会参与到倍增过程，由于是小概率事件，无法显著构成稳定的正反馈环，因此依旧属于单极化范畴，这种弱反馈会造成响应速度变慢，过剩噪声恶化的问题。

对于大多数半导体材料而言，从能态密度的角度看，导带和价带的差异性并不明显，电子和空穴的离子化阈值能量相近，而且载流子在输运到达离子化阈值能量之前都要经历类似的散射强度。

因此，两种载流子的离子化能力相近。当电压升高时，器件很容易发生双极化。单极化增益很低。比如 GaN APD 的线性模式增益只有 10 左右，Si APD 的线性模式增益只有 100 左右，SiC APD 的线性模式增益只有 100 左右，InAlAs/InGaAs APD 的线性增益只有几十。

目前有三种增强单极化性能的方法，减少雪崩区厚度，离子化碰撞工程 (I^2E) 和寻找导带价带差异性大的合适材料（如 HgCdTe 和 InAs）。

1. 减少雪崩区厚度

这种方法的出发点是利用载流子的死区效应来增加单极化性能，所谓死区是指载流子在输运中从 0 能量到离子化阈值能量所需要的最短距离，在死区中的载流子由于能量不够，完全没法触发离子化碰撞。

根据死区理论，可以将雪崩区厚度减少到小于一种载流子的死区厚度，使得这种载流子即使不受到散射也不会发生离子化碰撞，同时雪崩区厚度大于另一种载流子的死区厚度，这样另一种载流子可以触发离子化碰撞，这样，就增强了单极化的性能，然而，由于雪崩区很薄，能够发生离子化碰撞的载流子碰撞次数不多，导致线性增益很低（最高为 10 左右）。

2. 离子化碰撞工程 (I^2E : Impact ionization engineering)

1982 年 Capasso 等人提出了 $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ 超晶格型雪崩探测器，其中导带带阶 0.48eV，价带带阶 0.08eV。他们在论文中指出在大的导带价带差异性的影响下，电子发生离子化碰撞的效果

应该远远大于空穴。然而, 尽管他们用了 50 个周期的超晶格, 测试结果中给出的最高线性增益仅仅在 10 左右 (离化系数之比 0.125)。单极离化增强不明显, 后人的研究表明, 谷间散射的问题并没有得以解决, 因此即使导带存在大的带阶, 电子在输运过程中从电场获得的能量被谷间散射大量消耗, 离化效率很低, 与空穴相近。仅仅当到达异质结界面的时候才有微弱的增强效果。

尽管这一方法效果并不显著, 却为离化碰撞工程的发展开启了序幕, 后续有许多工作使用离化碰撞工程的手段来提高离化系数之比。最近, George Williams 等人开发了一种 I^2E 的 APD, 在器件中周期性地引入一系列的异质结与掺杂层, 对电场进行调控, 根据电场分布, 每个周期可以分为 3 个功能区, 包括一个雪崩区, 一个空穴弛豫区和一个电子加速区。当器件增益为 1000 的时候, 离化系数之比小于 0.04, 可见电子的离化能力远高于空穴, 单极离化特征显著。然而, 目前这种器件依然没有解决谷间散射的问题, 离化系数很低, 每一个周期需要厚度比较大, 不易于生长大周期器件, 周期数少增益自然没法提高 (目前最高为 1000)。

3. 寻找导带价带差异性大的合适材料

前面提到的谷间散射的问题主要是由于材料导带不存在一个比较深的孤立能谷, 能谷之间的能量差较低, 载流子在加速过程会频繁地发生谷间散射, 与空穴受到的散射情况相近。所以, 一种提高单极离化性能的手段是寻找合适的材料, 使得导带价带差异性增强, 比如 HgCdTe 和 InAs , $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 为直接带隙, 禁带宽度为 0.21 eV, 导带第一能谷 (Γ 谷) 与第二能谷 (L 谷) 之间的能量差距为 1.97 eV。InAs 为直接带隙, 禁带宽度为 0.37 eV, 导带第一能谷 (Γ 谷) 与第二能谷 (L 谷) 之间的能量差距为 1.16 eV。

在这两种材料中, 电子在 Γ 谷中输运获得较高能量的时候就可以触发离化碰撞, 输运过程不受谷间散射的影响, 从电场获得离化阈值能量的效率很高, 而另一方面, 价带有效质量大, 能谷位置接近, 空穴在输运过程中受到强烈的谷内及谷间散射, 从电场获得能量的效率远低于电子, 因此离化能力远低于电子。

然而, 由于这两种材料都是窄禁带材料, 当器件电场很大的时候, 器件容易发生齐纳击穿, 因此器件增益受限, 一般在 1000 以内。



图2. (a) 将一个相对较弱的磁场应用到一个具有周期性叠加的 GaN/AlN 结构的 APD 上, 使电子能量能够达到 5.3 eV 的电离阈值。(b) 透射电镜揭示这种分子束外延 (MBE) 生长结构具有高质量。

我们发现 GaN 和 AlN 这两种宽禁带半导体的第一导带都具有 2 eV 深的 Γ 谷, 虽然这个深度没有禁带宽度大, 电子在其中输运无法获得足够高的能量来触发离化碰撞。但是两种材料存在 2 eV 的导带带阶, 可以通过异质结来对导带的 Γ 谷进行拼接。信号光入射产生的电子在电场驱动下漂移进入雪崩区, 随后电子在 GaN 的 Γ 谷中运动获得 2 eV 能量, 再进入 AlN 中时, 由能量守恒可知, 到达 AlN 的 Γ 谷谷底。随后在 AlN 的 Γ 谷中运动获得另外的 2 eV 能量。在一个周期的运动中, 电子获得了超过 4 eV 的能量, 而且一直在 Γ 谷中输运, 因此等效的 Γ 谷深度超过 4 eV。当电子回到 GaN 中时, 可以高效率地触发离化碰撞。另一方面, 由于价带有效质量大, 能谷间距小, 空穴在输运过程中依然受到大量的谷内散射与谷间散射, 离化效率低。

基于上述分析, 我们提出了基于 GaN/AlN 周期堆栈结构的新型雪崩探测器, 在 GaN/AlN 周期性堆栈结构 APD 中, 电子一个周期发生一次离化碰撞。空穴基本不发生离化碰撞。理论上具备线性高增益特点。增益和周期数成指数关系增长。这一原理和 PMT 的工作模式十分相似, 可以看作是固态光电倍增管。

为了验证这个原理, 我们首先使用基于第一性原理的蒙特卡洛仿真来对比模拟传统 GaN APD 和 GaN(10 nm)/AlN(10 nm) 周期堆栈结构 APD 的器件特性。仿真结果表明, 新结构可以极大地增强电子的离化系数, 而对空穴离化系数的增强不明显。当电场强度超过 2.8 MV/cm 时, 电子离化系数饱和在 $3.96 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 。此时, 每个 20 nm 厚 GaN/AlN 异质结构中电子触发离化碰撞的概率是 80%。此前的任何类型 APD 均未能实现如此高的离化系数。

进一步, 为了验证器件的性能, 我们生长了

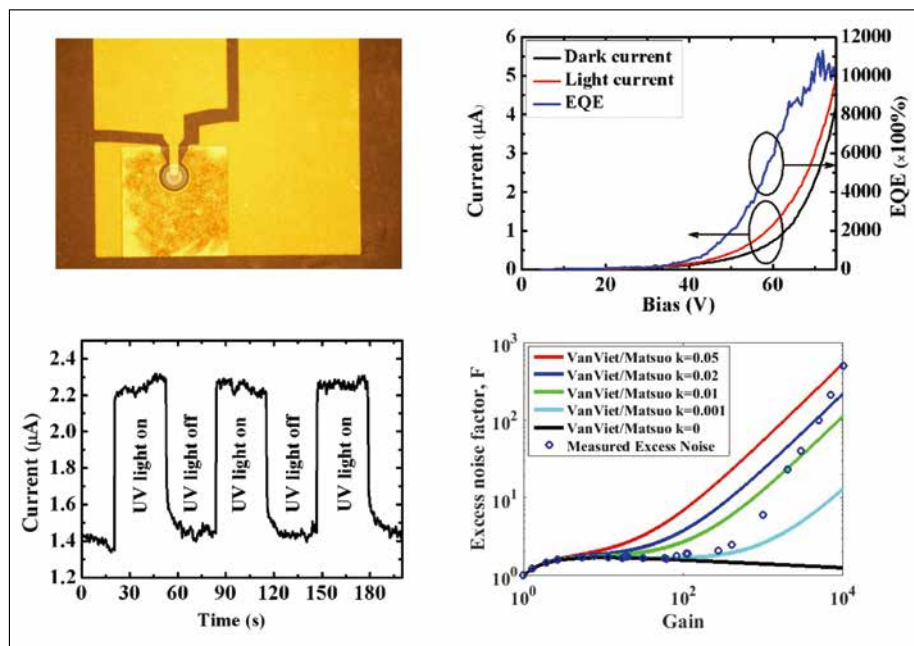


图3. (a)基于GaN/AlN周期堆栈的APD采用双台面结构设计。(b)器件的I-V特性及外部量子效率EQE。(c)在恒定偏置时的器件响应。(d)在不同增益值时APD的过剩噪声情况。

具有20个周期GaN(10 nm)/AlN(10 nm)异质结构倍增区的APD原型器件。该器件采用了吸收和倍增分离的p-i-p-i-n结构。材料是在苏州纳维公司提供的2英寸AlN(4 μm)/蓝宝石模板上用分子束外延技术生长得到的。外延结构包括：50 nm厚AlN层，500 nm厚GaN: Si层，20个周期非掺GaN(10 nm)/AlN(10 nm)，10 nm厚GaN: Mg层，300 nm厚非掺GaN层以及100 nm厚GaN: Mg层。截面透射电镜照片表明外延层均匀，界面陡峭，各层厚度和设计值吻合得很好。

为了防止边缘漏电和击穿，我们使用感应耦合等离子体干法刻蚀技术引入了双台面结构。外部圆台面的直径为35 μm，内部圆台面（光敏面）的直径为25 μm。用等离子增强化学气相沉积生长SiO₂钝化层。p型透明欧姆接触电极和n型欧姆接触电极分别是Ni(2.5 nm)/Au(8 nm)和Cr(25 nm)/Au(200 nm)，电极焊盘是100 nm厚的金。

将器件置于无外加光照和有外加光照的环境中用Agilent 4155C半导体参数分析仪分别测试器件的I-V特性，得到暗电流特性和亮电流特性。测试光源采用氙灯，用单色仪分出350 nm的单色紫外光作为入射信号（近似看成均匀面光源）。使用光功率计测试入射光功率密度，功率计探测器圆台面直径为1 cm（远小于信号光斑尺寸），

测算得到的功率密度为51 μW/cm²。考虑到器件光敏面直径为25 μm，根据几何关系，耦合到器件中的光功率为250 pW。

可见，周期性AlN/GaN结构APD的增益线性工作特性明显，器件增益并无击穿特征，而是随偏压的增加稳定上升。器件增益最高可以达到10⁴，相当于2¹³~2¹⁴。这意味着在20个周期的堆栈结构中，电子平均在13~14个周期发生电离碰撞，每个周期的电离概率约为70%，与理论仿真结果相近。

为了确认器件可以稳定地工作在恒定偏置电压下，我们记录了65 V恒定偏压下光响应电流随着入射紫外光通断相应的变化。外量子效率最高可

达10⁴，而传统APD在恒压模式工作时不可能做到这一点。这个结果意味着在GaN/AlN周期性堆栈结构APD中，电子触发的电离碰撞是高效而且可控的。可以预见，通过优化GaN和AlN的厚度以及增加周期数，可以进一步提高APD的增益。

雪崩倍增一般会在器件中引入大量的无序噪声，这一无序噪声称为过剩噪声。过剩噪声是雪崩探测器中的特有噪声。影响过剩噪声的主要因素是载流子电离系数之比k(0~1)，当k为0的时候，过剩噪声最低，相当于散粒噪声被放大M²倍(M为倍增因子)。当k不为0的时候，过剩噪声变大，相当于散粒噪声被放大M²F倍，F为过剩噪声因子。为了从过剩噪声因子测试中获知载流子电离系数之比，我们将实验数据与包含拟合参数k的VanVliet/Matsuo模型进行比较。可以看到，当器件增益小于100的时候，实验数据与k=0的理论曲线比较匹配，表明此时器件中只有电子发生电离碰撞。当增益超过100的时候，由于电场较高，空穴会对雪崩碰撞有微弱的反馈作用，k值有微弱上升。但即使当增益高达10000的时候，k值也仅仅为0.05，这一指标与Si基APD在增益只有100的时候的k值相当，证明周期性AlN/GaN结构APD具有极低的电离系数之比。

上述研究结果为固态探测器实现类光电倍增管工作模式提供了使能技术，可使雪崩探测器在微弱光探测时避免现有盖革工作模式所必须的复杂淬灭电路，在微弱光成像阵列，尤其是紫外光成像阵列方面具有重要应用前景。

扩展阅读

- [1] J. Zheng et. al. Appl. Phys. Lett. 109 241105 (2016)
- [2] J. Zheng et. al. Sci. Rep. 6 35978 (2016)

Book your place at the third

Photonic Integrated Circuits Conference

Tuesday 10 & Wednesday 11 April 2018

Sheraton Brussels Airport Hotel, Belgium

Co-located with CS International Conference & High-End Sensors International

FIVE KEY THEMES:

Over 30 inspiring presentations

- Moving the data: PICs for cloud computing and telecoms
- Refining the PIC: achieving the next milestone in performance
- Delivering the goods: advances in PIC manufacturing
- PIC Design, simulation and packaging: a blueprint for future success
- PIC horizons: new and emerging applications for integrated photonics



Book your place NOW!

www.picinternational.net/register to secure your place

It's set to be another sellout

PLATINUM SPONSORS



GOLD SPONSORS



WIFI SPONSOR



LANYARD SPONSOR



SUPPORTED BY



PIC INTERNATIONAL CONFERENCE

Creating and strengthening links between chipmakers and network builders

CS INTERNATIONAL CONFERENCE

10-11 APRIL 2018
Sheraton Airport Hotel Brussels

Connecting, informing and inspiring the compound semiconductor industry.

CS INTERNATIONAL 2018 CONFERENCE SPEAKERS ANNOUNCED!

With a record breaking number of speakers and sponsors secured, the eighth CS International Conference is set to be the biggest and best yet!

Held at the Sheraton Airport Hotel in Brussels on 10-11 April 2018, CS International will once again be the must-attend event for the global compound semiconductor community.

Highlights include talks by the leaders of power electronics pioneers Transphorm, Panasonic and VisiC; presentations on the integration of compound semiconductor and silicon technologies by NAsP III-V and the co-ordinators of two multi-partner European projects; plus a talk by Seoul Semiconductor on its pioneering efforts at chip-scale LEDs amongst many others.

Delivering over 30 presentations
CS International will provide comprehensive coverage of the global semiconductor industry exploring 5 core themes

- Wrestling market share from silicon power devices
- Finding solutions with heterogeneous integration
- 5G: Where are we and what's next?
- LEDs: Magnifying margins
- Ramping revenues from RF devices

For each theme a keynote presentation and market analyst talk will be given by the leading decision makers and influencers within the industry.

Book your place NOW!

www.cs-international.net/register to secure your place

It's set to be another sellout

PLATINUM SPONSORS

AIXTRON

CATAPULT
Compound Semiconductor Applications

EPIGAN

evatec
process systems

FerroTec

htt GROUP.

ims chips

nanotronics

Nanowin
苏州纳维科技有限公司
Suzhou Nanowin Science and Technology Co., Ltd

Revasum

YOLE
Développement

GOLD SPONSORS

CS CLEAN SOLUTIONS

IQE

LAYTEC
Knowledge is key

Panasonic

semi

WIFI SPONSOR

BROLIS
SEMICONDUCTORS

PORTFOLIO SPONSOR

Plasma-Therm

DELEGATE BAG SPONSOR

QORVO
all around you

SUPPORTED BY

EPIC
European Photonics
Industry Consortium

This two day event covers five themes

Speakers announced to date

Wrestling Market Share from Silicon Power Devices

What are the next opportunities for SiC? And how can GaN gain significant traction in the market place?

ANALYST

- **Richard Eden: IHS Markit**
The SiC & GaN power semiconductor market:
Forecasts and drivers

SPEAKERS

- **Philip Zuk: Transphorm**
Shifting gears: The “GaN-ification” of automobiles
- **Peter Friedrichs: Infineon**
Exploiting the merits of GaN and SiC
- **Hiroyuki Handa: Panasonic**
Trimming the losses in GaN GITs
- **Tamara Baksht: VisiC Technologies**
High efficiency at high power density: realisation of GaN’s promise for power electronics
- **Andy Sellars: Catapult**
Accelerating the commercial application of compound semiconductors
- **Mohamed Alomari: IMS Chips**
Fast-loop assessment of GaN/AlGaIn epitaxial layers for power applications

Finding Solutions with Heterogenous Integration

Where will the growth of compound semiconductors on silicon deliver a fundamental change? And what are the tricks to ensure success?

ANALYST

- **Zhen Zong: Yole Développement**
Presentation title to be announced.

SPEAKERS

- **Jean-Pierre Locquet: GaNonCMOS EU Project**
Dense integrating GaN power switches with CMOS drivers
- **Wolfgang Stolz: NAsP III-V**
Building III-V-devices on CMOS-compatible Si (001)
- **Lars-Erik Wernersson - Lund University**
Integrating III-V nanowires to advance CMOS system-on-a-chip technologies

5G: Where are we and What's Next?

What form will 5G take? And how good will 5G be for GaAs and GaN?

ANALYST

- **Eric Higham: Strategy Analytics**
Is 5G roll-out a certainty? And will it be good for GaAs and GaN?

SPEAKERS

- **Roger Hall: Qorvo**
Building the industry’s first 5G front-end
- **Liam Devlin: Plextek RFI**
MMICs - what is needed to get mmWave 5G to work?

LEDs: Magnifying Margins

Which sectors offer the best returns? Does the bottom line get the biggest benefit from streamlining manufacturing, or from optimising the chip?

ANALYST

- **Pars Mukish: Yole Développement**
Revolutionising displays with MicroLEDs

SPEAKERS

- **Andreas Weisl: Seoul Semiconductor**
Improving LEDs with a Wafer Level Integrated Chip on PCB (WICOP) architecture
- **J.C.Chen - Ostendo Technologies**
The monolithic full-colour LED and its applications
- **Keith Strickland – Plessey Semiconductors**
Horticultural lighting offers growth opportunities

Ramping Revenues from RF Devices

What are the opportunities for III-Vs in defense and civilian markets? Will higher frequencies open up new sales?

ANALYST

- **Asif Anwar, Strategy Analytics**
Defense sector trends and the associated market outlook for compound semiconductors

SPEAKER

- **Nick Cataldo, Efficient Power Conversion**
Wireless charging with GaN devices



评估 UV LED 的能力

对 UVC LED 的性能的真正了解需要了解其与温度相关的输出功率及其光谱分布

Leo Schowalter, Crystal IS

对 饮用水和医疗表面的消毒不良会造成严重的后果。根据下面两个统计数据我们不妨设想一下：十分之一的人仍然无法获得清洁的饮用水；每 25 名患者中会有 1 人在住院期间被感染，导致医疗费用增加数十亿美元。

幸运的是，一场革命正在进行中，新的解决方案正在使消毒方式实现现代化，从而有更大的设计灵活性和成本效益。新一代的产品已经出现，配备了在 UVC 波段发光的功率 LED，其辐射范围为 200nm 到 280nm。装备了这些固态资源后，可将更紧凑的设计引入到从便携式饮用水净化系统到抵御空气传染的医院基础设施等所有系统中。

随着 UVC LED 应用的日益增加，提供这些器件的制造商数量也在增加，而且在量化该光源性能方面也比以往更加引起人们的兴趣。这些应用中的关键性能特征是输出功率和杀菌效果。

功率输出因子

对于所有类型的 LED，无论其发射波长如何，

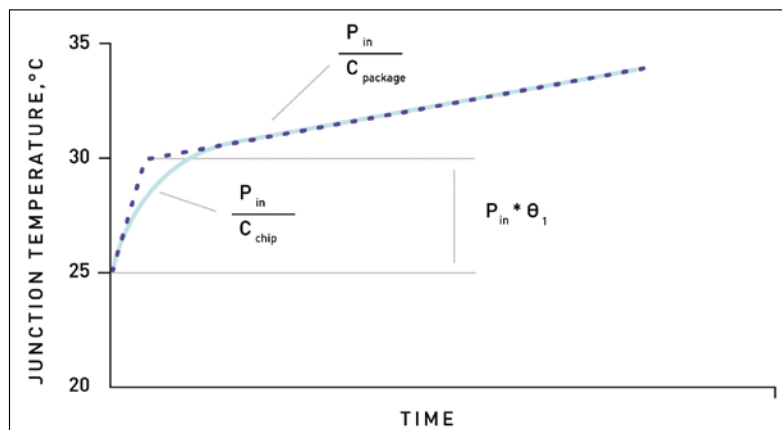


图1. 典型Crystal IS的Klaran二极管中温升作为脉冲长度函数的非常简单的模型。请注意，Klaran UVC LED是在本征AlN衬底上制造的，因为AlN的高导热性，它将会非常快速并且（几乎）均匀地加热。虽然通常该模型适用于所有UVC LED，但是在Al₂O₃上制造的二极管具有数量级上更低的热导率，并且在较高功率下可能具有更高的芯片温度变化。

光都从器件的前部发射出来，而热量从后面提取。在工作期间，随着结温升高，LED的光输出减少。

使用可见光LED，通常有40%至60%的电转换热能。这是相当可观的，但在UVC LED的情况下，95%或更多的能量将转化为热量。因此，正确管理热量来维持光输出就显得至关重要。这个问题被放大，因为市场驱动是减小LED引脚面积，从而实现紧凑的封装，这限制了内建热吸收或耗散设计的选项。

为了理解良好热管理的重要性，请注意，如果UVC LED未安装到热管理系统中，则可能在不到一秒钟内达到200°C。在这种温度下，器件输出将下降到接近于零，并且寿命也会非常短。

对于寻求表征二极管而不将其焊接到热管理系统的客户，推荐使用脉冲测量方法来限制器件内的发热并提供可靠、可重复的输出功率测量。这是当这些器件商业化时，Crystal IS和其他厂商用来测量UVC LED输出所采用的相同方法。

我们可以使用一个非常简单的模型用于典型Crystal IS的Klaran二极管中温度升高，它是脉冲长度或持续时间的函数（图1）。热量通过连接到LED封装其余部分的金凸块键合的热传导而从芯片导出。由于芯片内部的热阻远远小于键合，芯片的热容远比封装的热容小，因此芯片温度会快速上升。这将一直持续到芯片和封装之间的温度差大致等于输入功率乘以热阻的乘积，此时芯片中产生的热量将近似等于热传导带走的热量。

随着温度初始的升高，当封装升温时，结温上升变得更慢。几毫秒之后，温升的斜率接近输入功率除以封装的热容。在大量的热量可以进入周围环境之前。温度将继续上升。

在LED最初几毫秒的工作之后，保持封装

冷却需要热量从封装流出到散热器（这在图1中示出）。当发生这种情况时，封装和热管理系统之间的热阻通过焊料到散热器的质量以及散热器吸收能量或将其辐射到环境中能力的综合来确定。

如果器件在没有散热器的情况下工作，结温将继续上升，这将导致光输出的减少。尽管如此，使用脉冲模式仍然可以进行二极管精确的输出功率表征。为了提高精度和重复性，功率输出应在曲线逐渐增加的部分测量，而不是在第一毫秒的陡峭倾斜处测量。这允许芯片和封装之间的温度差稳定在与LED芯片和焊盘之间的大致相同值。此外，功率测量应在尽可能短的时间内进行——只是足以捕获二极管的功率输出，同时最小化封装的热诱导温升。我们通过在电流脉冲启动后等待3毫秒来测量器件，然后将输出积分8ms，这意味着在脉冲开始后我们停止积分11ms（图2）。

在尝试确定UVC LED的输出功率时，存在无法了解测量时间影响相关的陷阱。如果我们以25℃环境温度下运行的具有20mW标定输出功率的Crystal IS的Klaran LED为例。封装的热容约为20 mJ/K，这意味着对于4W输入功率，温升的斜率约为200K/s。由于该二极管具有每开尔文0.5%的比热降率，如果结温升高10℃，功率将下降5%。

然后，我们通过80ms的脉冲驱动来评估LED的输出功率，并在40ms后测量40ms的输出功率。在此过程中，由于加热，芯片的温度在第一个毫秒内有初始跳变。之后，在最初的40ms内，结温相对于封装增加了8℃（即每毫秒0.2℃）。一旦80毫秒过去，这发生在二极管随后在没有散热器时的另外40毫秒运行，结温又增加了8℃。在最初40ms期间，二极管的瞬时功率下降了4%，

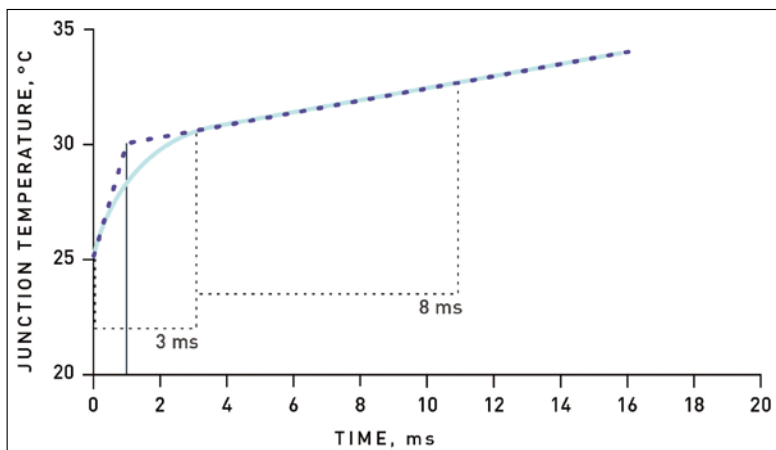


图2. Crystal IS通过在电流脉冲启动后等待3ms并将输出功率积分8ms来测量Klaran器件功率。

并在接下来的40ms内再次下降了这个量。因此，假设通过对40ms和80ms之间的功率进行平均而获得测量的功率，则功率的测量减小为6%。

实际上，这个平均值是通过通过对40ms的功率进行积分，并除以探测到该测量能量的积分时间来获得。这使得积分功率为18.8mW，这比20mW标定功率减小了6%。与数据表中标定的输出相比，测量输出的差异突出显示了结温增加的影响。

独特挑战

UVC LED 标定为以最大输入功率运行，并在预定的设计温度范围内工作。这些设计规格在二极管的产品数据表中概括，而制造商校准其测试设备从而确保运送给客户的产品符合这些规范。为了确保组件质量，客户的质量控制工程师应该像OEM一样对LED进行测试/测量。在前面的例子中，积分球用于脉冲模式中测量Klaran二极管的总功率输出。

制造商采用两种方法之一测量光源辐射通

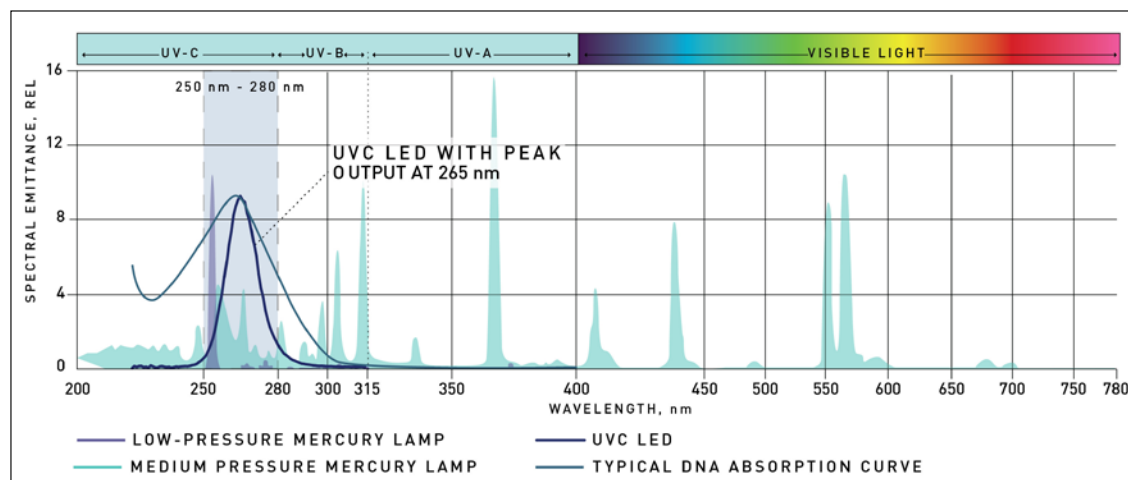


图3. 低压和中压汞灯与LED相对典型DNA吸收曲线的光谱比较。

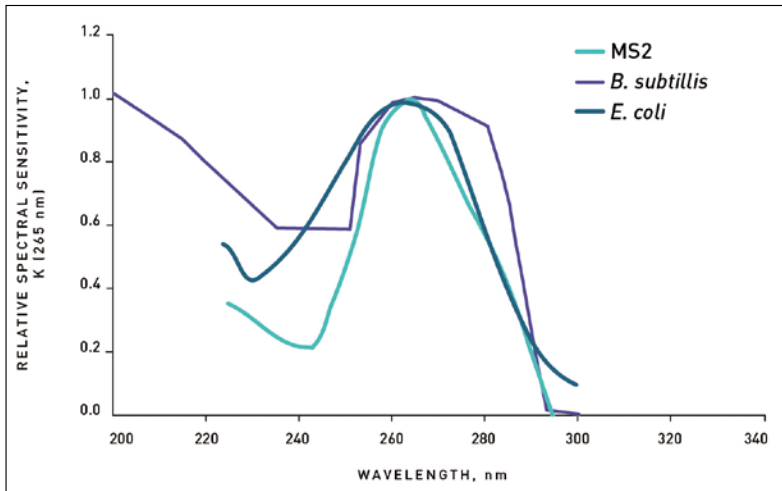


图4. 水消毒中在265nm处归一化为1的常见靶向/攻击微生物的作用光谱。ÖNORM标准定义的枯草杆菌作用光谱；如Henk F. J. I. Giller在WEF 2000中A review of UV lamps中所概述的大肠杆菌；以及Bryan Townsend等人在This Way Forward: Addressing Action Spectra Bias Concerns In Medium Pressure UV Reactors中发现的MS2噬菌体。

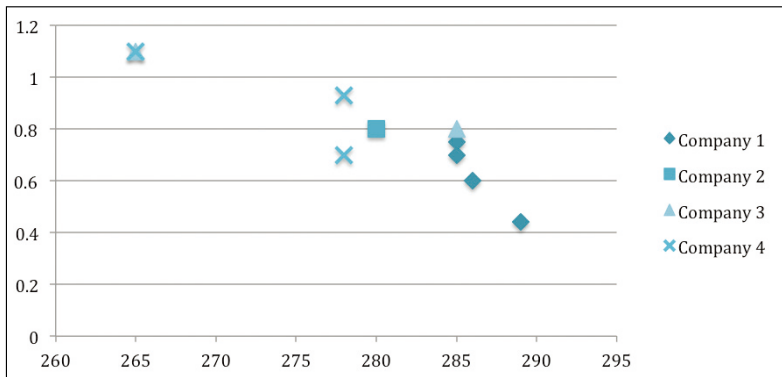


图5. 一系列市售UVC LED的总功率与杀菌能力的比值，基于ÖNORM标准。即使波长的微小变化也对可用的杀菌能力有很大的影响。这是更长波长处的特别问题，其中辐射效率随波长快速变化。

量，通常称为器件功率。他们或者使用积分球，收集放置在球体内的光源的所有光；或者采用成像光度计，记录围绕光源的许多不同角度的光辐射通量，从而得到作为角度函数的辐射通量。采用后者，可以计算每个立体角上的辐射，这称为辐射强度——对所有角度积分就得到了光源的辐射通量。

当用光度计测量功率输出时，重要的是不要有假设特定辐射图形的想法。通过测量一个LED的辐射强度来节省时间是很诱人的，然后以一个固定角度记录后续二极管的功率后，使用该单个值来推断二极管的总功率。由于封装或制造商的差异，当器件间的辐射强度变化时，这是有缺陷的。

当用光度计测量功率输出时，重要的是不要有假设特定辐射图形的想法。通过测量一个LED的辐射强度来节省时间是很诱人的，然后以一个固定角度记录后续二极管的功率后，使用该单个值来推断二极管的总功率。由于封装或制造商的差异，当器件间的辐射强度变化时，这是有缺陷的。使用积分球避免了这个问题，因为它们是为设计来精确测量二极管的发射功率，无论辐射图形是什么。

确定杀菌能力

知道 UVC LED 功率输出的准确值本身并不能揭示出消毒系统的能力。这是因为这种辐射的有效性是依赖波长的，250nm 至 280nm 范围内的光对于灭活微生物的 DNA 最有效，使得它们不能够再繁殖。

历史上，已经通过中低压汞弧灯完成了消毒。低压灯发出 253.7nm 的单一波长，因此灯的总输出功率等于 UVC 范围内的输出功率，尽管处于次佳波长。相比之下，中压灯发出更宽的光谱，包括杀菌范围内的波长，以及无助于消毒的波长。对于这些灯，通常只有 20% 至 30% 的光是在 UVC 范围内。

使用 UV LED，光谱轮廓更合适（见图 3）。这些光源的连续光谱响应与用于消毒的最关键波长有更大的重叠，使得它们成为这些系统的更有效的光源。然而，这些发射光谱中的差异需要新的方法来表征消毒效果。

这与可见光源制造商面临的情况非常相似。他们用流明测量亮度，这是考虑到人眼光谱响应的单位。对于 UVC LED，重要的是灭活病原体的功率输出。这被称为“杀菌能力”。

指定特定应用所需杀菌能力的最准确方法是知道所要灭活的特定病原体及其作用光谱——即这种病原体对光源波长的独特特征灵敏度。一旦知道，UVC LED 的杀菌能力可以通过光源和病原体作用光谱的叉积来确定。

不同的病原体对 UVC 能量具有不同的敏感水平（参见图 4 的例子）。尽管所有接近的峰值均为 265nm 的 DNA 峰值吸收波长，但对离散的波长，其灵敏度会有所变化（见表）。UVC 二极管的发光乘以权重确定了功率输出，这要根据消毒特定病原体的可用功率。

随着 UVC LED 应用的扩展，供应商的数量

对 SiC 高压 MOSFET 的关键看法

高压 SiC MOSFET 的优点包括低开关损耗和高工作温度。但是这种晶体管用于广泛部署是否足够坚固并且可靠呢？

Munaf Rahimo, 瑞士 ABB 半导体有限公司

几十年来，硅器件主导着电力电子市场。它们通过起始材料质量，工艺制造技术和期间架构方面的巨大进步，保持主导地位。

然而，硅不是完美的电力电子材料：其固有的材料特性明显劣于宽禁带半导体材料。这激发了对 SiC 器件的研究和开发，从而可以提供卓越的性能。优点包括更宽的额定电压范围，更低的损耗和更高的工作温度。

这些属性受到电气系统设计师的欢迎，因为它们可以实现增加工作效率和更高的电流密度、频率和温度。所有这些属性所产生的节约不仅仅是以能量来衡量，而且是扩展到单元的成本、重量和尺寸，因为有机会缩小半导体部件、冷却系统和无源元件 / 磁体。

第一个进入市场的 SiC 器件是 SiC 基肖特基势垒二极管 (SBD)。起步于二十一世纪初，它最初进入的额定电压低于 1200V。它可以作为分立元件来购买，也可以作为与硅 IGBT 配对的混合模块的一部分来购买。许多低功率逆变器已经搭载了这些器件，包括用于太阳能光伏市场。

最近，SiC 功率器件产品组合已经通过推出额定值低于 1700V 的 SiC MOSFET 得以扩展（见图 1）。这些晶体管可以作为分立元件，也可作为全 SiC MOSFET 模块来得到。

许多领先的 SiC MOSFET 生产商现在正试图将器件的额定电压提高到 3.3kV 及以上（参见图 2 有关这些器件性能的示例）。这一举措有可能在较低功率范围内提供类似的改进。然而，这些 MOSFET 将针对具有兆瓦功率的不同应用，如：电网系统，HVDC 和 FACTS；铁路牵引转换器；中压工业驱动器和大功率可再生能源转换和存储。

兆瓦要求

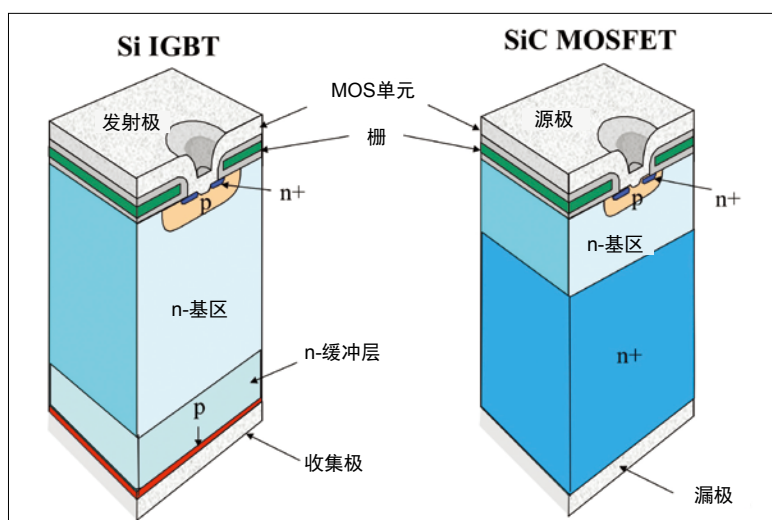
兆瓦范围内的大多数大功率应用基于电压源转换器 (VSC) 拓扑，并在低于 2kHz 的开关频率下工作。今天，这些系统的核心是高压硅开关，如 IGBT 和 IGCT，以及额定电压高达 6.5kV 的二极管（见图 3）。所有这些器件的能力不断增加，通过硅器件 / 封装技术的进步从而不断改善系统性能、可靠性和成本。

传统上，根据特定应用的要求和最佳性能 - 成本比，基于 VSC 的应用采用两级（见图 4）或三级拓扑（注意，该级是指输出电压的数量）。采用这种技术，更高电压的路径是许多器件的串联连接。HVDC 系统就采用了这种方法。

近几年在许多电网系统和工业驱动器应用中已经看到的一个重要趋势是转向多级拓扑。这允许在低得多的频率（例如低于 300Hz）下工作，并且产生非常低的损耗和更高的功率水平。

拥有广泛的高功率应用的一个后果是导致规格差异，包括功率处理，效率和成本等方面

图1. 硅IGBT主导电源开关市场，但面临来自SiC MOSFET的日益激烈的竞争。



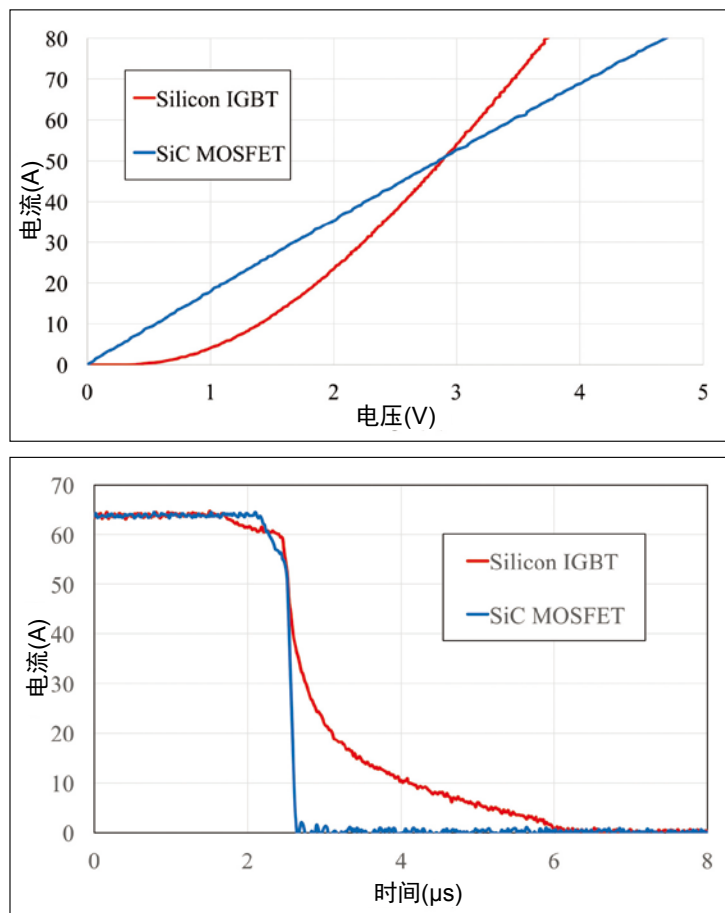


图2. 罗姆公司是高压 SiC MOSFET 的先驱之一。其性能与 ABB 生产的 IGBT 可比。

的差异。设计工程师必须从许多可用的器件和服装解决方案中仔细选择，从而满足特定应用的要求。然而，还是存在一些共同点，因为所有大功率应用都共享设计实践，其最佳描述是一个细致而相对较慢的过程。关键在于整体性能和可靠性，而不仅是考虑基本的功率额定值和相关的损耗计算。

对于全球功率技术巨头 ABB，我们在评估主流、兆瓦应用的电力电子器件需求方面拥有着丰富的经验。在本文的剩余部分中，我们将在考虑和评估 SiC MOSFET 在高功率范围内的机会之前，详细介绍功率电子学的关键特性。

兆瓦应用功率电子的主要考虑可以分为三类：功率密度处理能力；可控、软开关的能力；耐用性，故障处理和可靠性。处理高功率的器件理想上应该具有低的导通和开关损耗，低的热阻，以及在不损害可靠性情况下的高温工作能力。

当涉及到第二类的可控和软开关时，需要一个通过低过冲电压和最小 EMI 电平实现的软控制关断，以及瞬间寻址同时最大限度减少损耗的开启控制。第三类——坚固性，故障处理和可靠性——涉及与关断电流相关的安全工作区域考

虑，故障处理问题包括 IGBT 的短路能力和二极管的浪涌电流极限，以及与电流和电压共享，并联和串联配置的器件；稳定传导；以及稳定阻塞性能相关的可靠性要求。

在考虑所有这些问题的同时，设计工程师还必须评估封装的属性。目前正在向更紧凑的封装转变，这将采用更低寄生元件的更高封装密度与优化电气布局的机会相结合。额外的趋势是开发更高功率的封装，根据电流、电压和温度处理能力，以及温度和功率循环的可靠性来判断。

如果将功率半导体设计用于大功率应用，则必须满足上述所有的细节要求。鉴于这种情况，我们认为，SiC MOSFET 必须克服一些取决于具体应用的挑战，然后它们才有可能对已经建立并仍在改进的硅器件产生足够强的竞争。

SiC MOSFET：优点和缺点

尽管还有工作要做，但毫无疑问，单极 SiC 器件，特别是 SiC MOSFET 和 SBD，对于高达 10kV 的电压额定值仍然是最有希望的选择。器件测量表明，对于高达 10kV 的电压，即使在高温下也能实现低导通损耗的开关损耗大幅度降低。从实际应用的角度来看，这是令人鼓舞的，因为 SiC MOSFET 所需的电压控制栅极驱动器与广泛应用的 IGBT 非常相似。

在性能方面落后的是高压 SiC 双极器件，如 p-i-n 二极管，IGBT 和晶闸管。它们都受限于高开态损耗，这源自于 pn 结中固有的超过 2V 的内置电压。更糟糕的是，SiC 双极器件受到正向电压退化的困扰，这可以追溯到器件传导期间材料产生的晶体堆垛层错。

鉴于这种情况，很明显比较令人信服的方式是仅关注 SiC MOSFET 和 SBD。在这里，以二极管模式工作来运行 SiC MOSFET 的兴趣越来越大。这是因为在续流模式期间很容易实现 MOSFET 导通的栅极驱动，低反向恢复损耗以及获得采用额外 SiC 二极管相关的较低成本。我们认为，对于大功率应用，这种方法提供了一个完美的机会。要了解为什么，请考虑我们以下的分析。

控制功率

随着功率器件的改进，它们可以减少整体的损耗。这样可以实现功率密度提高，同时有机会提高系统的效率。对于硅 IGBT 和 SiC MOSFET，

实现这一点需要优化沟道密度、电阻、MOS 单元间距和器件厚度。两个晶体管之间的关键区别在于：对于硅 IGBT，仍然需要微调基区中的过剩载流子增强；而对于单极 SiC MOSFET，必须努力通过明智地选择基区的掺杂和厚度来降低导通电阻。

对于更高电压的器件，损耗分量更为突出，这将强化 SiC 的应用。假设在典型标称电流下传导损耗类似，与硅二极管相比，SiC MOSFET 在开关模式切换损耗方面将会有 75% 以上的总体下降，同时二极管恢复损耗几乎可忽略不计。SiC MOSFET 的低总体损耗使其成为许多主流应用的有吸引力候选者，其中使用低于 2kHz 的不同拓扑。

SiC MOSFET 相比硅 IGBT 和二极管的另一个优点是没有内置电压。这使得 SiC MOSFET 有潜力让所有技术改进都能削减损耗——这是硅器件无法达到的高度。

有了这个属性，SiC MOSFET 是现代需要低导通损耗的多级拓扑的有吸引力选择。此外，SiC MOSFET 在低电流下的低导通损耗实际上在许多应用中都非常有吸引力，包括 FACTS/STATCOM 和城市牵引，其中很大部分的损耗是在低负载或空载条件下耗散的。

宽带隙材料众所周知的优势是它们比硅更优异的热性能。然而，这个优点影响最小，因为热阻主要取决于器件面积、封装和冷却。产生更大区别的是高温下的低漏电流，因为这允许 SiC 器件工作在 200℃ 以上。

SiC MOSFET 的一个局限性是所采用的封装技术，包括封装材料和接合技术。可靠性拖了后腿，



正如封装的硅器件一样。因此，大多数来自冷却简化的系统改进源于 SiC 器件的较低损耗。然而，请注意，高温下还存在影响 SiC MOSFET 的弱点，这与其强的正温度系数相关。因此，传导损耗在较高的温度下会增加，并且必须通过增加器件面积来解决——这是增加芯片成本的方法。

卓越的切换

单极器件的一个问题是关于它们的开关特性。这被归咎于开关瞬态期间的振荡行为，源于过剩载流子的缺席。相比之下，双极性器件则具有更软的特性。然而，虽然这些观点有道理——并且开发低电感封装和电路非常重要——但是 SiC MOSFET 可以从栅极驱动器配置的调整中获益，其中最大的增益来自关断栅极电阻的优化。

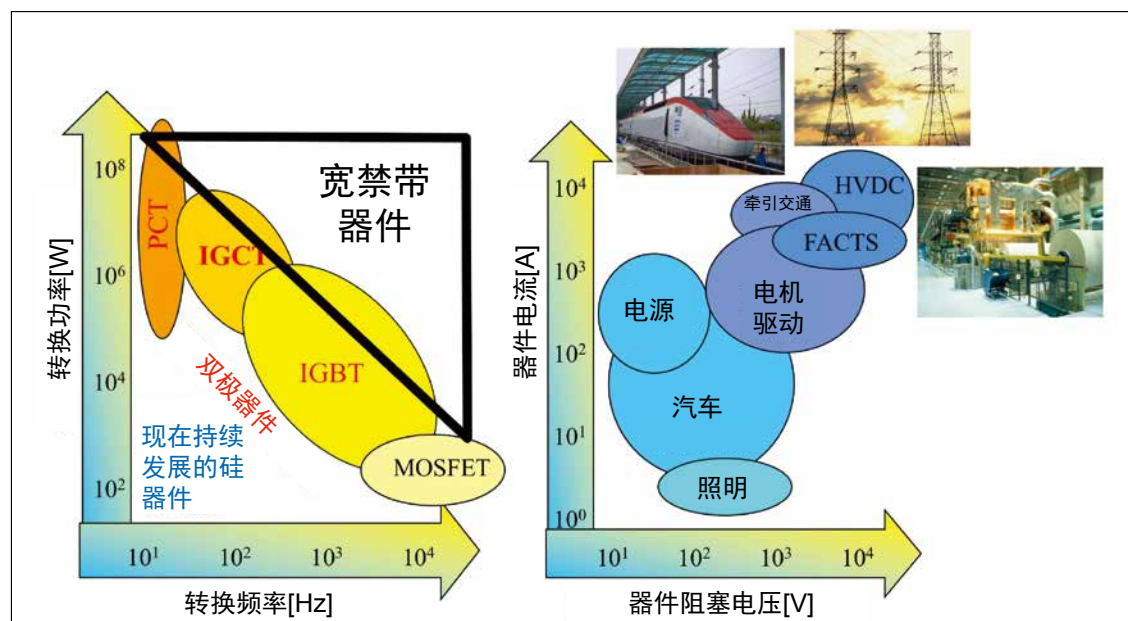


图3. SiC器件的目标是当前由硅产品组合服务的大功率半导体市场中的各种应用。

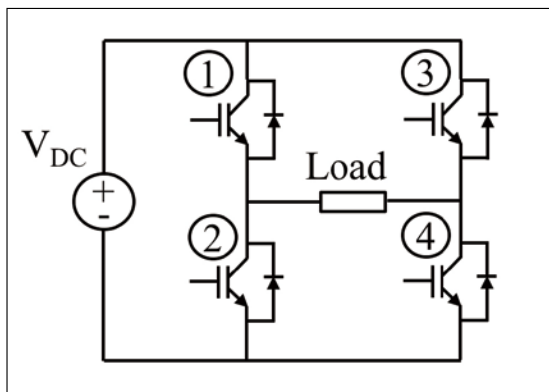


图4. 具有四个IGBT和二极管的典型电压源转换器H桥。

尽管较高的栅极值增加了关断状态下的能量消耗，但损耗仍然远低于那些使用 IGBT 器件的。因此，大功率应用中的系统性能可以通过大幅减少损耗来显著改善。

SiC MOSFET 的其他优点是其导通时的良好响应，当实现这个功能时，它能够产生比硅 IGBT 低得多的能量损耗。这些优点来自低的反向恢复峰值电流，以及切换期间非常快速降低电压的能力。

坚固耐用，可靠性和故障处理

对于大功率应用，坚固耐用，可靠性和故障处理在功率器件设计阶段都起着重要作用。对于 SiC MOSFET，这些要求可能是将其引入高压区间的绊脚石。

SiC MOSFET 的优点之一是在其关断期间的实质性安全工作区域。由于该器件具有单极性，因此不会发生动态雪崩极限，从而损害安全工作区域能力——注意这将阻碍硅 IGBT。此外，SiC MOSFET 具有更高的结内置电压，因此，与其硅

同行相比，它在开关期间具有额外的保护来防止寄生 n-p-n 晶体管失效模式。基于这些特性，因为宽禁带材料更高的内置电压，需要更高的电流来正向偏置 n 型源极。反过来，安全工作区域能力得到了潜在的改善。

关于高压应用的关键性能要求之一的故障处理，SiC MOSFET 尚未达到所要求的水平，因此需要或者提高器件能力，或者替代地在系统 / 门驱动级别采用新的解决方案。

令人鼓舞的是，低压 SiC MOSFET 已经具有耐受短路条件的能力。但是由于这些器件具有很高的短路电平，因此需要采用新的栅极驱动条件来限制脉冲持续时间——而这会导致更高的热应力，因为未来确保低开路电阻的高 MOS 单元密度。缺点是，短路能力的改善将以传导损耗的增加为代价，这在高压器件中是相当可观的。

关于二极管浪涌电流能力，一直有适应大电流的需求，它可以高达不同脉冲持续时间下十倍的额定电流。如前所述，当以二极管模式使用 SiC MOSFET 时，由于在这种高电流下较低的导通损耗，集成 p-i-n 二极管比单独的单极二极管更适合用来提供所需的浪涌电流能力。

对可靠性的担忧必须考虑 SiC MOSFET 是如何在电路中部署的。如果是以大电流模块中包括许多芯片的并联配置来使用，器件的强正温度系数及其开关损耗对温度的低依赖性应该能够确保良好的电流共享。如果串联使用，由于漏电流低以及对温度升高的依赖也不大，所以也不存在重大问题。最大的挑战是实现低的随时间变化电压

ABB 的 SiC 开发

位于瑞士的 ABB 公司研究中心的科学家和工程师们一直在研究 SiC 器件和封装。此外，该团队已经开发出先进的封装形式，重点是实现最佳的开关性能。所有这些努力的主要焦点是开发针对中高功率部件的下一代组件。ABB 具有强大的市场地位，特别是在电网系统，牵引轨道和工业应用中。

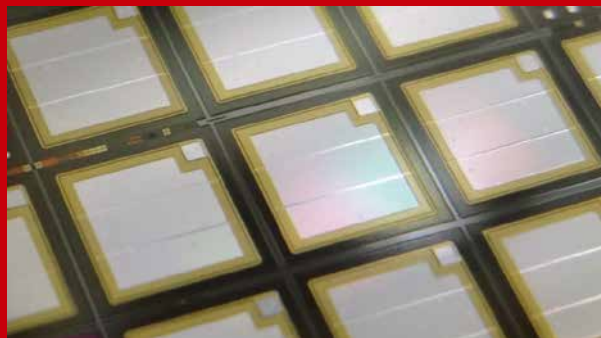


ABB 开发的 SiC 器件和封装 (LinPak) 主要针对大功率应用。

水平和最小的振荡。这是通过减少杂散电感和优化栅极驱动参数来实现的，因为它们可以影响开关期间串联器件的电压共享。

半导体器件的另一个关键特征是它们随时间的稳定性。这是通过标准资格测试来进行评估。SiC MOSFET 受到 MOS 单元处较高电场的影响，因此为了解决这个问题，这些器件的开发人员已经优化了工艺和材料制备的技术，以便确保栅极参数（例如阈值电压）的低偏移。另外一个问题是导通状态正向电压的变化。由于 SiC MOSFET p-i-n 二极管将在反向恢复切换和浪涌事件期间起作用，器件将涌入大量过剩载流子（双极模式），这可能导致产生导致正向压降偏移的堆积层错。

此外，还存在与 SiC MOSFET 阻塞行为的稳定性相关的主要问题。为了确保稳定性，需要通过良好的结终端 / 钝化设计，以及引入更好的封装来增加器件保护，这提供了针对恶劣环境条件（如高湿度和温度变化）的额外保护。

为了提高针对硅的成本竞争力，SiC 制造商利用了宽带隙性能并缩小了结终端区，从而可以最大化可用的有效面积。缺点是半导体材料外部的电场（例如钝化层和封装填充材料中）要比硅中的高。这里需要用来进行 SiC 器件保护的最佳芯片设计和封装材料。

进一步的考虑是防止由于宇宙射线引起的失效。这可能可以通过优化基区的厚度和掺杂水平来实现。得到正合适的程度是至关重要的，因为它会影响与导通电阻相关的传导损耗。

简而言之，尽管毫无疑问高压 SiC MOSFET 具有巨大的前景，能够相助提高节能效率，同时减少电力系统的重量、尺寸和成本，但现在仍然存在针对这些宽带隙晶体管的可靠性、经久耐用和故障处理能力的疑虑。☞

扩展阅读

- [1] B.J. Baliga, "Silicon Carbide Power Devices," World Scientific, 2005.
- [2] Y. Nakano et al. "690V, 1.00 mΩcm² 4H-SiC Double-Trench MOSFETs," Materials Science Forum, Vols. 717-720, pp. 1069-1072, 2012
- [3] M. Imaizumi et al. "Characteristics of 600, 1200, and 3300 V planar SiC-MOSFETs for energy conversion applications," IEEE Trans. Electron Devices 2015, 62, 390-395
- [4] J. W. Palmour, "Silicon carbide power device development for industrial markets," In Proc. of the 2014 IEEE IEDM, San Francisco, CA, USA, 15-17 December 2014.
- [5] P. Friedrichs "Silicon Carbide Power Devices - Status and Upcoming Challenges," in Proc. the 2007 EPE Conference, 2007, pp. 1-11.
- [6] S. Kicin et al. "A new concept of a high-current power module allowing paralleling of many SiC devices assembled exploiting conventional packaging technologies," in Proc. of 2016 ISPSD, pp. 467-470.

上接第22页

将会增加。这对于 OEM 有优点也有缺点，优点是会有更多选择，但必须面对产品规格之间的更大差异。当工程师设计和开发产品时，他们可能更喜欢观察单个光源的光谱，从而他们可以确定最佳的基准性能标准。但大规模生产商希望采用更系统的方法来确定杀菌输出功率。卷积或许是可能的——也就是 LED 输出根据杀菌能力进行归一化。

我们已经通过绘制作为波长函数的杀菌与总功率的比值来评估了多个制造商的 UVC LED 性能（参见图 5）。这里表明，当所有供应商的总二极管功率输出相同时，由于峰值波长的差异，杀菌能力仍然存在显著变化。例如，一个供应商的 285nm LED 可以与另一个供应商的 265 nm LED 具有相同的总功率，但只有 40%-50% 的杀菌效果。

还要注意的，由于二极管远离 DNA 的峰值吸收，因此杀菌效果会不一致（参见图 5）。这是重要的，因为它可能意味着满足安全饮用水的

Wavelength	Weighting for <i>B. subtilis</i>	Weighting for <i>E. coli</i>	Weighting for MS2
250 nm	0.62	0.80	0.58
253.7 nm	0.82	0.85	0.77
260 nm	0.98	0.95	0.98
265 nm	1.00	1.00	1.00
270 nm	0.99	0.90	0.88
275 nm	0.96	0.80	0.79
280 nm	0.91	0.60	0.67
285 nm	0.70	0.40	0.59

剂量要求和不能满足之间的差异，这会使活性病原体感染用户。

虽然复杂的微生物系统没有适合所有需求的单一方法，但是基于杀菌能力确定光源确实为简化提供了进步，允许工程师为可制造性创造出合理的设计。这些光源结合了更高的杀菌波长效率和紧凑的面积，并且可以将病原体减少超过 99.99%，从而证明在水消毒中有效。在未来几年里，毫无疑问，UVC LED 用于消毒将得到更多采用。☞

不对称结构加速 InP 基 HEMT

采用漏极侧凹槽增强晶体管的太赫兹性能

采用非对称栅极凹槽，富士通的研究人员已经在相对长的栅极长度上制备出创纪录的 HEMT 频率。

该团队的 InAlAs/InGaAs HEMT 具有 75nm 的栅长和扩展的漏极侧凹槽，最大振荡频率高达 1.3THz。

这种高速 HEMT 是多种毫米波和太赫兹应用的有吸引力候选者——包括无线电通信系统、成像器和射电天文学——因为它将低噪声特性与令人印象深刻的高频性能结合到了一起。

富士通团队发言人 Tsuyoshi Takahashi 表示，他们正在开发这些器件用于短距离千兆比特率的数据下载。这将涉及 300GHz 的传输。

Takahashi 和同事们使用了 75nm 的栅长来研究非对称 HEMT 的影响，因为该器件的重复性远高于 50nm 或更短栅长器件的重复性。

Takahashi 解释说：“长栅长对于防止顶部栅极剥离非常有效，从而实现栅极电极制造的高良品率。”

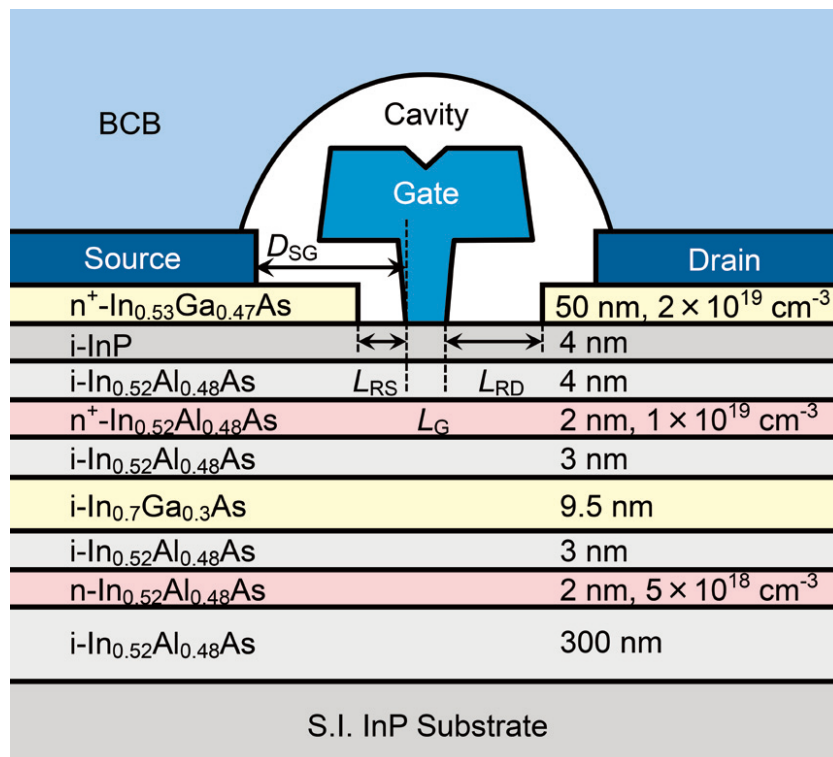
他指出，不对称凹槽的好处在 GaAs 基功率 FET 和 HEMT 中已经是众所周知的了，这种架构实现了增强的功率输出特性。由于不对称，击穿电压增加，而且射频特性也有所改善，这都源自栅漏电容的减小。

富士通器件的另一个特征是在其沟道层上方和下方的双面掺杂。这个降低了沟道区域内的内建电场，从而实现了漏极输出电容的减少和最大振荡频率的上升。

该团队制造出了他们的器件，其结构包括 3 英寸 InP 衬底上的 4nm 厚本征掺杂 InP 刻蚀停止层和 n 型 InGaAs 帽层(详见附图)。去除帽层的结构使得可以测量载流子密度和电子霍尔迁移率，测量值分别为 $2.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 和 $11,300 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。

电子束光刻定义了栅极凹槽和栅极区域。通过选择性湿蚀刻形成的栅极凹槽使得实现了非对称栅极，这是因为可以独立于源极侧凹槽长度来改变漏极侧凹槽。

为了钝化器件，研究人员转而使用化学气相沉积法在空腔上包覆 30nm 厚的 SiN 层，然后用苯并环丁烯 (BCB) 涂布晶体管的表面 (见图)。



富士通的InP HEMT在相应栅长LG下实现了最大振荡频率。结构不对称来自于漏极侧凹槽长度， L_{RD} 和源极侧凹槽长度 L_{RS} 的差异。源极和栅极之间的距离标注为 D_{SG} 。

对于 75nm 栅长和有 70nm 源极侧凹槽的 HEMT 的测量显示，当漏极侧凹槽从 70nm 延伸到 250nm 时，最大振荡频率从 462GHz 升高到 1.08THz。这个增加受益于最大截止频率的轻微下降，它从 378 GHz 下降到了 313 GHz。

为了提高最大振荡频率，Takahashi 和同事们将源极和漏极电极之间的距离从 $0.8 \mu\text{m}$ 减小到了 $0.3 \mu\text{m}$ ，并优化了偏置条件。采用 1.0V 的漏源电压和 0V 的栅源电压，根据 HEMT 单边增益的外推，最大振荡频率达到了 1.3THz。

该团队声称，1.3 THz 是 75nm 相对较长栅长 HEMT 的一个记录。他们认为对于 50nm 或者以下的栅长，1.5THz 是可能的。

Takahashi 及其同事们目前正在计划制造 300 GHz 以上频率下运行的集成电路。

参考文献

T. Takahashi et. al. Appl. Phys. Express 10 024102 (2017)

提升日盲探测器的增益

通过将双周期分布式布拉格反射镜与新颖的五层有源区域相结合，可以提供雪崩光电二极管卓越的性能

模拟表明，当分布式布拉格反射镜与单独的吸收区和倍增区串联工作时，日盲雪崩光电二极管（APD）的性能可以达到新的高度。

“我们的想法不仅提高了日盲光谱响应，而且还可以减少 APD 的雪崩击穿，”中国江南大学团队发言人 Guofeng Yang 说。低雪崩击穿是有利的，因为器件必须高于电压来工作。

该团队的探测器可在 284nm 处提供 0.184A/W 的光谱响应，并产生 65V 的击穿电压，可以用于导弹羽流感知，火焰探测，环境监测，化学和生物试剂检测以及保密的空对空通信。

据 Yang 所说，这些应用将创造了数十亿元的日盲探测器的国内民用市场。“军事市场远远大于民用市场，但无法评估其准确的价值。”

将分布式布拉格反射镜并入 APD 不是一个新的想法。已有反射镜是用来改善日盲性能的光学滤光器，而且当它们插入到蓝宝石衬底和 n 型层之间时，它们也作为缓冲层来改善 AlGaIn 的质量。

APD 中所使用的常规单周期分布式布拉格反射镜的一个显著缺点是它们的窄阻带。这不足以宽到用来限制日盲区的光谱响应。

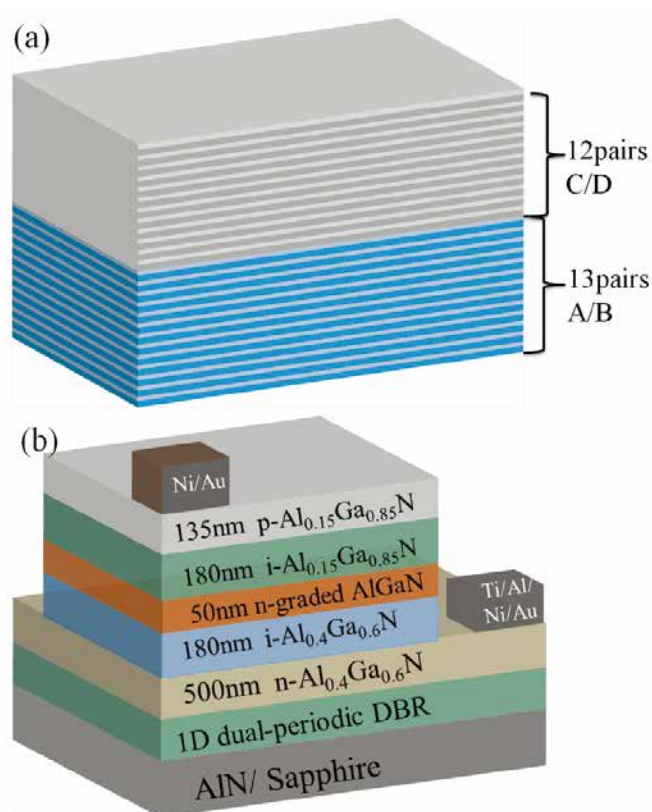
为了解决这个缺点，该团队正在构建一个新的架构，一个双周期布拉格反射镜。这是由 13 对 40.5nm 厚的 AlN 和 26.5nm 厚的 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ ，随后是 12 对 40.5nm 厚的 $\text{Al}_{0.64}\text{Ga}_{0.36}\text{N}$ 和 26.5nm 厚的 $\text{Al}_{0.77}\text{In}_{0.23}\text{N}$ 所形成的。这与更常规的设计可比，但是比通常的会产生更宽的阻带（参考结构具有由 25 对 AlN/ $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 形成的分布式布拉格反射镜）。

使用 COMSOL 软件，模拟表明，两个反射镜在跨度为 294nm 至 337nm 的大约 40nm 宽阻带上保持超过 90% 的反射率。这足以能够过滤日盲区以外的人射光。

单周期分布布拉格反射镜的缺点是其非常大的晶格失配。这导致裂纹、粗糙的界面以及阻带两侧非常剧烈波动的光谱。

Yang 和他的同事转而使用 Silvaco 的 Atlas 软件来评估其 APD 的光电性能，并判断其新型分布式布拉格反射镜及其创新的独立吸收和倍增区的优势。

模拟表明，采用单周期分布式布拉格反射镜的器件会有



APD性能的改进来自于使用双周期DBR和具有单独吸收和倍增部分的五层有源区。

反射率分布的剧烈波动从而损害探测。而采用双周期分布式布拉格反射镜的器件则并不会出现该特征，其 284nm 处的光谱响应率会高出 2.8%。

关键特性的进一步改善来自于对传统 APD 结构的替换——50nm 厚的 n 型电荷层，180nm 厚的倍增层和 135nm 厚的 p 型层，全部采用 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ ——其五层结构如图所示。雪崩击穿从 75.5 V 降低到 64.5 V，而在这些电压处的最大增益从 1.3×10^5 增加到 4.6×10^6 。

参考文献

C. Yao et. al. Appl. Phys. Express 10 034302 (2017)

溅射优异的 GaN

对于形成高导电性的 GaN 膜，脉冲溅射沉积胜过了现有的 MOCVD 生长技术。

来自日本的一个团队声称，由溅射形成的硅掺杂 GaN 在多个重要的电学和光学特性方面优于通过 MOCVD 生长的 GaN。

与通过 MOCVD 生长的 GaN 不同，通过溅射形成的 GaN 不含碳和氢，并且可以具有与透明导电氧化物（例如氧化铟锡）相当的电阻率。

来自东京大学以及日本科技厅分支 PRESTO 和 ACCEL 的团队表示，这使得硅掺杂的 GaN 成为了制造 GaN 基功率器件和生长 III-N 激光器和 LED 外延透明电极材料的非常有吸引力候选材料。

为了展示 PVD 生长的硅掺杂 GaN 薄膜的优点，研究人员在多种基板上沉积了 $1\mu\text{m}$ 厚的层。研究人员使用氮气和氩气氛中的脉冲磁控溅射源，形成了具有多种掺杂浓度的薄膜。在铁掺杂体 GaN 衬底上形成了硅浓度低于 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 的轻掺杂硅样品，这是通过 HVPE 制备并且通常具有 10^6cm^{-3} 的穿透位错密度。同时，硅浓度从高于 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 至 $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的层沉积在 MOCVD 制备的蓝宝石上掺铁 GaN 掺杂上。

为了确定样品的迁移率，该团队制作了 van der Pauw 结构。使用光刻和具有感应耦合等离子体的反应离子刻蚀，样品加工为四叶式结构。然后沉积 Ti/Al/Ti/Au 叠层作为欧姆接触。

室温霍尔效应测量表明随着硅掺杂浓度的降低，电子迁移率增加，达到 $1008\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，电子浓度为 $1.5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 。然而，即使电子浓度高达 $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ ，电子迁移率也有 $110\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。



脉冲溅射沉积产生具有与铟锡氧化物电阻率相当的 GaN 薄膜。

该小组在其文章中指出，以前没有通过 MOCVD 制造出这种高导电性硅掺杂 GaN 材料的报道。掺杂超过 $8 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 样品的测量显示，77K 和 300K 温度之间的电子浓度几乎没有变化。研究人员还发现，即使掺杂浓度高达 $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ ，几乎所有的硅原子都可以激活作为 GaN 中的 n 型掺杂。有人认为，这表明生长过程中不希望的 SiN 产生可忽略（如果有的话）。

当掺杂水平低于 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 时，样品表现出温度依赖的电子浓度。这种行为可以在电荷中性条件下作为非简并 n 型半导体进行很好地拟合。

反射高能电子衍射提供了对生长过程的认识。观察到明显的条纹图案，表明其二维生长模式。

这种生长模式的进一步证据来自于 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 样品面积的原子力显微镜测试。扫描显示了一个平台宽度大

约为 1 微米的原子级平坦台阶流结构。在这些台阶上，均方根表面粗糙度仅为 0.5nm。

作为温度函数的电子迁移率计算——考虑电子与杂质的相互作用，晶格缺陷以及晶格振动——表明这受到室温下光学声子散射的限制。然而，如果样品冷却至低于 200K，电离杂质散射将占主导地位。

这些研究结果表明，降低补偿受主的浓度可以增加脉冲溅射沉积形成 GaN 的电子迁移率。高质量的体 GaN 衬底提供了额外的提升，因为最高的低温迁移率来自位错密度仅为 $5 \times 10^5\text{cm}^{-2}$ 衬底上生长的样品。

参考文献

Y. Arakawa et. al. Appl. Phys. Lett. 110 042103 (2017)



Messe München
Connecting Global Competence

智在创新

点胶注胶

Soldering and dispensing

表面贴装

Surface-mount Technology

电子制造服务

PCB & EMS

技术应用竞赛

Technology application contest

自动化

Electronic manufacturing automation

产线操作演示

Demo production line

线束加工

Cables, Coils & Hybrids

材料设备

Production materials/ equipment

创新论坛

Innovation forum

官方微信



慕尼黑上海电子生产设备展

电子化工材料历届部分展商



参展联系：刘海珍 女士 电话：021-2020 5516 传真：021-2020 5699 E-mail: jenny.liu@mm-sh.com

International Trade Fair for
Electronics Development and Production.

2018年3月14-16日

上海新国际博览中心

productronicachina.com.cn



productronica China 2018

慕尼黑上海电子生产设备展

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	IFC
CS International Conference		www.cs-international.net/register	18-19
EDI CON China 2018	电子设计创新大会	www.mwjournallchina.com/edicon	IBC
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	9
IQE		www.iqep.com	3
PIC International Conference		www.picinternational.net/register	17
慕尼黑展览 2018		www.productronica.china.com.cn	31

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、封装技术, 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 (雅时国际商社)
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)
Sunnies Zhao (赵雪芹)
sunnies@actintl.com.hk

Sales Director (销售总监)
Mark Mak (麦协林)
markm@actintl.com.hk
Sales Director-Taiwan

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 (麦协林)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852-2838 6298

China (中国)

Shenzhen (深圳)
Jenny Li (李文娟)
jennyl@actintl.com.hk
Tel: 86-755-2598 8571

Shanghai (上海)
Hatter Yao (姚丽莹)
hatter@actintl.com.hk
Amber Li (李歆)
amberl@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
86-10-6748 4833

Wuhan (武汉)
Sky Chen (陈燕)
skyc@actintl.com.hk
Tel: 86-137 2373 9991
86-27-5923 3884/1564
Eva Liu (刘婷)
eval@actintl.com.hk
Tel: 86-138-8603 3073

Taiwan (台湾地区)
Rebecca Tsao (曹宇容)
rebecca@arco.com.tw
Tel: 886-2-23965128 x 203

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)
Robin Halder
robin.halder@angelbc.com
Tel: +44 (0)2476 718970

Shehzad Munshi
sm@angelbcl.co.uk
Tel: +44 (0)1923 690215
Jackie Cannon
jackie.cannon@angelbc.com
Tel: +44 (0) 1923 690205

EDI CON China
回到北京!



2018

Electronic Design **Innovation** Conference

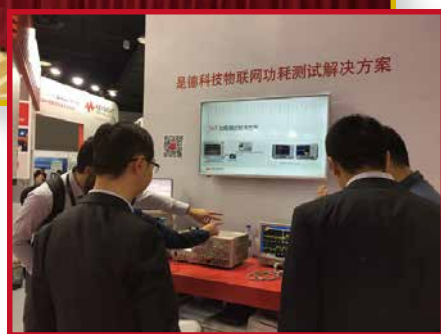
电子设计**创新**大会

立刻预定展位，迎接射频、微波和
高速数字设计领域的工程师们的拜访

3月20-22日

国家会议中心

北京



马上计划参展!

与工作在下列领域的专业人士深入交流:

- 射频和微波
- 信号完整性和功率完整性
- 高速数字设计
- 半导体
- 测试和测量设备
- 材料和封装
- EDA/CAD
- EMC/EMI

征文即将开始!

大会包括技术报告会、赞助商研习会、专家论坛、
短课程、张贴论文和全体会议。

立即签约选择理想的展位! www.mwjournalchina.com/edicon

首席赞助商:



钻石赞助商:



企业赞助商:



主办单位:



化合物半导体



·CHINA

《化合物半导体》中国版（CSC）于 2005 年创刊，是全球最重要和最权威的杂志 Compound Semiconductor 的“姐妹”杂志。

《化合物半导体》中国版旨在通过对于全球化合物半导体工业的深度分析、实时信息报道和评论，扩展中国地区读者的专业焦点和全球视野。《化合物半导体》中国版以简体中文按季度出版。编辑内容由 Compound Semiconductor 的专业记者提供，他们具有研究背景，其技术文章和专栏文章得到来自化合物半导体协会主要成员公司的认可。全球电子业领先的独立市场研究咨询机构 IHS IMS Research 也在杂志开设定期栏目。

除了 10,000 名经过审查认证的合格读者，我们亦会在各个地区重要业界活动中免费派发杂志，对于希望在中国市场加强影响的化合物半导体公司，《化合物半导体》中国版是最有效的平台和目标媒体。

免费索阅

