

化合物半导体



• CHINA

季刊 2018年 第4期

microLED用于
微型显示器



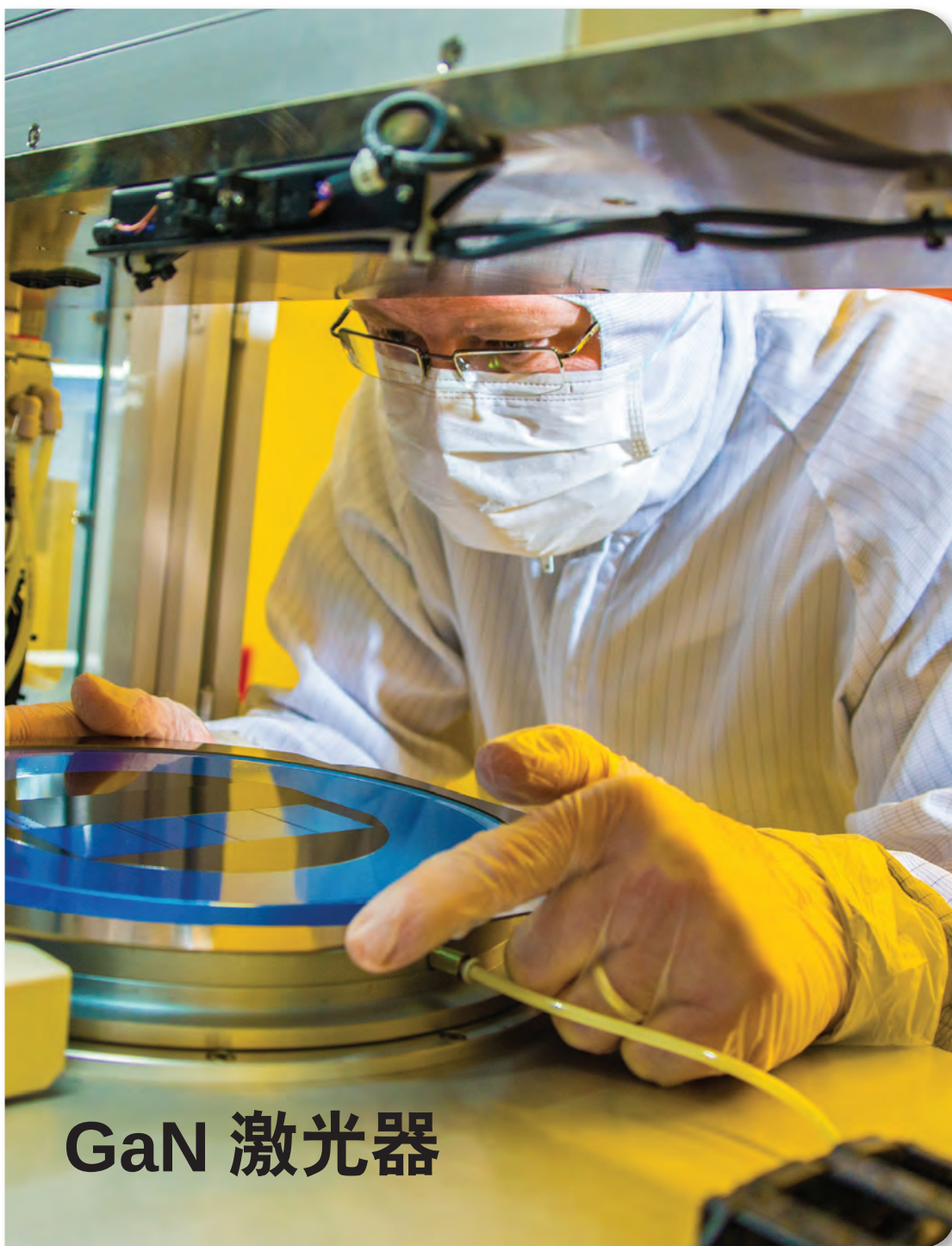
欧洲设备制造商股价
表现强劲



下一代重要材料
 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$



纳米线阵列互连



GaN 激光器



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

征 文



2019

Electronic Design **Innovation** Conference

电子设计**创新**大会

2019年4月1-3日

**国家会议中心
中国北京**

分享您的专长。帮助塑造
下一代设计技术。在
EDI CON CHINA发表
经同行评审的论文。

**EDI CON CHINA 已开始接收论文摘要，
主题如下：**

- 5G和区块链技术
- 5G/先进通信
- 毫米波技术
- 射频/微波放大器设计
- EMC/EMI
- 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.mwjjournalchina.com/edicon

首席赞助商：



钻石赞助商：



企业赞助商：



主办单位：



在线提交论文：

EDICONCHINA.com

截止日期：2019年1月10日

封面故事 Cover Story

16 GaN激光器有望进一步缩小原子钟 Shrinking atomic clocks with GaN lasers

在GaN激光器中刻蚀深的横向光栅，有望将这种光源用于原子钟。

蓝光播放器曾是GaN激光器商业化的早期驱动力。现在GaN激光器正在产生第二个杀手级应用：照明。GaN激光器已经用于高端汽车的前大灯，并且它们也是各种形式彩色投影仪中非常有前途的光源。

- Nick Bowden和Thomas Slight, CST GLOBAL公司

业界动态 Industry

04 从 LED 制造商到化合物晶圆代工厂 Sanan from LED maker to CS foundry

08 光子 IC 针对市场做好了准备 Photonics ICs prepped for market

10 Plessey 密切关注 microLED 发展机遇 Plessey eyes microLED opportunities

12 CS 股票价格的不同命运 Varying fortunes for CS shares

技术Technology

20 下一代重要材料 β -Ga₂O₃ β -Ga₂O₃ The next chapter

- Ross Miller, Fikadu Alema和Andrei Osinsky, AGNITRON TECHNOLOGY公司

28 构造氮化物纳米线阵列的互连 Constructing interconnects with nitride nanowire arrays

- Pallab Bhattacharya和Amab Hazari, 密歇根大学

03 编者话Editorial

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通过它的系列产品——包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动——为跨国公司与中国企业架起了拓展中国市场的桥梁。

ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站，以及各种技术会议，服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电、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/photronics, 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



扫一扫
免费下载电子书

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



碳化硅封装技术需要创新

随着越来越多的宽禁带半导体产品进入电动汽车市场，行业期待能够开发出快速的功率模块封装。

Yole Developpment 分析师 Hong Lin 在今年早些时候分析了宽禁带半导体进入电动和混合动力汽车市场将会如何推动了新型功率模块封装的发展。

“20 多家汽车公司已经在 DC-DC 转换器，主要的逆变器和车载充电器中使用碳化硅 (SiC) 肖特基势垒二极管或 MOSFET，预计 2017-2023 年间汽车燃料节约 CAGR 将为 29%。” Hong Lin 指出，“更重要的是，几乎所有的汽车制造商都有计划在短期内将 SiC 应用到主变频器里。然而，封装一直是宽禁带半导体器件应用的瓶颈，毫无疑问，好的功率器件还需要进行好的封装。”

SiC 功率器件的封装在很大程度上依赖于硅 MOSFET 和 IGBT 中使用的引线键合方法，主要是因为引线键合方法易于使用，并且生产成本低。

不过，尽管引线键合方法与硅器件的数十千赫的开关频率相匹配，但对于 SiC 系统来说，由于开关频率高至 MHz，会产生寄生电感，给引线键合应用带来了问题。

功率模块中的寄生电感在开关器件上引起高压过冲和振铃，从而增加了器件的开关损耗和模块的电磁干扰发射。

这是因为工作时 SiC 器件封装的温度过高达到 225℃ 引起的，因此，Wolfspeed，罗姆，英飞凌和 GeneSiC 这些先锋厂商都一直忙于开发新的封装结构，以更好地处理极端的开关速度和温度。因此也出现了一些创新封装设计，如用铜连接和银烧结接头代替铝丝连接和焊点。

“封装引起的噪声对器件性能有很大的影响，因此，研究人员一直致力于降低封装的电感，许多公司为此开发了不同类型的封装。” Lin 强调说。

意法半导体公司最近为特斯拉的 3 型全电动车开发的基于 SiC 的逆变器，就是这种创新的一个很好典范。该逆变器由 24 个功率模块组成，安装在一个定制设计的“鳍状”散热器上。每个模块包含两个采用新型贴片封装的 SiC MOSFET，直接连接到终端铜夹上。同时，利用铜基板提供散热。

特斯拉是一个例子，几乎所有 OEM 汽车制造商都在关注 SiC 技术，每家公司都将按照自己的计划采用 SiC。尽管如此，汽车制造商仍然不了解技术，他们热衷于实现成本效益高的可靠系统，并不关心它们是基于硅还是基于碳化硅。

“所有硅功率器件供应商都有碳化硅项目，并且也在考虑氮化镓项目。但是，我们可以说，尚没有一种专门用于化合物半导体系统的封装技术。” Lin 评论道。

“相对于新成立的公司，这些传统的硅功率器件制造商有很多优势。例如，他们非常了解封装技术，有广泛的应用和设计所需要的知识……当然，他们自身在市场增长能力方面也非常具有优势。”她补充说。

Yole Development 预测到 2023 年，整个功率模块市场将超过 55 亿美元。“该行业目前正处于一个新兴发展时期，许多公司提出了许多种不同类型的封装方案。” Lin 表示，“封装的类型还要取决于具体应用，我们预计在未来几年将会看到越来越多的客户设计交付给行业。”

赵雪芹

从 LED 制造商到化合物半导体晶圆代工厂

Sanan（三安集团）即将把业务范围从 LED 制造拓展到为电源、RF 和光学器件提供晶圆代工服务。Sanan Integrated Circuit (Sanan-IC) 公司负责北美地区销售和营销传播的总监 Raymond Biagan 讨论了他们此举的动机，以及目标和影响。



问：Sanan Optoelectronics（三安光电）是中国最大的 LED 芯片制造商，其在中国国内市场的占有率超过 50%。那么，开办这家于 2014 年启动运营的晶圆代工厂 Sanan Integrated Circuit 背后的动因是什么呢？

答：我们希望充分利用自身的领导地位，以及数年来在高生产量、大规模 GaAs 和 GaN（LED）外延片制造知识与专长方面积累的丰富经验。我们认为 RF、电力电子、光学器件和滤波器是与 LED 同等水平的高生产量产品。

我们从母公司 Sanan Optoelectronics 的 LED 芯片业务部门获得了大量的 MOCVD 反应器。藉此我们准备扩展和探索其他高生产量、高规格的横向市场，比如用于 5G 蜂窝通信、物联网 (IoT)、Wi-Fi、5G sub-6 GHz（低于 6 GHz 频段）、电力电子领域的 RF 器件（即数据中心和无线充电所使用的高电流、高电压 FET 和二极管），另外还有光学器件。光学

元器件包括光电二极管和垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。

问：贵公司提供的晶圆代工业务有哪些种类？

答：我们是一家化合物半导体晶圆代工业务的工艺技术平台供应商，而且我们对各种不同类型的合同制造和商业模式皆持开放态度，从外延片、制造、加工和 DC 芯片探查 (probe) 到主要的 RF 已知合格裸片测试业务均在其列。我们乐于接受任何此类合同制造子业务，包括委托外延片的加工。在 RF 领域，我们可承接 GaAs HBT、pHEMT、BiHEMT、集成型无源器件及 SAW/TC-SAW 滤波器。另外，我们还将提供 InP HBT。在电力电子学方面，我们拥有硅基 GaN 和碳化硅基碳化硅 (SiC-on-SiC)。对于光学元器件，我们提供用于光电二极管、VCSEL 和边缘发射激光二极管的 GaAs 和 InP。

问：你们的合作伙伴是大公司还是小型新创公司，抑或



是两者兼而有之？

答：这两者都是我们提供服务的对象。服务和专注于 RF、电力电子和光学器件领域中的高生产量应用是我们的目标和使命。因此，我们理所当然地联系、接触和寻找这些重点关注此类高生产量应用的无晶圆厂半导体公司和集成型器件制造商。不过，对服务于这类市场的即将出现和合并的新创公司，我们也是相当了解的。

问：贵公司有没有最小订单量要求？

答：对于大批量生产，我们的 6 英寸晶圆产品以每批次 18 片晶圆的形式提供。我们具有单批次最小订货量和批量倍数 (lot multiple) 要求。而对于研发工程设计，我们可以支持任何数量的小批量订购，直到客户的生产开始为止。

问：你们的海外业务量占多大比重？

答：我们在中国大陆地区启动了销售和进入市场策略，因为我们的晶圆厂和总部位于中国。但是从今年开始，我们的 GaAs pHEMT 与用于开关和低噪声放大器的绝缘体上硅 (SOI) 芯片展开了竞争，该产品领域的标准订货至交货时间多为 20 周。也许特别热门的批次能在最好的情况下能提供 14 ~ 16 周的订货至交货时间。

问：贵公司出售的是背面贴上胶带的整片和切割片。你们有没有可提供封装服务的合作伙伴？

答：我们没有具体的合作伙伴推荐给客户。从事封装和测试业务的大多数后端供应商都在中国国内，或者位于像马来西亚、台湾和韩国这样

图1. 位于中国福建省厦门市的 Sanan IC 工厂是中国首家 6 英寸化合物半导体晶圆代工厂。

的中国周边国家和地区。因此从逻辑上讲，把产品从我们的厦门晶圆厂装运至后端供应商的所在地，这是有帮助的。在封装和测试方面，我们确实有一个旨在支持铜柱的路线图。该路线图将于今年二季度推出，从而能够支持那些需要芯片规模封装型裸片的平台和晶圆。

问：贵公司的工程师能否在器件设计方面为客户提供专门知识？

答：我们公司内部不具备器件设计能力。严格地说，我们提供的是晶圆代工业务。器件设计更多是以产品为导向的。

我们的确外包了数目有限的“裸片器件” (bare-bones devices)，以为客户评估提供样片。例如，当我们收到客户对高输出功率的功率放大器所表达的兴趣时，发现他们希望了解的通常并不限于标准单元样片。他们想看一些供电单元样片（这里包含了高输出功率放大器），以查验功率处理和输出功率能力。所以，我们确实将开发工作进行了外包，以满足向客户提供供电单元样片的需要。

问：贵公司对最终产品进行哪些特性分析？

答：当我们装运裸片时，配有 DC 探查测试结果，而且我们量化了每片晶圆的良率。我们可以与终端客户一起分享和审查我们的测试限度和测试标准，这将与我们的最终测试数据相关联。

问：贵公司对每颗裸片都进行测试吗？

答：我们在给定的晶圆上制造 100% 的产品裸片，并进行 DC 芯片探查。如果芯片探查良率很高，则可降低测试百分比或跳过测试环节（比如：对 HBT 产品），以最大限度地缩短测试时间，从而降低成本。我们确实拥有裸片级的 RF 测试

能力，但是具备这种能力将产生一定的成本。

问：在失效分析方面你们具备哪些能力？

答：我们设有一个规模很大、设施齐全的失效分析实验室，这得益于从我们的母公司获得的技术诀窍和宝贵经验。我们的实验室配有多台设备，包括聚焦离子束；我们还支持透射和扫描电子显微镜。我们有一台抛光机、一台化学开封机 (decapsulation machine)、一台激光开封机和发射显微镜。

问：能否请您对贵公司 HBT 技术的优势略作介绍？

答：Sanan IC 提供了具有竞争力的 HBT 工艺技术，该技术采用干法蚀刻并具有 0.5 μm 的边缘平台 (ledge)，以实现高的功率增益（相比于具有 1.0 μm 湿法蚀刻边缘平台的传统工艺）。另外，我们还通过外延结构设计实现了兼具高线性功率和坚固 VSWR 的器件。

这些性能优势可用于诸如 Wi-Fi 11ac/ax 和 4G/5G sub-6 GHz 功率放大器等应用。而且，我们还在开发由 0.15/0.1 μm pHEMT 提供补充的 InP HBT，以适合未来的 5G 毫米波功率放大器应用。

问：贵公司面向功率器件的产品库是什么？

答：我们提供的是硅基 GaN 和 SiC 基 SiC 外延片。

对于硅基 GaN，我们提供了 650 V 功率 E-mode GaN FET，主要面向快速充电便携式充电器 / 适配器和电动汽车中的高功率密度和高效率 AC-DC 及 DC-DC 转换器，随后则是低电压版本 (200 V、100 V 和 60 V)，适用于更多以消费者为导向的 AC-DC 和负载点 DC-DC 电源，如无线充电和用于数据中心及基站的背板开关模式电源。目前正在开发的是具有两个特点的 E/D 模式 MISFET：650 V 和 1.2 kV。

在 SiC 方面，我们针对肖特基势垒二极管提供了不同的电压和电流额定规格。这些器件可与高功率硅 IGBT、硅超级结 MOSFET 或 SiC MOSFET 配合工作。肖特基势垒二极管具有 650V 和 1.2 kV 的特点。对于 650 V，它们的电流范围为 2 A 至 40 A。对于 1.2 kV，我们可提供 10 A 和 20 A 版本。同样，这些器件主要针对相似的应用，包括光伏 (PV) 逆变器、电动汽车充电、工业电机驱动器、功率因数校正，等等。

除了 SiC 肖特基势垒二极管之外，我们还有一个用于在明年支持 MOSFET 的路线图。我们着

图2. Sanan IC 晶圆制造工程师正在加工化合物半导体晶圆片。



眼的是 900 V 和 1.2 kV，以充实我们的高电压开关产品库。

问：能否介绍一下贵公司的光产品系列？在未来的几年里，该产品系列是否将会扩大？

答：目前，对于光学器件我们有一款混合型产品。我们有一家传统的晶圆代工厂，但同时我们的光学器件分部提供诸如光电二极管、边缘发射激光二极管和 VCSEL 等光学器件。

对于更先进的产品，我们计划将来还要提供电调制激光器和可调谐激光器。至于 VCSEL，将是其他的特点——不仅针对那些需要感测功能的消费者，而且还面向工业应用。另外，我们还制定了针对医疗和工业 [应用] 的高功率激光器开发计划。我们进一步扩充产品库的途径是通过与大学和光学行业开展合作致力于实现技术突破和创新，在此过程中我们将拥有战略行动计划和联盟。

问：在今年剩下的时间里及以后，晶圆代工厂的发展目标是什么？

答：在今年剩下的时间里，我们的目标是扩大中国以外地区的客户接洽范围，让我们的产品进入亚太、北美和欧洲地区。在过去的几个月里



图3. Sanan IC公司总部拥有中国首家6英寸GaAs晶圆制造厂。

我们已经开始这么做了。

我们的目标和愿景是支持高速成长的市场，比如 5G、蜂窝通信、IoT、数据中心和电动汽车。我们将继续跟踪这些市场，并针对它们的技术要求和容量要求做出反应。

随着我们的产能提升，对我们来说同样重要的是获得全球市场的认可和接受。这意味着必需拥有优质的工艺技术；良好、稳定的高生产能力；高水平的质量控制和可靠性。☞

格芯推出业界首个 300mm 硅锗晶圆工艺技术，以满足不断增长的数据中心和高速无线应用需求

格芯近日宣布其先进的硅锗 (SiGe) 产品 9HP 目前可用于其 300mm 晶圆制造平台的原型设计。这表明 300mm 生产线将形成规模优势，进而促进数据中心和高速有线 / 无线应用的强劲增长。借助格芯的 300mm 专业生产技术，客户可以充分提高光纤网络、5G 毫米波无线通信和汽车雷达等高速应用产品的生产效率和再现性能。

格芯是高性能硅锗解决方案的行业领导者，在佛蒙特州伯灵顿工厂用 200mm 生产线进行生产。将 9HP (一种 90nm 硅锗工艺) 迁移至纽约州东非什基尔的格芯 Fab 10 工厂实现 300mm 晶圆生产技术，将会保持这一行业领先地位，并奠定 300mm 晶圆工艺基础，有助于进一步发展产品线，确保工艺性能持续增强和微缩。

“高带宽通信系统日益复杂，性能需求也随之水涨船高，这些都需要更高性能的芯片解决方案，”格芯的 RF 业务部副总裁 Christine Dunbar 表示，“格芯的 9HP 旨在提供出色

的性能，其 300mm 生产工艺将能够满足客户的高速有线和无线组件需求，助力未来的数据通信发展。”

格芯的 9HP 延续了成熟的高性能硅锗 BiCMOS 技术的优势，支持微波和毫米波频率应用高数据速率的大幅增长，适用于下一代无线网络和通信基础设施，如 TB 级光纤网络、5G 毫米波和卫星通信 (SATCOM) 以及仪器仪表和防御系统。该技术提供出色的低电流 / 高频率性能，改善了异质结双极晶体管 (HBT) 性能，与之前的硅锗 8XP 和 8HP 相比，最大振荡频率 (Fmax) 提高了 35%，达到 370GHz。

在纽约东非什基尔的 Fab 10 工厂，正在进行基于多项目晶圆 (MPW) 的 9HP 300mm 工艺客户原型设计，预计 2019 年第二季度将提供合格的工艺和设计套件。

如需了解更多有关格芯硅锗解决方案的信息，请联系您的格芯销售代表或访问 globalfoundries.com/cn。

光子 IC 针对市场做好了准备

Intengent, GCS 和 VLC Photonics 三家公司已经联合起来，意在提供一个用于晶圆制造的 InP PIC 平台。Rebecca Pool 在这里介绍了解到的更多的相关情况。

2018 年早些时候，加拿大 III - V 族半导体材料光子学咨询公司 Intengent 与美国化合物半导体晶圆制造代工厂 Global Communication Semiconductors，以及来自西班牙的光子 IC 设计公司 VLC Photonics 进行了联合，旨在将磷化铟 (InP) 光子集成电路 (PIC) 开发推进到商业生产阶段。

这几家合作伙伴将共同提供 InP PIC 晶圆制造平台，面向定制 InP PIC 生产的无晶圆厂。Intengent 公司首席执行官 Valery Tolstikhin 确信：新的合作团队拥有提供适合工业级晶圆制造的通用 InP PIC 平台所需的资源和能力。

正如 Tolstikhin 指出的那样，GCS 是世界上规模最大的 III - V 族半导体材料商业代工厂之一，它大批量地生产面向 RF 电子和光电子产品市场的 InP 以及 GaAs 和 GaN 晶圆。同时，Tolstikhin 本人开创了一种无再生光子集成平台，

即“锥度辅助垂直整合”(Taper Assisted Vertical Integration)，其基于 GCS 用于设计和开发 InP PIC 的完善光电子工艺。

考虑到 VLC Photonics 所拥有的设计库和工艺设计套件专长（这些已经应用到了其他的商业 PIC 平台上，并能够减少 PIC 设计工作量和风险），Tolstikhin 的信心满满就变得可以理解了。

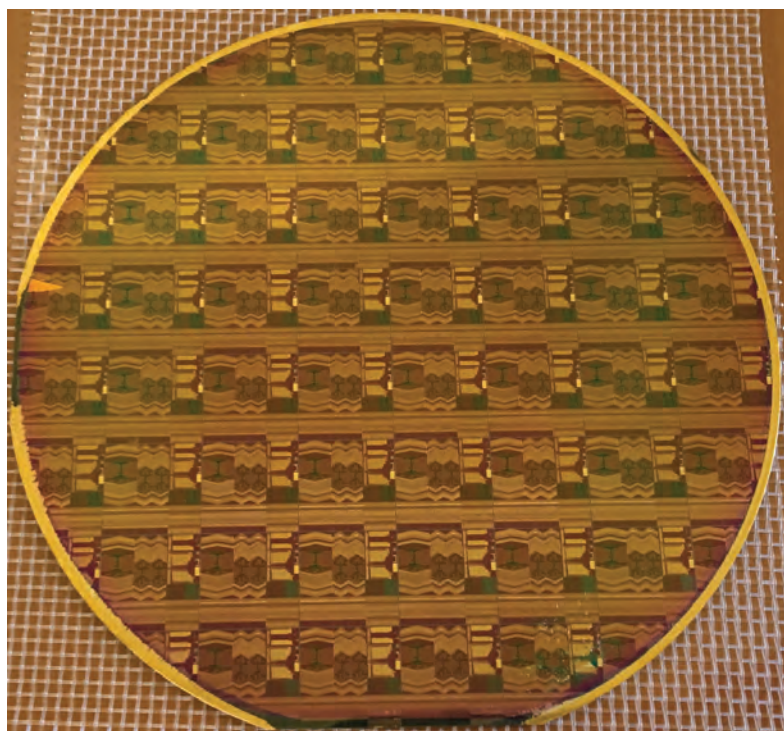
Tolstikhin 强调指出：“一般情况下，业内人士对于他们想要服务的应用是有所了解的，但是常常并不知道这些应用需要什么样的器件。因此，我们可以把与应用匹配的 PIC 概念化，并通过常规的设计 - 制造 - 验证周期来开发该 PIC，这就是我们作为一家联合体所做的工作。”

他补充说：“Intengent 负责提供整合平台和基础外延设计，VLC 带来的是 PIC 设计和特性分析方面的丰富经验，而 GCS 则很可能是 III - V 族半导体材料光子学领域中规模最大的商业代工厂。我目睹了光学器件在 GCS 总产量中所占比例从 5% 增至超过 50% 的过程；这是一个巨大的变化，而且很长时间以来，我一直希望自己成为这种 [面向 InP PIC 的一站式开发和生产服务商] 中的一员。”

初期

在过去的 20 年里，Tolstikhin 创办了几家基于 PIC 的企业，并开创了基于不同垂直整合工艺版本的各种光子集成平台。

Tolstikhin 首度涉足 PIC 是在 2000 年，当时他加盟了 MetroPhotonics，这是一家从加拿大国家研究院抽资剥离的分立公司，其组建的目的是实现面向 InP 的波分复用 (WDM) 技术的商业化。他在这家公司里一直领导 PIC 的设计工作，直到此公司于 2005 年倒闭为止。在这期间，他开发了一种被称为“单模垂直整合”的牢靠、无再生有源光子器件集成技术，该技术获得了专利授权。



定制 PIC 的 4 英寸 InP 晶圆。（图片提供：GCS-Intengent-VLC 联合体）

在 MetroPhotonics 公司开发了许多基于 InP 的 WDM 组件之后，他接着创办了 OneChip Photonics 公司，此举着眼于采用自己的无再生 PIC 技术来开发具有成本效益的 InP PIC。

OneChip 的商业模式基于无晶圆制造，Tolstikhin 始终将其尊奉为适合低容量市场。在他掌管 OneChip 的时间里，Tolstikhin 对自己的垂直整合工艺进行了“精雕细琢”，一举开创了“多导垂直整合” (Multi-Guide Vertical Integration) 工艺技术。

这里，通过垂直地堆叠用于（比如：激光器和检测器）的必要材料，该技术使得 OneChip 公司能够在单个外延生长工序中以单片的形式将有源和无源器件集成在同一个衬底上。

Tolstikhin 强调说：“我单独设计了用于 OneChip 所开发或尝试过的每款 PIC 产品的每一种外延结构，这在无再生 PIC 生产中是一个绝对重要的步骤。”

接着，OneChip 开发面向 100G 数据中心市场应用、基于 PIC 的光互连，并就晶圆加工和外延生长与 GCS 和 IQE 结成了合作伙伴关系，不过，OneChip 于 2014 年关闭，而在此之前 Tolstikhin 已经与他人共同创办了 ArtIC Photonics，这是一家 InP PIC 的无晶圆厂开发企业，产品面向电信和数据通信市场。

ArtIC 如今依然存在，它设计用于光学组件产品的 PIC 芯片，但是，Tolstikhin 在 2015 年创办了从事 InP PIC 设计和开发的 Intengent 公司，这次基于的是锥度辅助垂直整合 (TAVI) 工艺。

构件

TAVI 库包括许多构件，从有源器件侧的激光器、放大器、到检测器，以及无源器件侧的功分器 / 组合器、滤波器和波导电路的各种元件均在其列。所有这些构件的共同之处是在垂直堆叠且功能不同的导光层之间的侧向锥度辅助绝热转换。

也许最通用的构件（它从这个角度展现了 TAVI 平台的过人之处）是模斑转换器，该转换器可实现导光从 PIC 波导至光纤的转换。这是通过以一种特别设计的多层外延结构构建侧向锥度来确定的。实际上，如 Tolstikhin 指出的那样：“Intengent 现在已经与一家商业代工厂就包括多达 90 层的专业化晶圆设计的外延生长开展了合作。”

他补充说：“允许光信号从一个垂直层移动

到另一个垂直层是非常重要的……侧向锥形允许垂直地连接所有的波导。该方法非常灵活，这是件大事，我们将会看到可靠性的大幅提升。”

眼下，Intengent 主要是与 GCS 就 4 英寸晶圆尺寸进行合作，不过打算尽快地过渡到 6 英寸晶圆。

Tolstikhin 说：“我很乐意使用 6 英寸、甚至 8 英寸晶圆，但是这并非唾手可得。从成本的角度来看，晶圆的尺寸确实很重要，因为可以制作的器件数量会因晶圆尺寸的不同而差异巨大；这一点不像激光器开发，这些的确都是大型芯片。”

他补充道：“我无法说出具体日期，但是 6 英寸晶圆制造即将到来。”

至关重要，需求也是如此。据 Tolstikhin 称，他正在考虑扩大公司的规模，以应对各种不同的细分市场（从电信和数据通信到微波光子和量子通信）对于 InP PIC 不断增长的需求。

目前，这位首席执行官还发现了来自那些需要进行 III - V 族半导体材料集成的硅光子企业的兴趣。他说：“[设计] 现在所需的是无法利用现售成品通过大部件装配形式来提供的精细复杂光源。这是一条在几年前还不太明显的途径。”

随着需求的不断攀升，Tolstikhin 期待看到被他描述为面向 III - V 族半导体材料光子器件无晶圆厂开发的“真正商业基础设施”。他希望此类基础设施在未来的 5 年之内将会部署就位，而且重要的是，他预计这能够在合理的预算范围内提供全面的定制化水平。

他断言：“随着硅光子学的发展，业内的许多厂商现在懂得了对无晶圆厂开发的需求，而且明白了建设整个基础设施仅为制造一种器件是毫无意义的。我们正试图利用好这一点，并提供这些人希望获得的服务。” 

Tolstikhin 希望看到，面向 III-V 族半导体材料光子器件的无晶圆厂开发的“真正商业基础设施”在 5 年之内部署到位。（照片提供：Intengent 公司）



Plessey 密切关注 microLED 发展机遇

随着 Apple 和 Sony 公司转向使用 microLED 来提供下一代显示器，Plessey 公司做好了凭借其硅基 GaN 技术赢得市场份额的准备。

——Rebecca Pool 报道

市场研究公司 YOLE DÉVELOPPEMENT 预计：到 2025 年，基于 microLED 的显示器的出货量将超过 3 亿台，这将使得如今相对微不足道的销量黯然失色。与此同时，研究机构 Research and Markets 给出的复合年增长率为 53.2%，全球市场规模到 2025 年将达 198.9 亿美元。

一家决意抢夺市场份额的公司是 Plessey。迄今，这家英国的 LED 制造商供应硅基 GaN LED 有好几年了，他们已经成功地在硅（而不是蓝宝石）衬底上实现了结构生长。

硅衬底凭借其较高的热导率实现了可采用较小散热器和小型样式的器件。考虑到在折旧的 CMOS 生产线上使用相对便宜的大尺寸硅晶圆的诱人前景，Plessey 取得的进展是很快。

该公司于 2010 年在其普利茅斯工厂启动了 LED 生产，并在 2013 年推出了业界首款商用型 6 英寸硅基 GaN LED。随后，又于 2016 年推出了单芯片、高功率封装 LED 和园艺照明设备。

如今，考虑到新的市场增长，Plessey 透露了其在 2018 年内推出业界首个单片式 microLED 显示器的意图。该公司的 microLED 阵列包括小至 1 微米的高效发光体，可在 1W 功耗条件下提供约 100,000 尼特 (nit) 的亮度，而提供与电视相当的亮度则仅需 5 mW 的功率。至关重要的是，使用此类

阵列能够克服困扰 microLED 显示器无法赢得最大市场份额的复杂制造难题。

现今的 microLED 显示器是在一块 CMOS 背板上进行组装的，一次一个子像素。一台 4K 电视（译注：分辨率为 3840*2160 的超高清电视）具有大约 2500 万个子像素，这在某种程度上解释了为什么大多数 microLED 显示器的应用局限在智能手表和智能手机上。

但是，如 Plessey 的市场总监 Myles Blake 指出的那样，Plessey 硅基 GaN microLED 可以大规模地一批转移到 CMOS 背板上，从而免除了“拾取与放置”风险，并提供了一种成本较低、良率较高的制造工艺。

Blake 着重指出：“显示器尺寸完全受限于硅片尺寸，而我们将生产的是自己特有的可扩展至任何希望尺寸的背板。这使得我们能够快速完成定制开发，只需短短数周的时间就能开发一款定制背板。”

他补充说：“另外，由于 [拾取与放置] 输送装置能力的原因，目前 [发光体] 的尺寸被限制在大约 50 微米像素间距……但是，我们已经证实像素的生产可至 1 微米，而且从理论上说，我们能够把像素尺寸减小至亚微米。”

Blake 尚未透露显示器良率的具体数字，但是已经宣布 Plessey 有意将其硅基 GaN 技术的使用许可授予 microLED 制

造商。另外，该公司还与英国的光学薄膜涂料供应商 Artemis Optical 公司展开了合作，旨在开发据说比目前的同类产品更小、更便宜的高亮度、低功耗平视显示器 (head-up display)。

他说：“我们的确必需让自己跻身 microLED 市场，并尽快地在整个供应链上建立起合作伙伴关系。”

实际上，复杂而冗长的 microLED 显示器供应链是相当分散的，这并不是什么秘密，原因是想把 LED 生



随着 Apple、Sony、Foxconn 和其他诸多公司敞开怀抱欣然接受 microLED，用以提供超高分辨率、高亮度和低功耗的显示器，业界分析人士预计该市场将呈爆炸性增长态势。

产、显示器制造和装配结合在一起不是件容易的事。可是，如 Blake 指出的那样：“我们已经和很多显示器制造商进行了交流，做这事是永远不会嫌早的。制造产业链现在逐渐聚集起来了。”

那么，Plessey 接下来的目标是什么呢？眼下，其制造 microLED 显示器采用的是 6 英寸晶圆，看起来在可预见的未来 Plessey 将保持该晶圆尺寸。

Blake 说：“我们已经使用自己现有的 MOCVD 反应器堆栈证实了在 8 英寸晶圆上制作硅基 GaN 的能力，但是除了外延之外，我们尚不具备用于操作该晶圆尺寸的全套设备。而且，我们尚未启动基于 12 英寸晶圆的生产。”

今年早些时候，Plessey 还因其计划转向知识产权许可模式（而不是逐渐扩大英国的产量）而成为新闻头条。当时，Plessey 公司首席招行官 Michael LeGoff 引用的观点是缺乏投资基金，而按照 Blake 的说法，该公司将“乐于扩大生产规模”，但又补充道：“由于投资欲望止步不前，因此这种情况几乎肯定不会在英国出现。”

据 Blake 称，Plessey 的普利茅斯工厂现有两个反应器以及相关的加工设备，并有可能最终容纳 14 个反应器。鉴于每个反应器每周能够批量生产约 200 万颗 1 mm^2 裸片，因此潜在的产出增长率是不可忽略的。



Plessey 希望逐渐增加英国的产量，但是按照市场总监 Myles Blake 的说法，这是不太可能的，“因为投资欲望停滞不前了”。

Blake 说：“我们将使用、并且在现有设备的范围之内扩充该制造能力。这将用于研发，并可满足某种制造量要求……但是，这与 [好几十亿美元的] microLED 市场预期规模相比就是小巫见大巫了。”显然，这位市场总监对于 microLED 抱有很高的期望。如他所断言的那样：“我认为，在接下来的几年里，增强现实和虚拟现实技术将在人们的极度追捧之下大行其道，而 microLED 将为满足预期的需求高峰提供牢固的基础。”

3D辨识和手势识别 最佳镀膜方案



www.evatecnet.com/products/clusterline-platforms/clusterline-rad



瑞士EVATEC精密溅射镀膜设备CLUSTERLINE RAD® 生产符合成本效益的干涉滤光片，用于3D和手势识别传感器

- 全自动化上下片系统-支援8英寸的玻璃片并包括自动双面镀膜的翻转系统
- 业界最好的均匀性和最低微粒-使用最新的旋转靶技术并且不需修正档片
- 最佳光学薄膜叠层精度和可重复性的原位光学监测

要了解更多信息请联系我们的总部info@evatecnet.com或联系你的区域销售和服务办公室Evatec China Ltd., Tel: +86 21 8019 7660, 邮箱: infochina@evatecnet.com

ADVANCED PACKAGING • SEMICONDUCTOR • OPTOELECTRONICS • PHOTONICS • THE THIN FILM POWERHOUSE
www.evatecnet.com

CS 股票价格的不同命运

欧洲的晶体生长设备制造商荣登今年股价排行榜榜首

对于化合物半导体行业的投资者来说，这 12 个月的收益并不太好。在该领域中，股价下跌的可能性略高于上涨的可能性。不过，精明的投资者（确实也可以说是幸运的投资者）仍然能够凭借在该行业中所持有的股票获得丰厚的回报。关键在于不仅要确定哪种类型的公司股价涨幅最大，而且还要挑选赢家。

对于投资者来说，过去 12 个月里投资回报最好的公司是两家设备制造商：Aixtron 和 Riber。这两家公司的股价涨幅分别稍高于 150% 和 100%。然而，他们的竞争对手、位于大洋彼岸的美国 Veeco 公司则没有享受到与此相似的成功。不过，虽然 Veeco 在过去的几年中已经取代 Aixtron 成为 MOCVD 设备的领先供应商，但是在过去 12 个月里其表现平庸股价跌幅超过 50%。

股价的下跌导致 Veeco 在今年的「化合物半导体股价排行榜」上“不幸垫底”。

Aixtron 扭亏为盈

Aixtron 股价在过去 12 个月的大幅上涨反映了该公司的转型。回到 2017 年年初，当时德国这家晶体生长设备制造商运营亏损，但是现在它实现了盈利，订单量增加，而且未来的前景大为改观。

该公司总裁 Bernard Schulte 在 4 月 26 日向投资者发表讲话，讨论了于今年 3 月 31 日截止的 2018 财年第一季度业绩结果，他说今年是自 2011 年以来 Aixtron 获得的最

佳开局。

Schulte 补充道：“我们的业务发展势头良好，我们的所有产品均赢得了客户的强烈兴趣，不过其中特别受到关注的是用于激光器生产的所有制造解决方案，比如面向 3D 感应和光数据通信应用的垂直腔面发射激光器。”

Aixtron 的业务将继续超过自己的预期。今年第一季度的订单金额达到 7900 万欧元，比去年同期高出 27%，而较之前一个季度则增长了 20%。

令人鼓舞的是，订单量与毛利率实现了同步增长。在最近的这个季度里，增长率达到了 43%，环比增长 4%，而同比增长则为 18%。

高的毛利率将帮助该公司实现盈利。以息税前收益来判断，上一个季度的净赚金额接近 800 万欧元，而净利润略高于 1200 万欧元。Schulte 将 Aixtron 取得的成功归结为几个因素，包括健全的产品线和一种富有弹性、具成本效益的灵活商业模式，该商业模式使得这家晶体生长设备制造商能够从当今强劲的市场行情中获益。

“我们已经成功地完成了技术组合的重新定位，目前在专业 LED、激光器和电力电子元件等增长领域中拥有了持久且重点突出的产品组合。”

当一家公司的订单量增加时，就会有人怀疑这家公司是否还能处理额外的工作。对于 Aixtron 来说，这应该不是问题。

在最新召开的盈收电话会议上，公司总裁 Felix Grawert 认为：“我们的制造模式非常有能力消化这种订

单量的上升。”据他所说，晶体生长设备制造受助于由 Aixtron 的供应商提供的预装配。这使得 Aixtron 的工程师们能够专注于生产计划、车间装配工作的编排、以及装配完工工具的测试。

不断增加的订单量将对服务团队形成压力。为解决这个问题，我们的目标不是招募员工，而是通过减少每个晶体生长设备的安装时间来提高效率。

Aixtron 的前景是非常乐观的。今年 2 月，该公司透露其本年度的销售额应在 2.3 亿欧元到 2.6 亿欧元之间，而息税前收益额应在销售额的 5% 至 10% 之间。由于近期的业务走势好于预期，因此该公司现在预计 2018 年的相关业绩数字将接近其早期指导额的最高值。

Riber 的反弹

作为法国的 MBE 工具和蒸发源制造商，Riber 公司财务状况的波动起伏与 Aixtron 非常相似。Riber 股价的几乎翻倍，对此起到帮助作用的是盈利能力的恢复、毛利率的大幅增加、以及订单量的扶摇直上。

对于这家法国公司而言，光伏和光掩膜行业用蒸发器的急剧增长推动了其销售额的增加。尽管在 2016 和 2017 财年之间 MBE 系统的销售收入从 880 万欧元降至 720 万欧元，但是在这同一时间段内，该公司的销售额却从 1650 万欧元直线上升至 3060 万欧元，这主要得益于其蒸发器销售收入从 300 万欧元飙升至 1620 万欧元。

今年 4 月 26 日，Riber 公布了其 2018 财年第一季度（截止于 3 月 31 日）的业绩结果。销售额比 2017 财年的第四季度下降了 200 万欧元，但是据该公司称，这不该是个问题，因为它反映出今年前两个季度针对光伏和光掩膜行业的蒸发器交付量是惊人的。

令人鼓舞的是 Riber 的订单量。今年 3 月 31 日，其订

单金额为 3610 万欧元，比一年前高出了 112%。这包含了 13 个 MBE 系统的订单，其中的 9 个是生产机器。

Cree 的利好逆转

在「化合物半导体股价排行榜」上位列第三的是 Cree 公司。其股价在过去的 12 个月里稳步上涨，股票增值接近 70%。

Cree 公司目前的发展方向与其仅在一年前制定的计划截然不同。当时，它很接近将其 SiC 电子业务部门 Wolfspeed 出售给 Infineon 公司。这笔交易受阻，Cree 随后收购了 Infineon 的 RF 业务，此举将有助于该公司将自身定位为一家所关注的领域并不仅限于照明的公司。

Cree 公司 CEO Greg Lowe 在 4 月 24 日召开的旨在讨论 2017 财年第三季度收益状况的盈收电话会议上说：“Wolfspeed 是我们目前规模最小而盈利最多的业务部门，将在公司长期计划的时间段内成为我们最大和最赚钱的业务部门，到 2022 年其销售收入将大致翻两番。”

近来，照明产品分部的业绩一直很糟糕，以至于被认为是受到了过高的估计。这导致在最近一季里产生了 2.475 亿美元的商誉摊销费用。在这三个月中，销售额降至 1.31 亿美元（降幅达 10%），而毛利率仅为 19%。

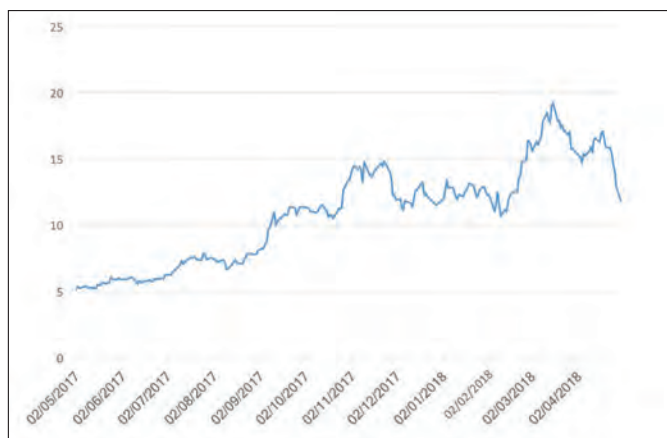
对于净赚 4300 万美元的照明产品而言，毛利率略高（稍高于 26%）。但是，这仍然远低于 Wolfspeed 业务部。后者的产品毛利率为 48%，而销售收入为 8300 万美元，年基增长率达 46%。

为了保持这种惊人的销售增长速度，该公司正在努力实现功率器件生产能力的倍增（相比于其在 2017 财年末的水平）。

在最近召开的盈收电话会议上，该公司 CFO Mike McDevitt 解释说：“随着这种新产能的提升，我们预计可在

排名	公司	股票代码	股票价值, 2017年4月28日(美元)	股票价值, 2018年4月27日(美元)	升值(%)	排名变化
1	Aixtron (Frankfurt)	AIX	6.13*	15.59*	154.5	+12
2	Riber (Paris)	RIB	2.106*	4.39*	108.5	+2
3	Cree	CREE	21.99	37.33	69.8	+12
4	IPG Photonics	IPGP	126.32	213.21	68.8	+6
5	IQE (London)	IQE	86.10*	142.7*	65.8	-4
6	Lumentum	LITE	42.75	50.95	19.2	-1
7	NASDAQ composite	IXIC	6047.61	7136.88	18.0	+5
8	Infinera	INFN	9.92	11.70	17.9	+8
9	Qorvo	QRVO	68.03	67.32	-1.0	-1
10	Oclaro	OCLR	8.01	7.79	-2.7	-4
11	Rubicon	RBCN	7.50	6.87	-8.4	+3
12	AXT	AXTI	6.75	5.98	-11.5	-10
13	Skyworks	SWKS	99.74	87.32	-12.5	-4
14	Finisar	FNSR	22.84	15.50	-32.1	-3
15	Emcore	EMKR	9.00	4.60	-48.9	-8
16	Veeco	VECO	33.00	15.80	-52.1	-13

*采用4月28日公布的汇率(1欧元=1.2131美元和1英镑=1.3776美元)转换成了美元



Aixtron 的股价在过去的 12 个月里稳步爬升。

初始生产良率和工厂开工率方面拥有某种可变性。”

因此，要想实现更高的毛利率和盈利能力，历经的道路将是坎坷不平的，但是 Cree 正朝着正确的方向迈进。

Veeco 的不景气

Veeco 近期的发展历程与 Aixtron 没有什么不同。销售收入不断攀升，而且毛利率水平日益向好，但是对于 Veeco 而言，实现盈利仍需稍待时日。

这家公司的领导者们无疑对其未来持乐观态度。在 2 月 12 日为讨论 2017 财年第四季度业绩结果召开的最新盈收电话会议上，John Peeler 表示：“对 Veeco 来说，2017 年真正是具有变革意义的一年。”

“我们完成了对 Ultratech 的收购，从而为我们提供了一种更加多样化的收入来源，资源整合进展顺利，由此产生的协同效应超出了我们最初的预期。”

另一个重大的变化是新泽西州制造工厂的合并，据说此举每年将产生良好的成本节省效果。

“最后要说的是，我们实现了接近 41% 的非 GAAP 毛利

率，可观的订单量展现了我们在所服务之市场上的领先地位，并使我们对具备提升利润增长速度的能力拥有了信心。”

Veeco 在 MOCVD 市场上居主导地位，据 IHS 提供的信息，该公司在用于制造 GaN LED 的晶体生长设备市场上所占的份额达到了 55%。由于产能过剩，销售额几年前有所下降，但前景还是很不错的。

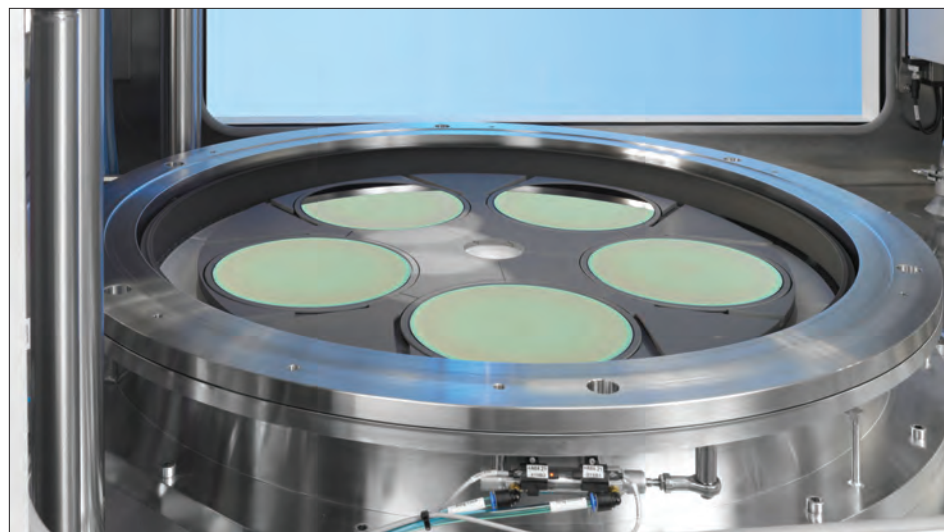
在今年 2 月召开的盈收电话会议期间，Peeler 说：在中国，主要 GaN LED 芯片制造晶圆厂的开工率在 80% 以上（更接近于 90%），而“二级”晶圆厂的开工率则在 70% 以上（更接近 80%）。“中国台湾地区晶圆厂的开工率在 80% 到 90% 之间。韩国则可能在 80% 以上（接近 80% 或略低）。”

这些开工率是很高的，表明芯片制造商接近全产能运行状态，并且即将购买 MOCVD 设备。

Peeler 说：“我们预计市场将迎来强劲增长的一年。我想，2017 年我们销售了大约 400 多个反应器。我们认为市场需求量的增长将超过这个数字，甚至有可能在 2018 年就明显高于这个数字。”

面向该市场的是去年 9 月推出的 EPIK 868。Peeler 说：“我们已经向中国客户装运了（针对该工具的）几份大的订单，由于我们的平台实现了更高的生产率和较低的拥有成本，因此来自客户的反馈意见一直非常好。”

另外，Veeco 还发现：业界采用 MOCVD 设备来生长其他光子器件（还有 RF 器件）的兴趣越来越高。今年 1 月，欧司朗光电半导体（Osram Opto Semiconductors）公司订购了 Veeco K475i 和 Propel 系统，它们是专为生产电力电子元件、RF 半导体器件、LED 和激光二极管（包括 VCSEL）而设计的。Peeler 说，后一种器件的产量将增长，因为它的应用对象包括智能手机（其用于 3D 感应）；自动驾驶汽车中使用的 LiDAR 传感器；以及数据中心（其负责提供高速数据传输）。



Aixtron 用于制造电力电子器件的 MOCVD 设备即将迎来销售增长。为满足该市场的需求，Aixtron 提供了能够容纳 5 个 200 mm 晶圆片的 Aixtron G5+。

今年 4 月，用于生产电力电子元件的 MOCVD 工具出现了销售即将迎来增长的更多迹象，当时 Veeco 发布报道，称 On-Semiconductor 公司已经订购了一套用于生长硅基 GaN 外延片的 Propel 高量制造 MOCVD 设备。

由于订单量在不断增加（连续第三个季度实现增长，达到 1.79 亿美元，而且终端市场前景乐观），因此只要能以优良的毛利率运营，Veeco 就应恢复盈利。如果在这方面取得成功，那么 2019 年 Veeco 就不太可能在股价排行榜上排名末位了。CS



Messe München
Connecting Global Competence

智在创新

点胶注胶

Soldering and
dispensing

表面贴装

Surface-mount
Technology

技术应用
竞赛

Technology
application
contest

自动化

Electronic manufacturing
automation

电子制造服务

PCB & EMS

产线操作
演示

Demo
production
line

线束加工

Cables, Coils & Hybrids

材料设备

Production materials/
equipment

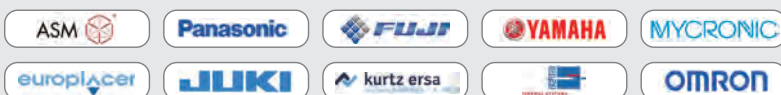
创新论坛

Innovation
forum



扫描左侧二维码
进行**观众注册**
赢取**精美礼品**

SMT表面贴装技术主题展区



参展联系: 邱燕女士 电话: 021-2020 5522 传真: 021-2020 5699 E-mail: chloe.qiu@mm-sh.com
参观联系: 李曙女士 电话: 021-2020 5612 传真: 021-2020 5699 E-mail: hazel.li@mm-sh.com

International Trade Fair for
Electronics Development and Production.

2019年3月20-22日
上海新国际博览中心 W1、E1、E2、E3、C3馆
productronicachina.com.cn



productronica China 2019

慕尼黑上海电子生产设备展

GaN 激光器 有望进一步缩小原子钟

在 GaN 激光器中刻蚀深的横向光栅，有望将这种光源用于原子钟。

Nick Bowden 和 Thomas Slight, CST GLOBAL 公司



蓝光播放器 (Blu-ray) 的遗产是什么呢？随着 Netflix 和其他流视频服务的出现，该播放器的销售量会迅速下降。但至少在这个行业中，Blu-ray 仍被视为是推动 GaN 基激光器商业化的重要产品。

好消息是，GaN 激光器正在产生第二个杀手级应用：照明。GaN 激光器已经用于高端汽车的前大灯，并且它们也是各种形式彩色投影仪中非常有前途的光源。

其他市场也即将出现。这些市场要求更高光谱纯度和波长选择性的 GaN 激光器，这些特性可以通过用分布反馈设计来代替法布里 - 珀罗腔而实现。这种替代允许激光器在塑料光纤网络中得以部署，并且提供穿越水介质的通信，而且，最后但绝非最不重要的是，这种 GaN 激光器可以用于原子钟，其蓝色发光会用于冷却原子。

目前，原子钟中使用的光源通常有两种选择：庞大的固态激光器，它使用倍频技术来产生适当的波长；带有外腔的蓝光激光二极管，这需要复杂的、对振动敏感的机械组件的组合。采用具有分布反馈的 GaN 基激光器替换任何一种光源都可以带来很多好处。它可以简化原子钟的设计，缩小其尺寸，增加器可靠性，并最终实现将其从实验室到主流商业应用的转变。

为了尝试将这个梦想变为现实，在 CST，格拉斯哥大学，TopGaN 激光器公司和阿斯顿大学，我们的团队通过名为 CoolBlue 的项目，开发了具有所需属性的 GaN 激光器。这项工作的官方标题为：采用模式控制蓝光激光器的量子冷却 (Quantum Cooling using Mode Controlled Blue Lasers)。该项目已经揭示——有可能为原子冷却的量子传感器生产出商业上可行的单波长 GaN 激光二极管。

虽然器件的这个市场可能永远不会像蓝光播放器那么大，但它仍然是不小的市场。根据 2015 年题为“英国量子技术路线图”的报告（由英国领先的英国政府研究资助

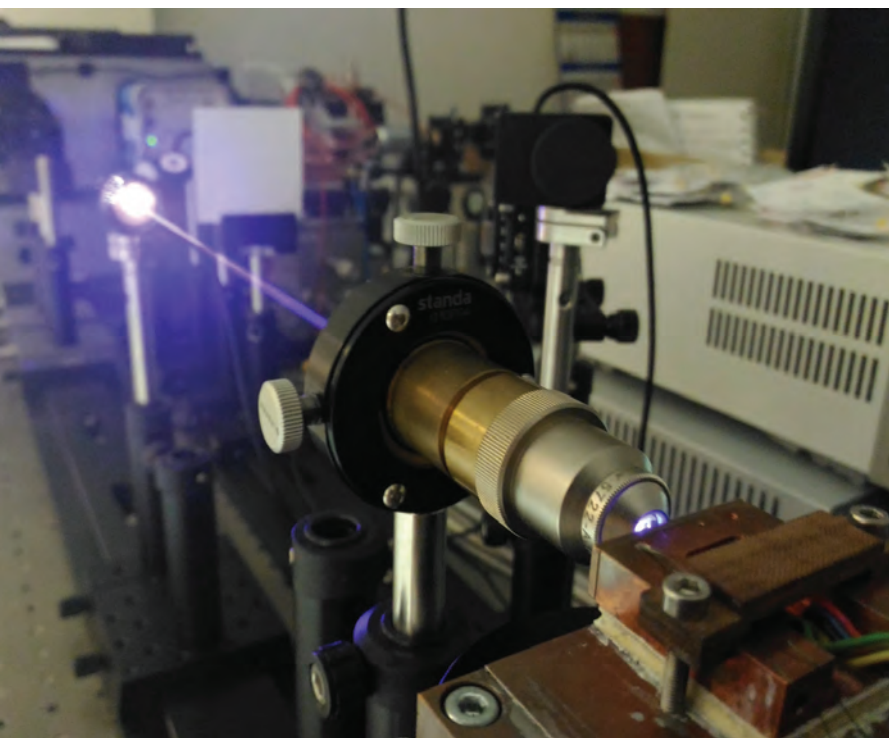


图1. 测试中的分布反馈激光器。(图片来源: S. Stanczyk, TopGaN公司)

机构 Innovate UK 和工程与物理科学研究委员会共同撰写), 全球量子技术的市场价值约 10 亿美元。如果其中三分之一是量子传感, 其中 10% 与传感硬件相关, 并且其中十分之一是激光光源的话, 那么这类 GaN 激光二极管的市场价值将为 300 万英镑。预期一个保守的年增长率 10%, 五年内这就是一个 530 万英镑的市场。

进入这个市场需要批量生产激光二极管, 这种激光二极管需要结合许多众所周知特性的例如小尺寸和坚固的封装, 并且具有高度的光谱纯度, 理想情况下还需要采用相对简单的方法实现。我们能够用我们新颖的光栅形式做到这些。

光栅设计

我们的方法与目前已用于生产分布反馈激光二极管的两种传统方法都不一样。其中一种选择是掩埋光栅, 这会受到复杂的二次外延生长步骤的阻碍, 极有可能导致外延缺陷。对于通常的替代方案, 通过表面光栅直接刻蚀到脊形顶部, 这会由于反应离子刻蚀造成的损伤, 导致 p 型接触质量降低的风险。与表面光栅相关的另一个障碍是电学非泵浦光栅区域中显著的光学损耗, 这是一种有可能通过浅刻蚀横向光栅设计来减轻的问题。

我们通过开拓深刻蚀的横向光栅来避免了所有这些陷阱。这种方法的优点之一是减少工艺步

骤的数目: 大部分结构, 包括波导和光栅, 都是在单一的一个步骤中形成的。额外的优点是更高的良率和更大的光栅耦合系数, 这些是我们特别重视的用于生产原子冷却量子传感系统(如原子钟)光源的优势。

我们的激光器制造首先从采用市售的 MOCVD 生长 GaN 激光级晶圆材料开始, 这些材料包含采用 GaN 势垒层的 InGaN 量子阱有源区, 并使用格拉斯哥大学的电子束光刻工具来定义光栅和脊形图案。在感应耦合等离子体刻蚀形成光栅和脊形之前, 反应离子刻蚀将图案转移到 100nm 厚的硬掩模中。所得到的结构具有几乎垂直和平滑的刻蚀轮廓, 从而确保了最佳的光栅性能。

完成我们的器件包括在盖帽层添加电极接触, 在将晶片翻转之前要进行机械减薄和抛光, 之后会在其上覆盖导电金属层。最后, 器件解理成不同的腔长, 其前面和后面都没有镀膜。

制造一阶侧壁光栅很有挑战性, 因为它需要很高的深宽比和小至约 40nm 的特征尺寸。因此我们使用了三阶光栅, 其最小特征尺寸约为 120nm。

我们进行了简单的建模来改善我们的光栅设计, 进而更深入地了解了光栅尺寸对器件性能的影响。使用光束传播方法, 我们计算了有效模态指数。然后, 使用该值, 我们确定对于 $1.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 的横向光栅波导宽度和 $0.5\mu\text{m}$ 的刻蚀深度, 在激光器内存在 0.0015 的折射率差异。使用该值, 并采用耦合模式理论, 我们可以估计出耦合系数的值为 22cm^{-1} 。为确保单模产率, 耦合系数 κ 和腔体长度的乘积应约为 1.5, 这意味着最佳腔长约为 $700\mu\text{m}$ 。

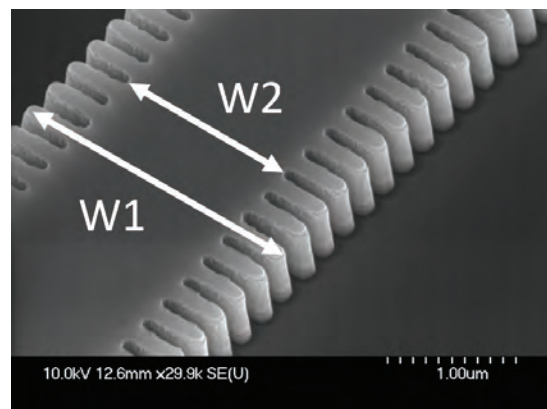


图2. “刻蚀后”的三阶光栅扫描电子显微镜图像, 波导宽度W1和W2分别为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 。

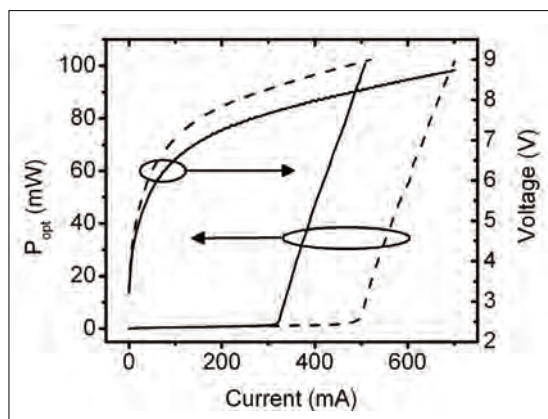


图3. 光功率和电压作为脉冲驱动电流的函数：分布反馈器件（实线）和法布里-珀罗器件（虚线）。

为了评估我们器件的性能，我们对采用三阶光栅的分布反馈激光器进行了光强 - 电流 - 电压和光谱测量，其中横向光栅尺寸为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ ，腔长为 $1000\mu\text{m}$ ，刻蚀深度为 520nm 。为了能够对这些器件的性能进行基准测试，我们还在同一晶圆上制造了尺寸相近的法布里 - 珀罗激光器。

在 20°C 下的脉冲驱动测量显示两种类型的激光器的斜率效率相似。然而，分布反馈激光器具有更低的阈值电流，这表明来自光栅的反馈强于来自解理面面的反馈。两类激光器都具有相对高的阈值电流，我们认为这主要是由于未优化的外延材料所导致。

原子愿景

正如预期的那样，分布反馈激光器的发光比采用法布里 - 珀罗腔的激光器所产生的发光要窄得多。尽管后者展示为多模发射，但分布反馈激光获得了单波长发光光谱（见图 4）。在 390 mA

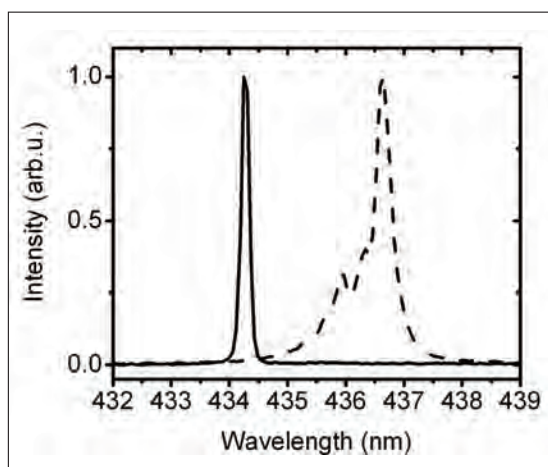


图4. 分布反馈器件的单波长发光（实线），以及法布里-珀罗器件的多模光谱（虚线）。

的驱动电流（高于阈值 20%）下，该激光器产生 40mW 的输出，并且具有 22dB 的边模抑制比，这可以用于判断光谱纯度。这些值足以使其在原子钟内进行激光冷却。然而，满足该应用的所有要求仍然需要更多的努力，包括实现连续波工作，以及将发光偏移到 422nm ，从而可以定向瞄准 Sr^+ 离子应用。

虽然达到约 422nm 的发光波长将进入 Sr^+ 离子的合适应用，但需要达到冷却线从而才能进行温度调节。为了评估该性能指标，我们测量了另一种分布反馈激光器的性能，该激光器的发光波长约为 437nm 。

通过将热沉温度在 20°C 和 30°C 之间变化，我们可以在脉冲操作期间调节发光波长。器件的调谐系数为 0.013nm K^{-1} ，这与发表的此类激光器的数值相当。

由于我们取得的成功，我们赢得了后续项目 CoolBlue 2 的资助。该项目始于 2018 年 4 月，将持续一年。第一个项目中的所有合作伙伴都保留，并加入了国家物理实验室（NPL）和 Helia Photonics 公司。NPL 的作用包括进行激光冷却系统的测试从而验证该技术的功效，而 Helia 则提供激光腔面镀膜的专业知识，从而改善激光器的性能。

我们希望我们在 CoolBlue 2 中开发的 GaN 技术将成为许多量子应用中的关键单元。这项工作应该对波长，稳定性，输出功率和线宽产生严格的性能要求，并且将对激光器如何在许多不同应用中进行部署提供清晰认识。

瞄准更长远的未来，当 CoolBlue 2 完成之后，假设市场机会和供应链成熟度是充分可预见的，我们 CST 将继续投资该产品的开发。这项投资很可能是在芯片或封装器件级别上，尽管显然基于子系统的产品才可能存在商业机会。CS

* 这项工作得到了英国创新项目 Coolblue（项目编号 132543）和国家研究与发展中心的欧洲之星 2 计划（项目编号 E10509/29/NCBR/2017）的支持。

扩展阅读

T. J. Slight et al. IEEE Photon. Technol. Lett. 28, 2886(2016)

下一代重要材料 β -Ga₂O₃

MOCVD 生长速度的增加为器件开发奠定了基础

AGNITRON TECHNOLOGY 公司 Ross Miller, Fikadu Alema 和 Andrei Osinsky 报道

氧化镓 (Ga₂O₃) 是一种非常有前途的材料，可以用于制造功率器件和光电器件。它具有很好的固有特性，初步器件测试表明，在高压开关中它可以比 SiC 和 GaN 功率器件更具有优势。更重要的是，它有可能生产出高性能的日盲（太阳盲）紫外光电探测器。

这种超宽带隙材料有五种不同的晶型。最有希望的是单斜晶多态型 β -Ga₂O₃。由于掺杂控制可以从 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 直到 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ，因此它具有非常大的 4.9eV 带隙能量，以及导电率可在很大范围内变化的独特组合。因为拥有这些特性， β -Ga₂O₃ 可以承受可能导致 SiC 和 GaN 失效的电场强度。

阻碍 β -Ga₂O₃ 基器件进展的是其外延层生长方面的弱点。MOCVD, MBE 和 HVPE 都有缺点限制了 β -Ga₂O₃ 及其相关合金厚膜的快速沉积，并且缺少支持功率器件和光电探测器商业化所需的材料性能。

但是根据我们在位于明尼苏达州伊甸草原的 Agnitron 科技公司的工作，这些问题并非不可

克服。我们的努力表明，通过采用正确的方法，MOCVD 已证明可支持高达每小时 10 微米的生长速度，这比以前的沉积速率高出一个量级以上；此外，还有比以前高得多的电子迁移率；而铝的含量可以达到互补 AlGaO 合金 40% 以上。

本征衬底

基于 β -Ga₂O₃ 技术的另一个吸引力在于可以获得本征衬底，这就克服了外延层和衬底晶格不匹配时，需要特殊的技术才能够实现高质量外延层的生长。这种基础材料可以通过若干种技术实现，包括边缘定义的薄膜沉积生长和 Czochralski 技术。

生产本征衬底的一个巨大优势是它能够用来生长极低缺陷密度的外延膜。这是生产具有高临界电场强度的电力电子器件的先决条件，因为缺陷是器件低于预期电场击穿的主要原因。

此外，熔融技术，特别是用于制造无数硅衬底的 Czochralski 技术，已经通过扩大生产规模实现了低材料成本。假设有足够的需求，人们预期 β -Ga₂O₃ 衬底的成本应该可以逐渐地与硅和蓝宝石的成本相比拟。

注意， β -Ga₂O₃ 的商业化道路与 SiC 和 GaN 的道路明显不同。这些材料对于高电压操作具有比硅更好的材料特性，但由于与衬底和工艺相关的各种问题而面临着制造方面的挑战。这使得有可能可以采用替代材料系统，包括 β -Ga₂O₃，它不会受到这些缺点的阻碍，并且可能为某些应用提供差异化的性能。

我们最初参与 β -Ga₂O₃ 与功率器件无关，而是与 UVC 光电探测器有关。我们与加州大学圣

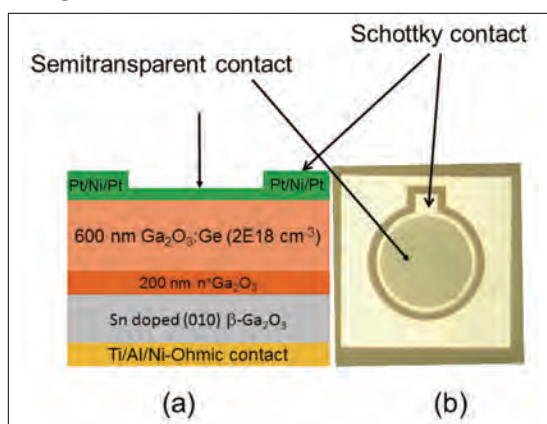


图1. (a) 基于体n- β -Ga₂O₃衬底上通过MBE生长的 β -Ga₂O₃:Ge同质外延膜光电二极管的横截面图。(b) 光学图像显示出了垂直肖特基光电二极管的顶视图。

塔芭芭拉分校 (UCSB) 和中佛罗里达大学 (UCF) 的研究人员合作, 利用这种材料系统制造了肖特基光电二极管。

尽管缺乏优化, 但这些探测器表现出高的光响应和高的抑制比 (参见图 1 和图 2)。我们相信, 通过 $\beta\text{-(AlGaIn)}_2\text{O}_3$ 合金的组分调整, 通过能带工程调整能隙和截止波长的进一步努力可以促进真正的日盲、全紫外光谱探测器的商业化。

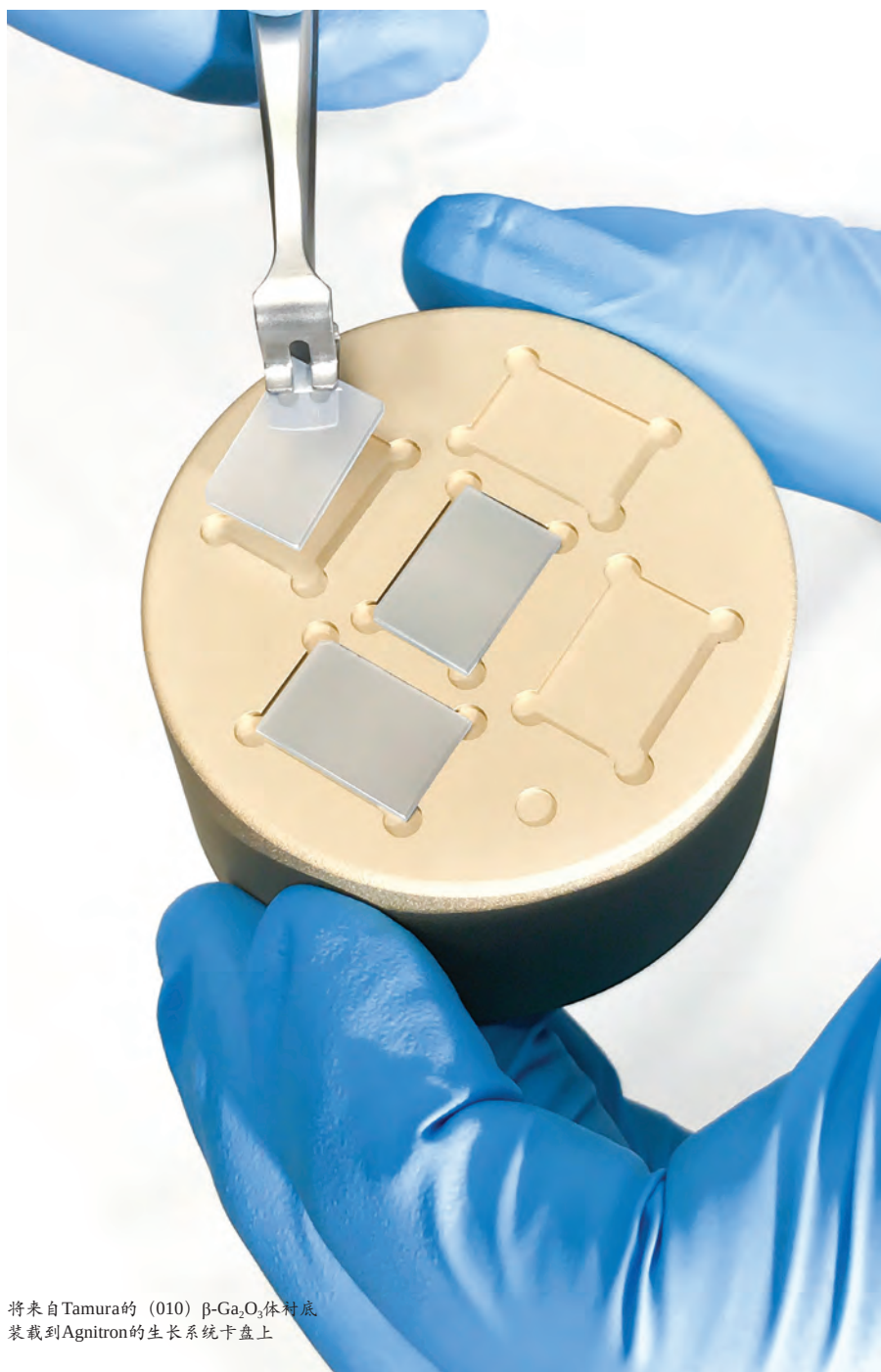
然而, 毫无疑问的是, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 作为制造电力电子器件的材料正在引起人们的极大兴趣。与其他氧化物半导体一样, 抵消其众多优势的问题是, 在这种材料中实现可用的 p 型掺杂是难以捉摸的, 而且可能一直会是这样。

但是, 由于其超宽的带隙和很大范围内的可控 n 型掺杂, 人们对开发具有垂直和横向导电拓扑结构的单极性器件非常感兴趣, 这可用于开关和 RF 器件应用。迄今为止的进展包括, 2017 年由日本 NICT 团队报告 1kV 以上垂直器件肖特基二极管, 以及最近康奈尔大学 FET 的演示报道, 并且由于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的强大本征特性实现垂直几何器件的水平开关电压超过 10kV, 随后有机会取得更大的成功。俄亥俄州立大学和空军研究实验室最近也在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基异质结构中展示高迁移率二维电子气 (2DEG), 表明可能超过 GaN HEMT 电压性能的器件之路。

外延生长挑战

对于千伏范围工作的高功率 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基二极管和晶体管, 通常需要厚度为 $10\mu\text{m}$ 或更厚的外延层。MBE 的生长速率仅为每小时数百纳米, 因而这种方法就被排除了。

然而, 低生长速率不是唯一的问题。功率器件还需要合金层 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$, 以形成二维电子

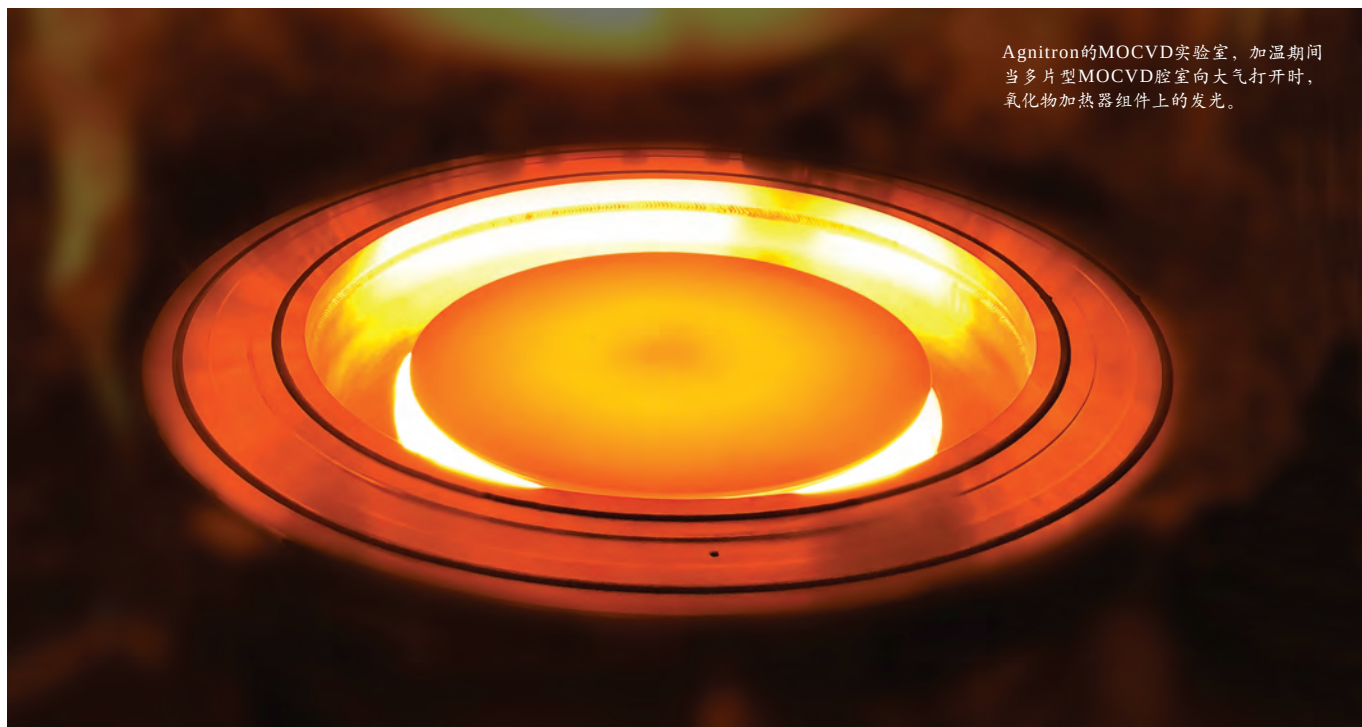


将来自 Tamura 的 (010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 体衬底装载到 Agnitron 的生长系统卡盘上

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	Diamond	AlN
Bandgap E_g (eV)	1.1	1.4	3.3	3.4	4.9	5.5	6.2
Electron mobility μ ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	1400	8000	1000	1200	250	2000	850
Breakdown field E_{br} (MV cm^{-1})	0.3	0.4	2.5	3.3	8.0	10.0	15.4
Relative dielectric constant ϵ	11.8	12.9	9.7	9.0	10.0	5.5	8.5
Saturation velocity V_{sat} (10^7 cm s^{-1})	1.0	1.2	2.0	2.5	1.1	1.0	2.0
Thermal conductivity λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	150	50	370	130	10 [100] 30 [010]	2000	340
Balliga's FOM ($\mu\epsilon E_{br}^3$)	1	15	340	870	3444	24661	59160
JFOM ($V_{sat} E_{br}$)	1	2	17	28	29	33	103
HMFOF ($E_{br} \mu^{0.5}$)	1	3	7	10	11	40	40
HCAFOF ($\epsilon \mu^{0.5} E_{br}^2$)	1	5	48	85	225	619	1479
HTFOF ($\lambda \epsilon^{-1} E_{br}^{-1}$)	1	0.23	0.36	0.1	0.01	.86	0.06

表1. 各种半导体材料特性的比较以及几个关键的品质因数 (来自扩展阅读中列出的后两篇论文)。由于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的导热性相对较低, 因此该氧化物器件的商业开发必须去考虑热管理和封装研发。

Agnitron的MOCVD实验室，加热期间当多片型MOCVD腔室向大气打开时，氧化物加热器组件上的发光。



气。研究 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{O}_3$ - $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的相图表明，实现富铝 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 合金生长所需的温度和压力具有挑战性（见图3）。

在我们工作之前，MOCVD 也受到许多限制的困扰。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的生长速率不能超过 500 纳米/小时；掺杂浓度受限制，不能低于 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ；电子迁移率远远低于理论水平，和 MBE 演示的一样； $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 的组分受到限制，其掺杂很有挑战性。

..... 以及突破

我们对所有这些限制的突破，可以追溯到

我们参与由陆军研究办公室赞助的为期两年的 STTR 计划。在这项工作的后半部分，我们的任务是找到一个合适的缓冲层，以提高太阳光盲的 MgZnO 基光电探测器的性能。直到那时，仍然是将 ZnO 用作蓝宝石上的缓冲层，但是这会限制器件的性能，因为它倾向于吸收波长比 MgZnO 薄膜更长波长的入射光。

由代理 ARO 计划的监管人 Michael Gerhold 推荐的补救措施中包括了将 ZnO 转变为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ，形式可以是衬底或者缓冲材料。在调查这些材料的过程中，我们开始清楚认识到了 MOCVD 的生长限制。

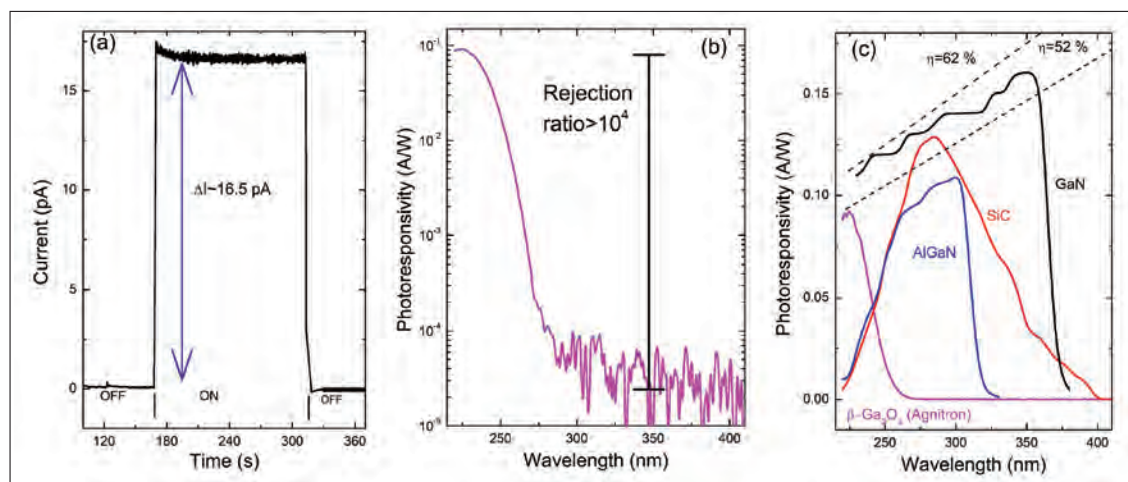


图2. (a) 黑暗和照明条件下，图1中基于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 外延膜的垂直肖特基器件的电流-时间特性。(b) $\text{Pt-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 垂直肖特基光电二极管的光谱响应。(c) 比较未优化的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 光电二极管（品红色）与基于 GaN （黑色）， SiC （红色）和 AlGaIn （蓝色）宽带隙半导体商业器件的光响应性。估计的量子效率用虚线表示。

在该项目完成后，我们启动了由海军研究办公室（ONR）赞助的一项计划，该计划的重点是提高 MOCVD 生长 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的生长速度。项目的成功将有助于高压电力电子器件的发展，高压电力电子器件可以装备用于武器和运输系统如有轨机枪的军用设备，以及空基和导弹防御雷达和推进装置。

我们在最新的 STTR 计划中取得了重大进展，其中 UCSB 也有参与，通过这项计划，我们已经能够将生长速度提高到 10 微米 / 小时。仅通过增加前体的流量是不能实现这个速度的。虽然增加流量有点帮助，但它并没有解决整体的限制因素。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 生长的困难在于，当金属有机前体注入生长室富氧的环境中时，它们在气相中快速反应，损害前体效率并最终导致实际的生长速率无法提高。我们的解决方案是优化压力和生长温度，并将其与紧密喷射喷头设计相结合，在到达生长表面之前减少工艺气体混合的时间。由此，到达生长表面的活性前体物质的数量会增加，实现了前体效率和生长速率的提高。

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 生长速度的提高必须与这种超宽禁带氧化物的 MOCVD 生长技术的其他改进同时进行。比如还必须在掺杂浓度范围内，同时实现低背景浓度，高载流子迁移率，光滑的表面形态和高铝含量的 $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 合金方面等方面都要取得进展。我们在所有这些方面都取得了成功（详见表 2）。

我们在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 掺杂方面的突破包括了新方法的使用。以前的努力有原硅酸四乙酯（TEOS）或三乙基锡（TESn）的使用，而我们使用了硅烷作为硅源。后者的优点包括其通常就在 MOCVD 生产工艺中使用，允许以高和低浓度输

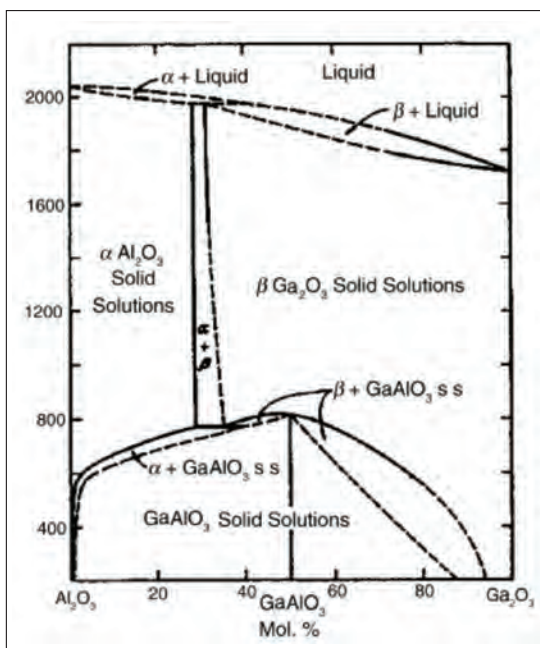


图3. Ga_2O_3 和 Al_2O_3 的相图。[Hill *et al.* J. Am. Cer. Soc. 35 135 (1952)]。通过形成 GaAlO_3 中间体化合物，低于 800°C 时 Al_2O_3 在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中的溶解度急剧降低。MBE 的生长温度限制在 $600\text{--}700^\circ\text{C}$ 左右，因为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 分解为挥发性的亚氧化物。因此，在 MBE 生长中， $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中的最大 Al_2O_3 含量约为 20%。相反，超过 800°C 的 MOCVD 生长将促进高于固相成分点的生长，并允许在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 相中高达约 60% 的 Al_2O_3 含量。

送，从而支持高和低的掺杂水平，掺杂范围超过先前的报告水平，高和低两个方向上都扩大大约一个数量级。

我们还实现了外延电子迁移率的显著增加，未掺杂的厚膜实现了与高质量未掺杂本征衬底中观察相当的迁移率，约 $150\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。此外，我们还获得了 MOCVD 生长薄膜中电子浓度的新基准，我们的材料电子浓度比任何其他报告电子浓度要低三倍以上。另一个令人鼓舞的结果是，根据 X 射线衍射扫描结果，我们的外延膜晶体质量非常高，以至于它只受到起始本征衬底质量的限制。总之，所有这些实验结果表明，由于镓空位，位

Properties of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOCVD Epitaxial Films	Agnitron Results
UID $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ electron mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$), RT	120-150
UID $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ carrier concentration, cm^{-3}	$<3 \times 10^{16}$
SI $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ sheet resistance, $\text{M}\Omega/\text{square}$	>1
Controlled doping concentration range, cm^{-3}	$3 \times 10^{16}\text{--}1 \times 10^{20}$
XRD FWHM (arcsec)	<40
Growth rate ($\mu\text{m hr}^{-1}$)	Up to 10
RMS roughness (nm)	<0.3
Al in $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$	0.43*

表2. 各种 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 材料参数的总结，展示出了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOCVD 生长工艺的最新进展。*结果表明，通过 MOCVD 生长的 $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 合金中可以实现 0.43 的铝摩尔分数掺入。

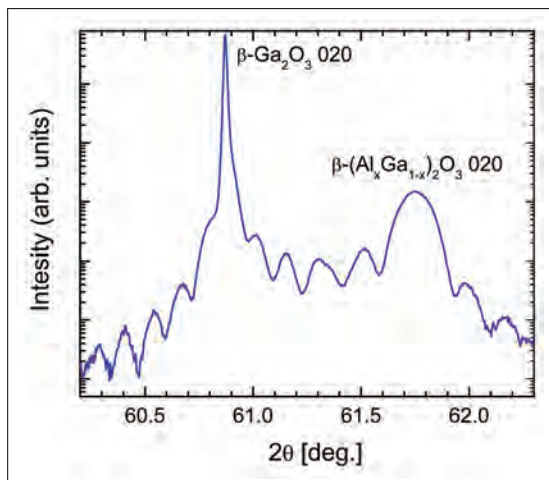


图4. 通过MOCVD在 (010) β -Ga₂O₃衬底上生长的应变 β -(Al_{0.21}Ga_{0.79})₂O₃/Ga₂O₃异质结构XRD ω -2 θ 扫描曲线。 β -(Al_{0.21}Ga_{0.79})₂O₃层的厚度为70nm。

错和点缺陷的减少，载流子补偿和材料中的散射都减少了。

另一个突破是开发了一种新型专有工艺，用于生长高电阻半绝缘 β -Ga₂O₃ 外延薄膜。高阻半绝缘 β -Ga₂O₃ 层是制造横向和垂直导电功率器件所必需的，通常通过添加诸如铁或镁之类的深杂质来形成。但这种增加的功能远不够理想：由于它们是高度可移动的，因此它们可以扩散到相邻的层中，在这些层中它们是有利的，以至于可能会妨碍器件的性能。

更重要的是，当铁和镁杂质引入到 MOCVD 生长室时，它们具有“记忆效应”，需要特殊处理以防止它们对随后的生长产生不良影响。我们的专有工艺避免了半绝缘薄膜的这些缺点，同时使

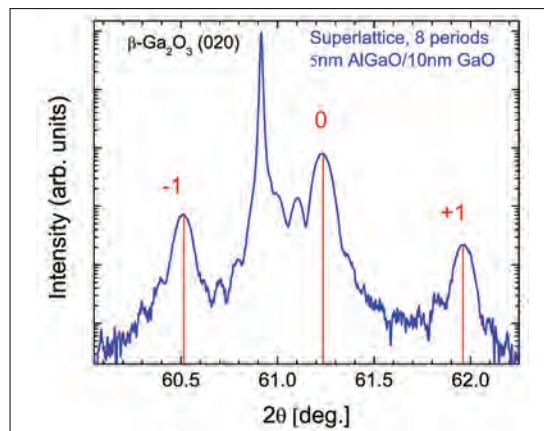


图5. Agnitron Technology公司通过MOCVD生长的第一个 β -(Al_{0.21}Ga_{0.79})₂O₃/Ga₂O₃超晶格结构的XRD (020) ω -2 θ 扫描。超晶格结构具有8个周期的 β -(Al_{0.21}Ga_{0.79})₂O₃/ β -Ga₂O₃，其中 β -(Al_{0.21}Ga_{0.79})₂O₃势垒和 β -Ga₂O₃势阱的厚度分别为5nm和10nm。虽然这种结构没有进行优化，但在XRD扫描中观察到的Pendellösung条纹就是表面和晶体质量的很好指标。该结果代表了MOCVD能力的重要展示。

用一系列前体扩展了 n 型掺杂 β -Ga₂O₃ 的可控范围，从而提高了工艺灵活性。

我们还在富铝 (AlGa)₂O₃ 合金的 MOCVD 生长中领先，开拓出铝含量为 43% 的三元合金新领域。请注意，更高的值也有实现的可能。我们还形成了：高质量，应变 β -(Al_{0.21}Ga_{0.79})₂O₃/Ga₂O₃ 异质结构，这是各种器件结构的关键构件（参见图 4 的 X 射线衍射光谱）；以及具有突变界面的应变 β -(Al_{0.21}Ga_{0.79})₂O₃/Ga₂O₃ 超晶格（见图 5）。后者有望在异质结构的生长过程中提供缺陷 / 位错管理，并可用于形成多沟道、横向导电器件的有源区。接下来的步骤将包括进一步优化 AlGaO 合金中可控的 n 型掺杂，AlGaO 合金是制造器件的关键材料。

我们取得的成功将为即将到来的器件开发奠定基础。我们相信通过优化 MOCVD 工艺，可以实现 β -Ga₂O₃ 及其相关合金特性能够用来制造达到理论预测性能的器件。目前，用于商业器件生产的生长速率已经足够高，但它们需要在更大的多晶圆平台上实现，从而提供足够的高质量外延材料产量。

有充分的理由让我们相信这是可能实现的。历史经验已经证明了 MOCVD 平台在大规模生产 LED，激光二极管和功率器件方面的成功。这种生长技术还提供了很宽的工艺窗口和很广的可用前体材料，为工程师提供了优化选择性二次生长，合金组分，掺杂，补偿控制，生长速率和气相反应所需的杠杆。然而，尽管 MOCVD 在大规模生产氮化物，磷化物和砷化物方面已经证



图6. Agnitron采用双腔配置的Agilis MOCVD系统。 β -Ga₂O₃可用配置目前为表3中所示的单室设计和规格。

MOCVD System Parameter	Single Wafer	Multi-Wafer
Wafer loading capacity	1x2"	5x2"
Heating method	Induction, 1-zone	Resistive, 2-zone
Max process temperature	1050°C+	950°C
Max rotation speed (RPM)	300	1500
Alkyl source channels	5	5
Oxygen precursors	O ₂ , H ₂ O, tert-Butanol	O ₂ , H ₂ O, tert-Butanol
Carrier gasses	N ₂ , Ar	N ₂ , Ar
Number of dopant source channels	2	2
Control system package	Imperium-MOCVD	Imperium-MOCVD

表3. Agnitron的新型Agilis β -Ga₂O₃配置MOCVD系统的系统规格。规格参考标准系统配置；一些参数可定制或可扩展。

明是成功的，但并不是说它就一定是 β -Ga₂O₃ 确定无疑的选择。氧化物 MOCVD 的生长有其独特的一系列与工艺相关的挑战，如果想要 β -Ga₂O₃ 基器件的商业化生产实现起步，这些问题是必须要解决的。

如果器件要取得商业上的成功，那么与外延生长相关的成本必须是适度的。毕竟，包括 LED 在内的其他化合物半导体器件类型也都是这个样子的，因此从逻辑上人们可以假设对于 β -Ga₂O₃ 基的器件也是相同的。

有利于 β -Ga₂O₃ 的一个主要因素是它可以通过规模可扩展的批量生长技术来生产本征衬底。这有望实现比 GaN 更简单的生长。对于 SiC，同样也是使用同质外延生长，但是 SiC 衬底相比更加昂贵，因此如果规模足够大， β -Ga₂O₃ 基器件的生产成本甚至低于 SiC 和 GaN 器件的生产成本是完全可能实现的。

为了支持 β -Ga₂O₃ 的商业化，我们已经在与 UCSB 合作，以改善与这种氧化物相关的 MOCVD 生长技术。我们的努力开始于广泛的气流和化学建模，从而能够确定理想的前体候选，并建立其合适的生长条件窗口。这项工作也有助于反应器系统的设计。

我们现在正在进行 β -Ga₂O₃ 生长的第四代和第五代反应器配置。这些最新配置具有改进的气流注入能力，能够提供实现世界领先的 β -Ga₂O₃ 材料生长所需工艺条件。

使用这种配置，我们最近在我们的 Agilis 系列研发 MOCVD 系统产品组合中添加了一个新的工具（参见图 6）。该系统可提供单片晶圆和多片

晶圆反应器的几何形状，而且初始客户的订单计划将在第三季度交付。

该工具的发布将有助于推动 β -Ga₂O₃ 光电和功率应用的发展。但是我们认为还有许多的工作需要去做。多片晶圆配置还是偏小，并且规模的扩大必须在保持材料质量的同时进行，这样才有可能降低外延成本。此外，虽然很明显宽带隙器件是确定用来提高电动汽车，数据中心和分布式能源的能源效率，但各种宽带隙器件将要扮演的角色仍然存在着不确定性。我们要努力探索： β -Ga₂O₃ 的最佳机会是什么？GaN 和 SiC 又会应用在什么地方呢？

* 本文中所描述工作的绝大部分得到如下单位资助：ONR 合同，编号 N6833518C0192，Lynn Peterson 先生指导；AFOSR 合同，编号 FA9550-17-P-0029，Ali Sayir 博士指导；以及 Michael Gerhold 博士指导的 ARO 合同，编号 W911NF-14-C-0157。Agnitron 还感谢 James Speck 和 Winston Schoenfeld 教授的支持和合作贡献，这对于 Agnitron 团队的 β -Ga₂O₃ 相关进展非常重要。

扩展阅读

- K. Konishi et al. Appl. Phys. Lett. 110 103506 (2017)
- Z. Hu et al. Enhancement-mode Ga₂O₃ vertical Transistors with breakdown voltage > 1 kV, IEEE Electron Device Letters, Early Access, 25 April 2018.
- M. Baldini et al. ECS J. Solid State Sci. Technol. 6 Q3040 (2016)
- G. Jessen et al. Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), IEEE, Maimi, FL, USA, 2017
- M. Higashiwaki et al. physica status solidi (a) 211 21 (2014)
- Y. Zhang et al. Appl. Phys. Lett. 112 173502 (2018)

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



构造氮化物 纳米线阵列的互连

硅基光子由于缺乏合适的单片集成光源而发展受阻。这里的解决方案是：引入激光器、波导和光电探测器，它们都是通过具有 InGaN 层的氮化物纳米线阵列形成。

密歇根大学 Pallab Bhattacharya 和 Arnab Hazari 报道

整个二十世纪，工程师们都是通过简单地减小晶体管的尺寸来改善硅 IC 的性能。但最近，依靠这样的进展变得越来越困难。目前已经通过引入特殊材料和架构，从而确保晶体管的微小化不会产生不希望的后果，并且我们认为不久之后将需要添加基于光的通信，以便在 CMOS 芯片内部以及相互之间更快地传输信息。

后一种技术通常称为硅基光子，具有更好的前景，因为光的传播速度远远快于电子（参见图 1 所示的简单光子电路）。由于速度的提高，包含光子的电路可以以远高于电子电路的通信速率运行，从而缩短了片上和片外的延迟。

然而，实现装备光子的 IC 前景并不容易。硅无疑仍然是电子产品的材料，但它的间接带隙妨碍了它在光通信所需组件中的应用。虽然在硅基探测器、调制器和无源波导的研究和商业开发方面取得了令人瞩目的进展，但 III-V 族仍然是制造光源的关键材料。

目前的解决方案是将基于 GaAs 或基于 InP 的激光器键合到硅晶圆上。然而，这并不很理想，

因为它会产生热的问题：硅会变热，影响激光器的输出和效率。相比而言好得多的方法是在硅上外延生长和制造二极管激光器。理想情况下，该光源发光必须为约 $1.3\mu\text{m}$ ，即 SiO_2 波导的零色散波长。注意，该光谱范围的另一个优点是它处于人眼安全的工作范围。

不幸的是，这种方法的成功受到三个方面的阻碍：存在大的晶格失配，导致高的位错密度；热膨胀系数失配，导致器件种会产生应变；由于外延层和衬底的极性 / 非极性本质特征，在生长过程中可能产生不希望的反相畴。

尽管存在所有这些缺点，但通过使用合适缓冲层的器件已经取得了令人鼓舞的进展。我们密歇根大学一路领先，展示了第一个直接在硅上生长的 InAs/GaAs 量子点激光器。其他团队正在追随我们的脚步，改善该器件在 (001) 硅衬底上的性能。

但是，进展很缓慢，而且问题仍然存在。用作激光器衬底的硅沿着 (011) 方向偏 4° 切割，以避免反相畴和由此产生的缺陷。同时，CMOS

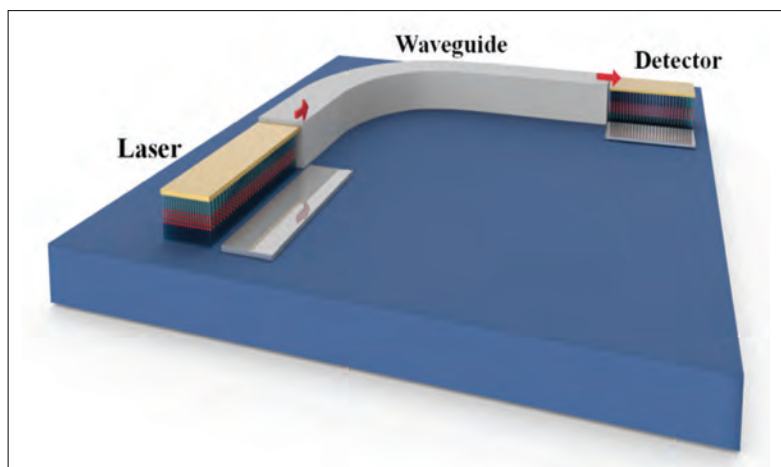


图1. 硅平台上光子集成电路的最简单示例。密歇根大学用MBE直接在硅上生长III族氮化物异质结构纳米线阵列，用于制造二极管激光器和光电二极管。波导通过介质沉积形成。

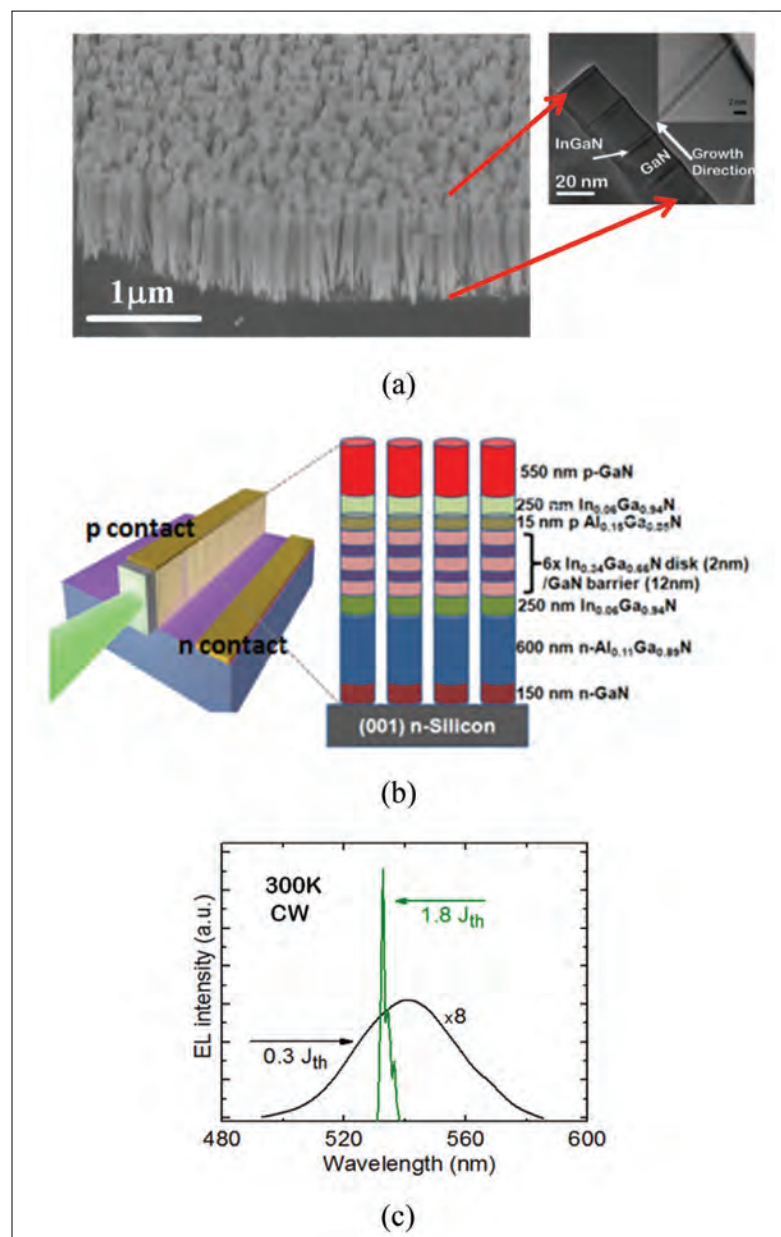


图2. (a) 硅上纳米线阵列的扫描电子显微镜和高分辨率透射电子显微镜图像；(b) 纳米线中圆盘的边发射二极管激光器图示；(c) 低于和高于阈值注入的绿色发射激光器的光输出特性。

电路是在(001)上形成,这种情况不可能去改变。另外,激光器的制造涉及复杂的缓冲层和中间层的生长,使得整个工艺非常复杂。

切换到氮化物

我们的观点是,不要试图解决所有这些问题,切换到另一个材料体系要好得多。我们选择了氮化物,因为它们结合了带隙的巨大可调节性和各种衬底上生长的可能性,例如蓝宝石, SiC 和硅,这里硅也包括用于 CMOS 电路的形式。

GaN 及其相关合金的一个显著特征是其大的固有极化。极化产生的电场有助于 HEMT 的设计,但对于 LED 则是缺点,它会阻碍辐射复合效率并限制量子阱的厚度。其他的复杂性是当从蓝光推进到绿光发光时 InGaN 阱的镓含量增加,会导致组分的不均匀。这使得生产蓝色以外波长光源实现可接受效率非常具有挑战性。而且高密度缺陷还会放大这个问题,这主要是由于外延材料与衬底的巨大晶格失配引起的。

为了避开这些问题,我们避免使用平面 III 族氮化物半导体,转而使用纳米线。这些纳米线的阵列可以在没有掩模或催化剂的情况下直接生长,包括在 CMOS 兼容的(001)硅等各种衬底上。这些自组织随机阵列的纳米线密度可以在 10^8cm^{-2} 至 10^{11}cm^{-2} 的范围内,而它们的直径可以在 20nm 至 80nm 之间(参见图 2)。

由于外延生长期间应变的径向弛豫,这些纳米线中与高极化场相关的问题大大减缓。由于更大的表面积与体积之比,纳米线还可以抑制扩展缺陷;通过将如 InGaN 制成的较低带隙圆盘插入到较高带隙 GaN 或 AlGaIn 纳米线中,发光可以跨越更宽的光谱范围。注意,结构的发光可以通过调整单个或多个圆盘的组分来调整。

我们在开始这项工作之后不久就意识到,纳米线的另一个好处是, InGaIn 盘中镓的掺入量可以远远高于平面量子阱中镓的掺入量,而且没有任何不好的效应。我们都可以实现超过 50% 的量子效率。

我们已经使用这些纳米线中的圆盘阵列制造出了绿光和红光发光 LED,而更重要的是首次实现了二极管激光器。请注意,我们的边发射纳米线阵列激光器(见图 2)在(001)硅衬底上制造出来以后,看起来和平面器件是完全相同的。为了实现绿光和红光的发光, GaN 波导和 AlGaIn 包覆层中形成有源(增益)介质的 InGaIn 盘对于

534nm 发光有 34% 的铟含量，对于 630nm 发光有 51% 的铟含量。

这些发光器件的特征包括没有反射，散射和分布反馈，因为与发光相关的波长远大于纳米线的直径（聚对二甲苯聚合物包裹纳米线，产生折射率为 2.1 的复合介质结构）。由于阵列的随机性，也避免了与光子晶体相关的特性。

这些激光器的典型输出功率为 10-15mW。阈值电流密度对温度变化 ($T > 200\text{K}$) 相当不敏感，并且具有约 1kA cm^{-2} 的典型值。电调制表明调制带宽达到 3GHz，而这并没有对纳米线异质结构就行任何的特殊设计。

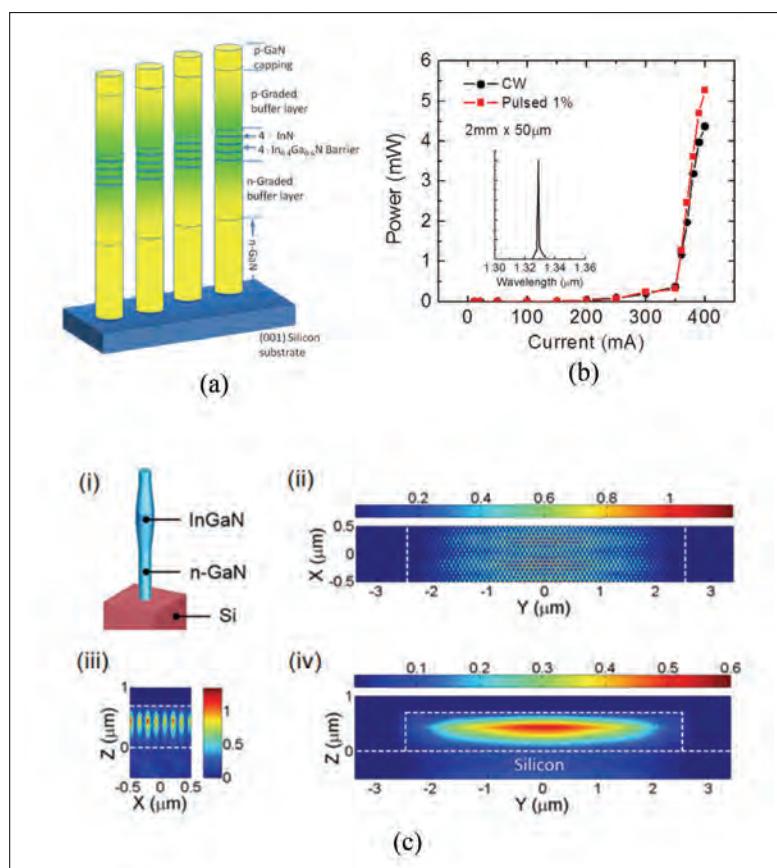
实现近红外

为了推动我们的激光器从可见光到近红外线发光，我们还必须提高 InGaN 盘中的铟含量。通过仔细优化 MBE 参数，金属束流和生长温度后，我们在 GaN 纳米线中加入了多个 $\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$ 盘。令人鼓舞的是，这些结构在室温下产生了所需波长的强的光致发光。我们非常感谢密歇根大学的 Millunchick 研究小组提供的帮助，他们通过透射电子显微镜进行了详细的成像分析，提供了对我们纳米线质量的深入了解。

我们在我们大学的 Lurie 纳米加工平台上制造了这些异质结构纳米线晶圆上的激光器。器件的制造包括一系列工艺步骤，有光刻，刻蚀，金属沉积，平面化和聚对二甲苯聚合物保护。制造并不容易，因为切割纳米线阵列 / 聚对二甲苯复合材料会导致粗糙激光腔面，会将反射率降低到可能无法实现必要的腔面反馈的程度。为了克服这个问题，我们使用聚焦离子束刻蚀来使得腔面平滑。通过添加多对 ZnSe 和 MgF_2 周期可以进一步增强腔面反射率，这些会一起形成分布式布拉格反射镜。这样可以使得反射率提高到约 90%，并最终制造出发射峰值为 $1.2\mu\text{m}$ 且室温输出约为 7mW 的激光器。这些首创的近红外 III 族氮化物基二极管激光器对硅是透明的，因此可以在硅上实现低损耗的单片光电子电路。

这些器件中存在大的偏振电场，可以通过低于阈值时的电致发光峰值和高于阈值时的相干激光峰值之间的蓝移来揭示。尽管如此，这些电场也远小于平面量子阱中的电场。

这种激光器其他令人鼓舞的特性包括：有源圆盘中没有明显的材料偏析；低的阈值电流；



阈值电流的高温稳定性 ($T_0 > 200\text{K}$)；高的差分增益；以及良好的模式特征。

在我们寻求实现硅基光子最佳的 1.3 微米激光发射种，我们仅有的可用选择是尝试在 GaN 纳米线中加入二元 InN 盘，从而进一步红移发光。这是比沿量子线形成更厚 InN 区域好得多的方法，因为圆盘会提供量子限制，并且倾向于具有较低的位错密度。

InN 盘的外延生长远非易事。确定最佳生长温度至关重要，而这还是一个未知的参数。我们同时是受到了铟的低粘附系数限制。如果我们选择太高的衬底温度，这将增强铟的解吸附；如果我们选择的温度值太低，异质结构会受到结晶质量太差和缺陷的困扰。经过一些优化后，我们选择了 489°C 的衬底温度。

我们很高兴地发现我们的 InN/GaN 纳米线中圆盘阵列可以产生强的光致发光和高的辐射效率。在聚对二甲苯钝化之前或之后，后者都达到 67%，超过所有组分三元合金 InGaIn 盘的值。光致发光在 $1.6\mu\text{m}$ 时达到峰值，这是一个非常令人鼓舞的结果。

为了改善我们的边发射光源性能，我们调整了设计，引入了具有不同组分 InGaIn 的渐变折射

图3. (001) 硅上的 $1.3\mu\text{m}$ 纳米线中圆盘阵列二极管激光器。(a) 具有 InN 盘的纳米线异质结构；(b) 输出光电流特性；(c) 通过有限差分域技术计算的模式传播和限制。

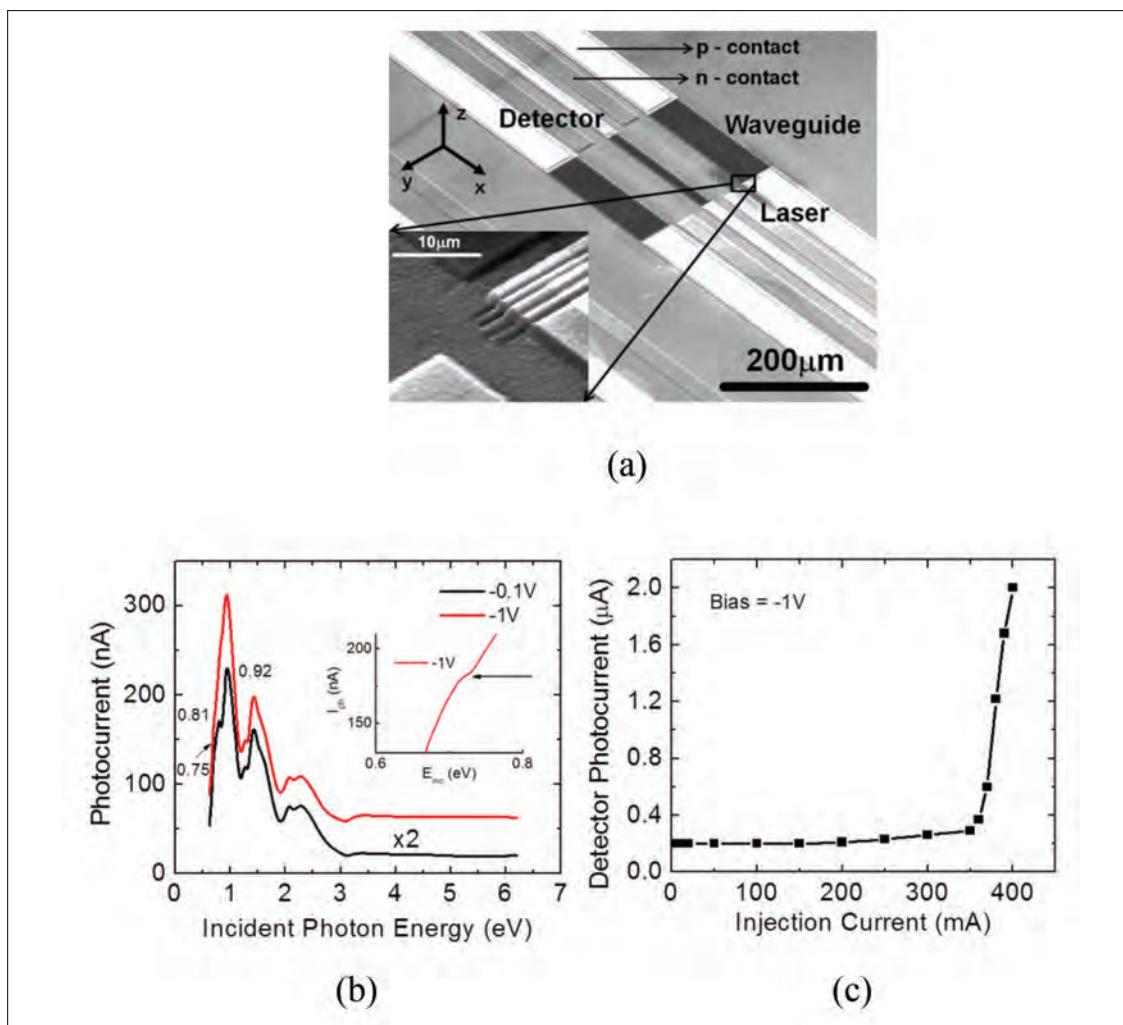


图4. (a) 在 (001) 硅上制造的纳米线光子集成电路的扫描电子显微镜图像；(b) 集成光电二极管的光电流响应；外加激光器注入电流增加时，光电二极管的响应。响应度谱中的峰值和肩部源自于InN盘和纳米线异质结构其他区域的带间跃迁。

率波导。由此获得了在波导区域中间结合有多个6nm厚InN盘的器件，这些器件给出了非常有前景的输出功率，良好的模式特性，极端的温度稳定性 ($T_0 \sim 220\text{K}$) 和很大的差分增益，并且这些全部为室温特性（有关输出光电流特性的详细信息，请参见图3）。发光峰值约为 $1.3\mu\text{m}$ ，因此说我们的器件是硅基光子非常有希望的候选。

我们的合作者已经模拟了激光器的性能。使用有限差分时域方法，韩国 Ajou 大学的 Junseok Heo 研究了传播模式的特征（见图3）。与此同时，伊利诺伊大学厄巴纳 - 香槟分校的 John Dallesasse 和他的小组计算了圆盘中的应变分布和能带结构。这两项研究都帮助我们增加了对 InN 盘的电子和

结构特性以及用它们所制造激光器特性的理解。

为了确定我们的激光器在基于通信应用中的适用性，我们对这些器件进行了高速测量。使用小信号调制测量，我们发现我们的激光器可以在高达 3GHz 的频率下进行调制。这绝不是它们能力的极限：通过设计改进是可以增加这种带宽的。

制备光电二极管

即使是我们能够想到的最简单通信链路中，光电探测器也是另一个不可缺少的关键组件。激光器的成功促使我们研究用相同纳米线阵列来制造近红外波导的光电二极管。这项工作很大程度上依赖于我们之前的工作，因为我们的

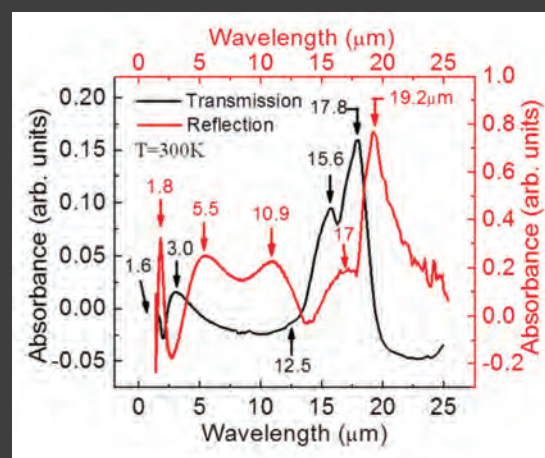
我们很高兴地发现我们的InN/GaN纳米线中圆盘阵列可以产生强的光致发光和高的辐射效率。在聚对二甲苯钝化之前或之后，后者都达到67%，超过所有组分三元合金InGaN盘的值。

超越近红外的 III-氮化物

微人们正在进行重要的研究来探索 III 族氮化物材料超越近红外的应用。通过利用子带间电子跃迁而不是带间跃迁，可以探测超过 1.6 μm 的光。在 (001) 硅上外延生长的 $\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构纳米线阵列中已经观察到了子带间跃迁。

由于外延期间纳米线中的应变弛豫， InGaN 盘中的极化电场弱于 GaN 中等量子阱的极化电场。因此，有源区中的能带弯曲较弱，形成了更多数量的电子和空穴束缚态。在吸收 3-20 μm 光谱范围内的红外光期间，电子子带间跃迁会在这些束缚电子和空穴状态之间发生。NASA 喷气推进实验室的 Alexander Soibel 和 Sarath Gunapala 实现了纳米线中 $\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{N}/\text{GaN}$ 盘阵列的吸收峰测量（见图）。

红外吸收具有广泛的应用领域，包括化学光谱，地面和地外通信。这些应用可以成为基于纳米线技术探测器的目标，这种纳米线技术与传统的红外探测器相比有明显的优势，传



统的红外探测器是将基于化合物半导体的探测器阵列和硅读出集成电路通过钢凸点键合在一起。由于纳米线阵列红外探测器在硅上外延生长，因此可以避免这种昂贵的技术。此外还有室温工作的前景！

激光器制造和光电二极管制造之间的唯一区别是激光器腔面上的反射镜替代为 SiO_2 制做的减反射介电膜层。

我们的光电二极管通常为 50 μm 宽，1mm 长，已在反向偏压下进行了表征。暗电流是几十纳安。同时，1.3 μm 时响应度为 1.3A/W，这是根据使用来自宽带光源光谱的过滤光，通过单色器引导并通过聚焦在光电二极管某个腔面上光纤收集所获得的测量结果（参见图 4）。

制造了这些器件之后，我们已经实现并测试了包括激光器，光电二极管和波导所组成的整个光子集成电路。对于后来制备的组件，我们已转向了 $\text{InN}/\text{InGaN}/\text{GaN}$ 异质结构纳米线中圆盘的阵列，与我们用于制造 1.3 μm 激光器和光电二极管所用的相同（参见图 3）。同样，这也是通过 MBE 在 (001) 硅衬底上生长的。

为了制造光子集成电路，我们使用了与制造两种有源器件相同的工艺步骤。当然，我们使用额外的介质沉积步骤在激光器和检测器之间形成多层 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 波导。我们优化了波导的沉积参数，从而得以最小化在相同的控制波导中所测量到的波导损耗。为了提高通信链路的质量，我们在远离波导的激光器腔面上沉积了 ZnSe/MgF_2 多层分布式布拉格反射镜 (DBR)，并在远离波导的探测器腔面上增加了一层 SiO_2 减反射膜层。

通过引入激光器到波导的反射耦合腔面，我们进一步就行了完善。为实现此目的，通过聚焦

离子束刻蚀定义出空气 / 半导体（纳米线 - 聚对二甲苯）的 DBR 反射镜。只需要四个周期的这种 DBR 就可以成功地为激光器工作和波导耦合提供足够的反射率。

为了测试完整的光学链路（参见图 4 中的扫描电子显微图像），我们逐渐增加激光器的偏压，同时测量了探测器的光电流。正如我们所希望的那样，光电流行为与激光器的光输出 - 电流特性相同，证实来自激光器的光通过波导耦合到了探测器。对于约为 2 μA 的最大测量光电流，光电二极管的输入功率估计为 20 μW 。

我们的结果表明，通过外延生长 1.3 μm 激光器，光电探测器和波导的单片集成，光学通信链路可以在 (001) 硅衬底上形成，而这种衬底是所有 CMOS 电路的平台。本技术的下一步开发可能会包括光调制器的引入，以及基于硅晶体管的激光器和探测器偏置电路。虽然我们技术的主要应用是硅芯片上的光通信，但它也可以应用到未来的光电和生物医学中。OS

扩展阅读

- A. W. Fang et al. Opt. Express 14 9203 (2006)
- T. Frost et al. Nano Lett. 14 4535 (2014)
- S. Wirths et al. Nat. Photonics 9 88 (2015)
- A. Hazari et al. Appl. Phys. Lett. 107 191107 (2015)
- A. Hazari et al. Appl. Phys. Lett. 109 191102 (2016)
- A. Hazari et al. IEEE J. Quantum Electron. 53 (2017)
- A. Hazari et al. IEEE Photonics Technol. Lett. 29 1751 (2017)
- L. Yan et al. J. Electron. Mater., 1 (2017)

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	BC
EDI CON China	电子设计创新大会	www.mwjournlchina.com/edicon	1
electronica China 2019	2019 年慕尼黑上海电子展	www.electronicachina.com.cn	15
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	11
IQE		www.iqep.com	IFC
SEMICON China 2019		www.semiconchina.org	IBC

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)
Sunnies Zhao (赵雪芹)
sunniesz@actintl.com.hk

Sales Director (销售总监)
Steven Gan (干辉)
steveng@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)
jennyli@actintl.com.hk
Gavin Hua (华北平)
gavinhu@actintl.com.hk
Tel: 86-755-2598 8571

Shanghai (上海)
Hatter Yao (姚丽莹)
hatterya@actintl.com.hk
Amber Li (李歆)
amberli@actintl.com.hk
Linda Li (李承珍)
lindali@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
86-27-5923 3884/1564
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)
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

跨界全球 · 心芯相联

CONNECT · COLLABORATE · INNOVATE

全球高规格的产业聚会

SEMICON China 历经持续增长, 已连续7年成为全球最大、影响面最广的集技术、产业、投资于一身的半导体产业盛会, 吸引了全球半导体产业精英汇聚上海。

前沿技术的研讨平台

SEMICON China 是一个全球合作交流、拓展商机的理想社交平台。与展会同期举办多场高端论坛和技术研讨会, 探讨全球产业趋势、前沿技术和市场机会。



中国半导体发展的历史见证者

作为中国半导体30年的合作伙伴, SEMICON China 见证了中国半导体产业的茁壮成长、加速发展的历史, 也必将为未来的强盛壮大作出贡献。

半导体产业盛会

行业观众预计逾100,000人, 展览面积逾80,000平方米。

SEMICON China 2019 同期会议

功率及化合物半导体国际论坛

开幕主题演讲

SIIP China: SEMI产业创新投资论坛

先进制造论坛

先进封装论坛-异构集成

智能汽车论坛

2019中国显示大会 — 新兴显示论坛

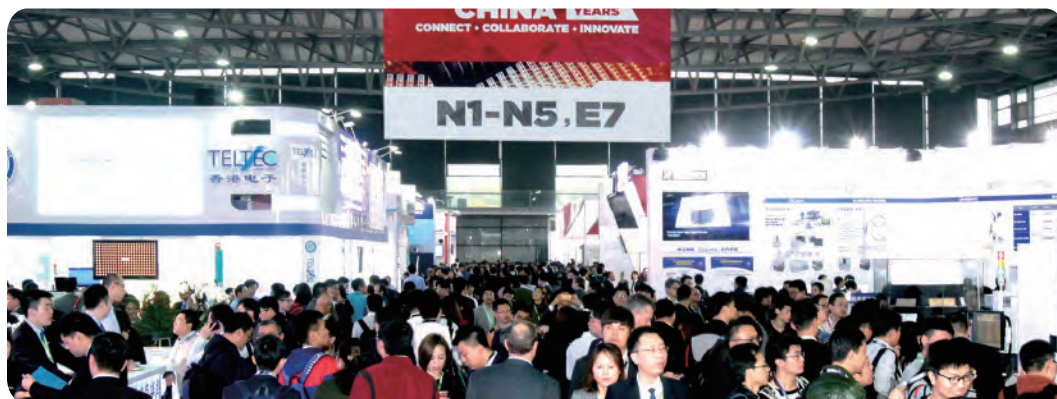
MSIG人工智能与物联网论坛

存储器发展论坛

智能制造论坛

绿色厂务科技论坛

新技术发布会



关注 SEMIChina 官方微信
即刻完成 SEMICON China
观众预注册

Contact

Customer Service
SEMI China

Tel: +86.21.6027.8500
semichina@semi.org

www.semiconchina.org



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.

