

化合物半导体

COMPOUND SEMICONDUCTOR • CHINA

季刊 2015年 第1期

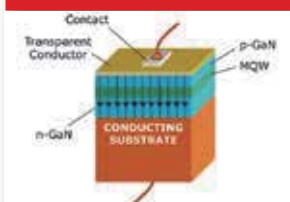
太赫兹晶体管生长



聚焦GaAs和GaN



LED制造



多结太阳能电池



高性能GaN晶体管



紫外 LED

制造明亮而廉价的紫外 LED
要比制造蓝光 LED 更具挑战性

ACT

www.compoundsemiconductorchina.net

AIXTRON
Our technology. Your future.

您认为,

AIXTRON 的系统应该提供
给您最佳的生产拥有成本。

我们也这么认为

新系统 AIX R6



探索新系统AIX R6

彻底改变一个行业不是改变一切, 而是使好的变得更好
介绍: 新系统AIX R6
它拥有业界技术领导者所期望的一切
及更好的使用便捷性, 更大的产量和更佳的生产成本。

AIXTRON SE · info@aixtron.com · www.aixtron.com



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国际通过它的一系列产品—包括杂志和网上出版物、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国际的产品包括十种技术杂志和相关的网站，以及各种会议，服务于半导体制造、化合物半导体、光伏/太阳能、电子制造、污染控制、激光/光电子、光通信、LED技术、射频/微波等领域的十多万专业读者。ACT国际亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT国际总部在香港，在北京、上海和深圳设有联络处。

香港
852-28386298

深圳
86-755-25988571

上海
86-21-62511200

北京
86-10-67484833



ACT Media Group



化合物半导体



目录

季刊 2015年第1期 2015年3月6日出版
Quarterly 2015 - Issue 1 6 March 2015

Contents

封面故事 Cover Story

7

制作更明亮更廉价的紫外LED
Building brighter and cheaper UV LEDs

制造明亮而廉价的紫外LED要比制造蓝光LED更具挑战性，但是如果在硅衬底上生长光子器件结构，并采用一个透明接触层及反射电极，就可以成功实现这一目标。

- H. Hirayama, 日本理化学研究所 (RIKEN)

技术 Technology

12

加快LED制造业采用GaN衬底的进程
Accelerating adoption of GaN substrates for LED manufacture

GaN LED遇到的一个主要技术瓶颈是必须要使用“非本体” (non-native) 的衬底材料。在高质量垂直LED结构生产中，通过化学剥离工艺来回收和重新利用“本体” GaN衬底，有望成为一种极具成本竞争力的方法。

- David Rogers, NANOVIATION公司

16

硅上GaN功率电子器件的改进
Perfecting GaN-on-silicon power electronics

单纯从工作性能上判断，硅材料要逊色于如SiC和GaN等其他宽禁带半导体材料。将硅材料转换到GaN材料就可制造出兼有低导通电阻和低寄生电容的半导体器件。加入稀土元素氧化物可以提高半导体材料的质量、降低晶圆的弯曲度，从而提升晶体管的性能。

- David Williams, Andrew Clark, F. Erdem Arkun, Rytis Dargis; TRANSLUCENT公司

市场 Market

4

太赫兹晶体管生长
Growing the terahertz transistor

5

聚焦GaAs和GaN
Focus on GaAs and GaN

科技前沿 Research Review

25

界面失配位错可能不再会制约绿色激光器性能
Green lasers may thrive with interfacial misfit dislocations

26

晶圆键合为提升太阳能电池效率提供新途径
Wafer bonding offers a route to higher efficiency solar cells

27

GaN：制造性能更好的晶体管
GaN: Building better transistors

3

编者话 Editor's note

28

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

About Compound Semiconductor China

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

关于雅时国际商讯

雅时国际商讯(ACT)成立于1998年，为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品—包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动—为跨国公司及中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括十种技术杂志和相关的网站，以及各种会议、服务于半导体制造、化合物半导体、光伏/太阳能、机器视觉设计、电子制造、洁净及污染控制、激光/光电子、LED技术、射频/微波、电磁干扰与兼容等领域的十多万专业读者。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、上海和深圳设有联络处。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 ten technical magazine titles and related websites plus a range of conferences serving more than 100,000 professional readers in fields of semiconductor manufacturing, compound semiconductor, PV/solar energy, vision system design, electronic manufacturing, contamination control, laser/photronics, LED technology, RF/microwave 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 and Shenzhen. www.actintl.com.hk

www.compoundsemiconductorchina.net



编者话 | Editor's Note

紫外LED市场加速发展？

Yole Développement 最近发布题为“紫外 LED - 技术、制造和应用趋势 (UV LED – Technology, Manufacturing and Application Trends)”的报告，详细叙述了传统紫外灯业务将如何向新兴的紫外 LED 技术发展过渡。报告认为，在 2008-2019 年期间，传统紫外灯和紫外 LED 这两种技术将此消彼长，逐渐平分市场。由于紫外 LED 小巧紧凑，成本低，而且是高效冷光源，比传统紫外灯具有许多优势，因此，紫外 LED 技术将会在蓬勃发展的紫外线固化 (UV curing) 业务方面大显身手，替代现在的紫外汞灯固化技术。事实已表明，用户对于更便宜和更紧凑小巧的 LED 技术非常有兴趣。

“2008 年整个紫外 LED 市场只有大约 2 千万美元，预计在 2014 年会增长到约 9 千万美元，复合年增长率为 28.5%”，Yole 公司 LED 业务部门经理 Pars Mukish 解释道。这样的增长可能继续，因为紫外 LED 固化技术会扩展到油墨、粘合剂和涂料等行业。Pars Mukish 说：“目前紫外 LED 市场收入大部分来自消毒和净化这样的短紫外应用，预计紫外 LED 市场会从 2014 年的 9 千万美元到 2019 年增长至约 5.20 亿美元。”这是只考虑市场的标准应用，就是紫外 LED 代替紫外线汞灯。

Pars Mukish 补充：“潜在的市场可能更大，如果我们考虑到紫外 LED 能够开拓全新应用领域，比如一般照明、园艺照明、生物医学设备和控制战地医院感染。”这些只是紫外 LED 潜力应用的皮毛，对市场还没有产生强大的影响。Yole 预计，到 2019 年，这些应用可能会占紫外 LED 总体市场规模的近 10%。

Yole 自 2008 年开始调查紫外 LED 技术和市场。该公司强调：“当时开发和制造紫外 LED 的公司不足 10 家。”自那时以来，已经有超过 50 家公司进入这个市场，其中 2012-2014 年间就超过 30 家，大多是中小企业，主要是被高利润率所吸引。

最近可见光 LED 行业的一些大公司 - 像 Philips Lumileds 和 LG Innotek - 也进入了紫外 LED 领域，并且在紫外 LED 业务方面获得进展。根据 Yole 的分析，基于在他们可见光 LED 行业的强大经验，这两个巨头的进入将有助于进一步发展紫外 LED 行业、市场和技术。比如他们几乎已经完成向 6 英寸蓝宝石衬底工艺的全面过渡，相比 2 英寸衬底工艺，至少可以提高整体生产率 30%，这将有助于进一步降低制造成本。

未来 LED 市场可能被划分为两部分，一部分是面向通用照明的可见光 LED，另一部分是以高科技创新为特色的紫外 LED。目前，LED 行业大部分投资都涌入了蓝绿光领域，过度的投入使 LED 蓝绿光市场迅速变成红海，而紫外 LED 市场还是一片蓝海，其广阔的市场前景，成为继半导体照明 LED 之后，全球 LED 研究与投资的新热点。近期一些知名的可见光 LED 大厂相继进入紫外 LED 领域，可能会加速紫外 LED 行业的发展成熟。

赵雪芹

www.compoundsemiconductorchina.net

化合物半导体

COMPOUND SEMICONDUCTOR · CHINA

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

编辑 Editor

李晓玲 Greta Lee
gretal@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

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



© 2015 版权所有 翻印必究



太赫兹晶体管生长

在石墨烯上生长 GaN 薄膜对于制造太赫兹频率晶体管至关重要，美国海军研究实验室的研究人员最近在这一技术方面获得了突破，使他们朝着制造应用于太赫兹频率的热电子晶体管这一目标又前进了一大步。

美国海军研究实验室（NRL）的研究人员声称，他们已在世界上率先在石墨烯上成功地生长出了高质量的 GaN 薄膜，这对应用于太赫兹（THz）频率的热电子晶体管（HET）开发来说是迈出了关键性的一步。

他们采用了 MOCVD 工艺在功能化的外延石墨烯上来生长 GaN 薄膜，它是形成在 AlN 成核层上，和在蓝宝石上生长的 GaN 薄膜相比具有相同的结晶质量。而且，NRL 的电子科学与技术部门的首席研究员 Charles Eddy 还指出，他的团队已经可以在 4 英寸衬底上用这种工艺来进行 HET 器件结构层的生长，将有望成为一种具有很高性价比的 HET 器件制造技术。

当热电子晶体管（HET）处于工作状态时，电子由于弹道隧穿效应快速穿越晶体管基区和集电区结构层，使得 HET 在高频和高速电流开关应用方面有着巨大的发展潜力。然而，现在最为先进的 HET 包含有金属或者重掺半导体的基区结构层，它会阻碍电子的运动，从而限制了器件的高速性能。

鉴于以上考虑，全球的研究人员正在研究将石墨烯作为一种基区结构层的替代材料，电子能快速穿越这种性能奇妙的基区材料层，使得器件的截止频率能够超过 1 THz。令人高兴的是，研究人员已经掌握了在 SiC 衬底上外延生长石墨烯层和沉积生长石墨烯层的方法。

虽然应用石墨烯材料可以解决许多问题，但它也会带来新的问题，正如 Eddy 所说：“石墨烯和任何其他二维材料一样，它在平面内有着良好的化学成键，但在平面外却不能形成良好的化学键。如果你想尝试直接在石墨烯表面来生长一种材料，如 GaN 材料层，实际上二者之间将不会形成任何原子间的成键链接”。

实际上，如果在石墨烯表面直接沉积 GaN 层，只会形成一个分立的 GaN 晶体层，而不是一个具有连续界面的薄层结构，而这样的石墨烯-GaN 界面状态最终将会影响到整个器件的性能。研究人员已经通过对石墨烯表面进行改性来解决这个问题，包括在其表面进行等离子体喷涂或引入一种纳米结构等办法。

然而，由 Eddy 团队率先进行的将高 k 栅介质和石墨烯相整合的表面改性工艺看起来可以解决这一问题。所谓的氟功能化方法包括了用氟化氙来对石墨烯表面进行掺杂，以形



NRL 研究团队率先采用在石墨烯上生长 GaN 来制作 HET

成碳-氟键，它将成为 III 族氮化物沉积生长时的成核点。

在这种成核点形成之后，Eddy 和他的同事们在生长 GaN 层之前先在功能化的石墨烯上沉积一个 AlN 缓冲层。Al 原子比 Ga 原子具有更高的成键系数，就像 Eddy 所说：“Ga 原子并没有像 Al 原子那么容易成键”。

但是这种表面改性也会伴随形成一个“链接扣 (hitch)”，这种半离子态的氟化键可链接到石墨烯表面并维持其原有的结构，但是这些键并不能承受传统 MOCVD 工艺所需的高温过程。

Eddy 说道：“离子键将将会使石墨烯的化学键断裂，从而破坏其电学性能”，“但是半离子键对温度非常敏感，因此在石墨烯上生长 III 族氮化物时，我们确实是需要一个低温的外延生长过程”。

鉴于这一考虑，NRL 的研究人员开发了一种低温原子层外延工艺，该工艺与 MOCVD 工艺相类似，采用了普通外延生长用的金属-有机物反应前驱体和氮气。

Eddy 说道：“我们使用了氮等离子体来提供活性氮，而不是使用 MOCVD 在高温下裂解氨气来产生所需的活性氮”。“活性氮与金属-有机前驱体在石墨烯表面发生反应，因此所有在表面上反应都是在一个非常低的生长温度下发生”，这使得 III 族氮化物的生长温度只有 280℃，大概只有传统 MOCVD 生长温度的一半。

Eddy 和他的团队使用了功能化石墨烯以及低温化外延方法，已经在 16mm² 的功能化外延石墨烯衬底上生长形成了 HET 结构。Eddy 说道：“采用 16mm² 衬底仅仅只是从经济性上考虑，而这种生长工艺很容易实现在衬底尺寸上的放





大”，“我们现在已可以在 4 英寸的衬底上来生长 HET 结构”。

NRL 研究人员同时也相信可能还只需一年的时间就可以成功地制造出 HET 原型器件。X 射线衍射分析表明石墨烯衬底上生长 GaN 的结晶质量可与在蓝宝石衬底上生长 GaN 相媲美，Eddy 断定他的团队还可以将它做得更好。

Eddy 还说道：“石墨烯和 AlN 间晶格失配度为 4.5%，这与 AlN 和蓝宝石间的失配度 13% 相比有了显著的减小”，

“有鉴于此，我们应该可以将其晶体质量提高到极致”。

因此，目前这个团队正在探索潜在的物理机制以进一步提高生长材料的质量，Eddy 说：“我们想要更明确地了解它的机理”，“我们的工作成果证明用这种方法来生长 HET 结构层是可行的，因而现在的问题是，我们能否通过良好的工艺控制来进一步提高生长材料的质量以及制备出具有更高性能的 HET 器件？”

聚焦 GaAs 和 GaN

据 Compound Semiconductor 杂志报道，来自军用市场的需求使 GaAs（砷化镓）市场蓄势待发，但是业界似乎更想避开来自 GaN（氮化镓）的强有力竞争。

随着全球军费开支每年增长 2.25%，到 2023 年军费开支将超过 2.1 万亿美元，因此 GaAs 芯片市场看起来非常稳固。

Strategy Analytics 公司分析师 Asif Anwar 近日在“2013-2018 年 GaAs 行业展望”（GaAs Industry Outlook 2013-2018）报告中预测：军用市场 GaAs 器件需求的增长率将是商用市场的 3 倍，其中最主要的是通信应用。这样高的增长率是由于起始水平相对较低，但是军用市场正在迎头赶上，包括 LTE、数据中心、IP 通信等技术方面。

正如 Anwar 所强调，今天的无线装置用户要求互联网接入、视频流、摄像等众多功能。而这些技术一定需要线性且高效的化合物半导体。

“GaAs 半导体器件是现在蜂窝手机中最先进的技术，在手机中通常采用多个 GaAs 功率放大器，使其可以在一系列不同的频带工作，”Anwar 说。“但从现在起，我们将看到这种 GaAs 技术会越来越多地应用在地面战士使用的手持终端设备中。”

GaAs 器件的第二个重要应用是雷达，雷达应用占 GaAs 军用市场收入的 60% 以上，预计未来仍将保持一段时间。

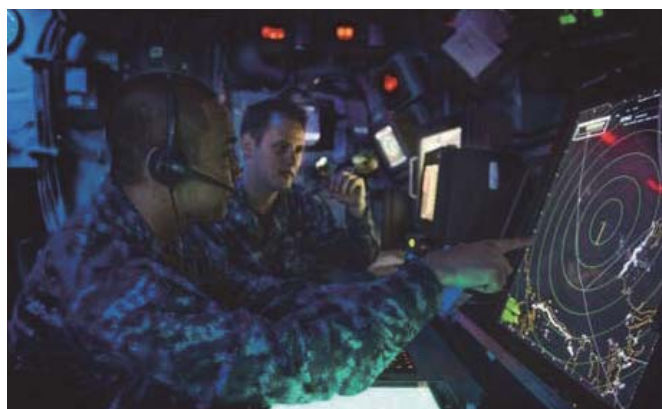
Anwar 说，GaAs 发射 / 接收 (T/R) 模块，在战斗机中作为有源电子扫描阵列雷达的现行标准，正在快速转移到不同的平台上。例如，海军和陆军雷达系统制造商正在转向这种固态技术来扩展其未来系统的能力。

例如，在一个海军雷达系统中，如果在一个快速喷气式平台上采用 GaAs 发射 / 接收 (T/R) 模块，可能会增加体积，但海军雷达系统可以非常大，需要多达 20000 个发射 / 接收模块。

Anwar 补充说：在使用无源电子扫描阵列的系统中要使用发射器，我们可以利用 GaAs 发射器替代传统 RF 技术的行波管。

为 GaN 开路

但是 GaN 器件会如何发展呢？从雷达到战术干扰机系



超过60%的GaAs军用市场收入来自雷达应用。（美国海军）

统，国防工业已经花了十多年时间开发 GaN 军事应用。

由于具有高功率密度和效率，该技术在高性能系统中明显带来好处，像 Raytheon, TriQuint, Northrop Grumman 和 Cree 等公司，都通过美国国防部项目为军方提供其制造的 GaN 产品。

“新的雷达系统将 GaN 作为首选技术，”Anwar 说。“例如，Raytheon 公司希望为爱国者雷达提供 GaN 产品，而空客公司防务安全部引入了 GaN-based TRS-4D 海军雷达。”

但是，正如 Anwar 所强调的：GaAs 系统制造商也不必担心。在同样方式下，TWT 技术一般支持多个雷达系统，将会工作在下一个十年甚至更久，GaAs 技术不会一夜被放弃。

首先，目前的军用平台，用于喷气歼击机或者海军舰船都拥有非常长的寿命。中年时进行升级可能会用 GaN-based 雷达系统取代 GaAs 技术，但这种情况可能至少需要 10 年时间。现在，即使是最新的平台也刚刚开始采用新兴的 GaAs T/R 模块。

根据 Anwar 的报告：使用 GaAs 的有源电子扫描阵列天线的新一代萨博“鹰狮”最新的战斗机，将于 2018 年进入服务。同样，欧洲“台风”喷气式战斗机的雷达也计划升级采用 GaAs 技术。

“我的理解是欧洲战斗机的雷达是一个模块化的设计，所以当其进行中年平台升级时，它的 GaAs 雷达将逐步被最新的 GaN-based T/R 模块替代，”Anwar 说。“是的，GaAs 技术将逐步被 GaN 替代，但这个发展过程需要时间，我们不会看到 GaAs 军用市场一夜之间消失殆尽。”





www.EVGroup.com

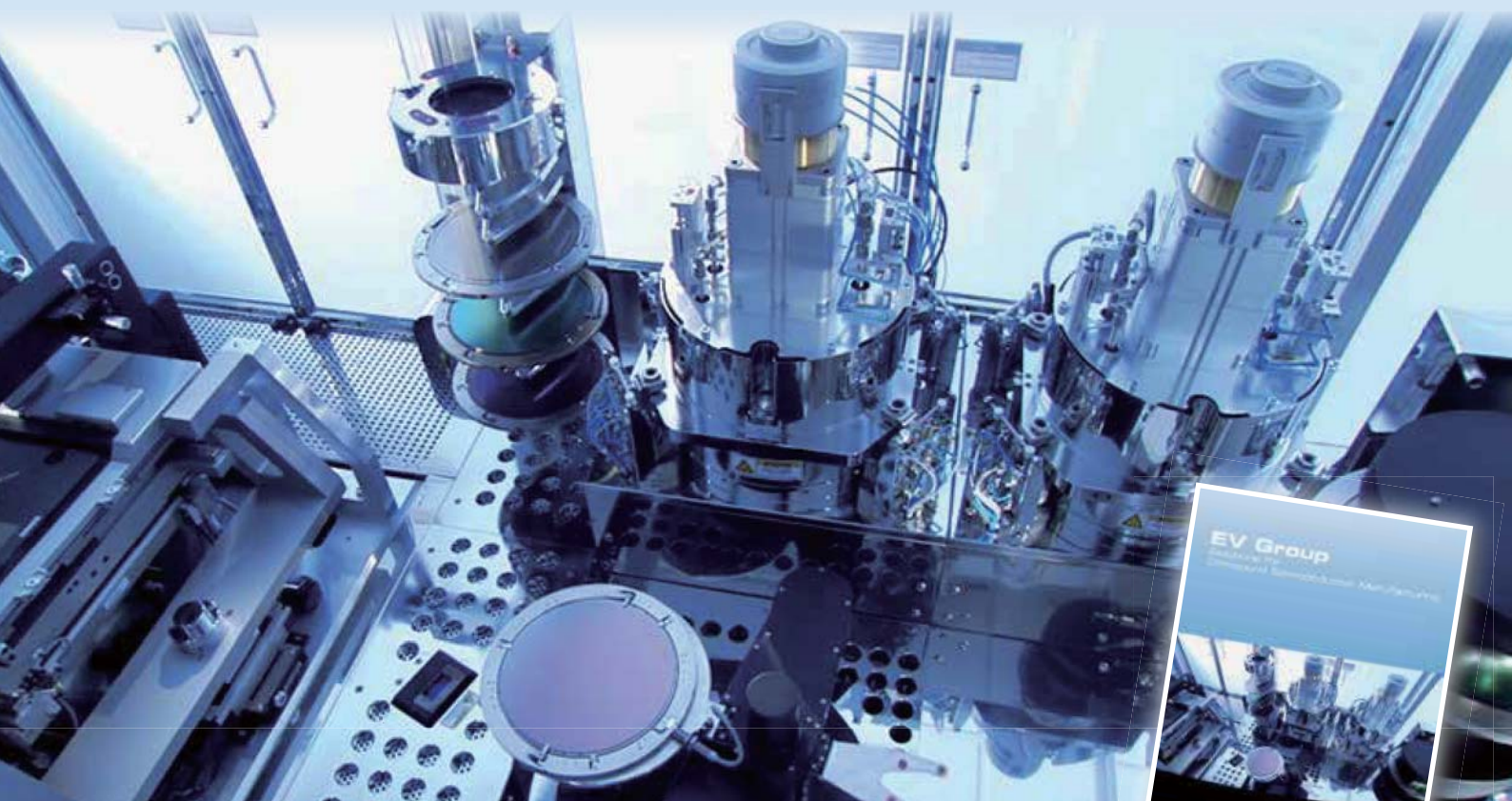
应用于化合物半导体工业生产的解决方案

应用于减薄的和易损的化合物半导体基片的临时键合和键合分离技术

应用于电解质，厚胶和薄胶以及高台阶的喷涂技术

应用于器件构图和高级封装的光刻技术

应用于键合介质层转移和高级封装的晶圆键合技术



如需了解更多产品信息以及下载产品手册，敬请登录 www.evgroup.com/compoundsemi



制作更明亮更廉价的 紫外 LED

制造明亮而廉价的紫外 LED 要比制造蓝光 LED 更具挑战性，但是如果在硅衬底上生长光子器件结构，并采用一个透明接触层及反射电极，就可以成功实现这一目标。

作者：H. Hirayama, 日本理化学研究所（RIKEN）

氮化物基 LED 的性能在不断的提高，从而打开了一个有利可图的新市场。当它点亮了平板电脑的屏幕以及作为手机屏幕的背光源时，这类 LED 芯片每年的销售收入就已经达到了 10 亿美元。就在最近，随着这种固态光源在液晶电视、平板电脑和台式电脑显示屏上的广泛应用，其出货量产生了飙升，而且 LED 现在也开始应用于照明领域，将会逐渐取代普通的白炽灯和荧光灯。

LED 所面临下一个大的挑战就是如何在波长

约为 280nm 及以下的深紫外（DUV）光谱区（见图 1）来复制其在蓝光区的性能，蓝光 LED 可以通过其芯片发光和黄色荧光粉的组合而转变为白光。固态光源在紫外光谱波段的光发射可以代替汞灯来用于杀菌，汞灯用于杀菌不是很理想，因为它不是单色发光，而且还会产生热量。紫外 LED 芯片可发射波长为 270nm 的单色紫外光，将是用于杀菌的理想紫外波长，可以解决上述汞灯的两个问题并可在家庭中使用，可用于如冰箱、水和空气净化器、空调、足疗系统和真空吸尘器



封面故事 | Cover Story - 紫外 LED

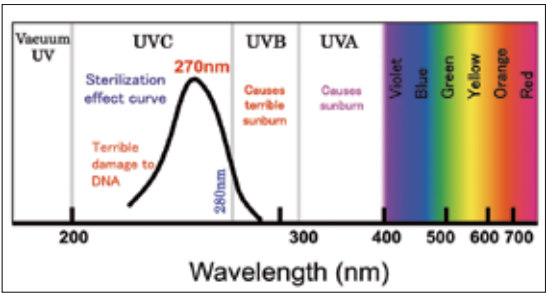


图1. 紫外光谱可分为长波紫外 (UVA)，中波紫外 (UVB)，短波紫外 (UVC) 和超短波真空紫外4个波段。波长为270nm的中波紫外线可用于灭菌，因为它可对DNA造成破坏。

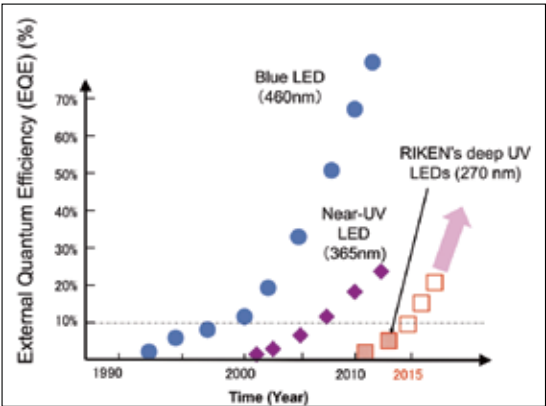


图2. LED在深紫外波段的发光效率显著地低于其在蓝光波段的发光效率。

等家用电器中。此外，紫外 LED 还可以用于食物的运输，使得纸币更难以伪造，并且应用于医院或大机构的灭菌设备中，比如办公大楼中的水箱和空调等。

紫外固态光源还有其它方面的商业契机，它可以用于如皮肤护理等的医学治疗，对污染物进行快速分解，高保真色调的照明，以及成为新一代高密度光存储器件的核心部件等。

但是，为了能真正进入这些颇有发展前途的市场，就需要明显提高在 280nm 及以下紫外波段 LED 的发光效率（见图 2）。早在 2010 年，就有一些研究团队报道了发光效率超过 1% 的深紫外 LED，最近已经有了 5% – 14% 发光效率的报道（见图 3）。如果这样的改进速度能够得到保持，那末在 2015 年就将开启这一深紫外 LED 器件的市场。

我们日本理化学研究所（RIKEN）位于日本东京的近郊，是这种深紫外 LED 器件领域处于业界前沿的开发者之一。通过和松下公司的合作，我们正在研究发光效率超过 2%、工作寿命超过 10000 小时、270nm 发光波长的深紫外 LED，并即将进入市场。

在我们的实验室里，这种类型的 LED 的外量子效率（EQE）达到了 7%。根据 2013 年氮化物半导体国际会议（ICNS-10）的报道，如 Crystal IS 公司在单晶 AlN 衬底上制造的深紫外 LED 的 EQE 约为 7%，UV Craftory 公司和 Sensor 电子技术公司的 EQE 则分别可达到 14% 和 11%。与他们的结果相比，目前阶段我们 LED 的 EQE 还稍落后于业界的最先进水平。但是，我们已经有了一个研究计划，来使我们在未来能够赶上和超过这些 LED 业界的领先者。

降低螺旋位错密度能使 AlGaIn 量子阱的内量子效率（IQE）提高到 60% 以上。而 InAlGaIn 量子阱的内量子效率值可能会更高，这是由于在四元合金中存在的钢的偏析效应，我们估计其 IQE 将会超过 80%。偏析效应会使载流子产生局域化，这将抑制非辐射性的载流子复合。通过引入一个多量子势垒和电子阻挡层来增加电子的注入效率，就可以进一步地提高深紫外 LED 的性能，上述这种电子阻挡层结构对于发射波长在 250nm 以下的深紫外 LED 特别有效。

外量子效率（EQE）能够达到 7% 已经很不容易，因为这需要对器件进行诸多方面的改进才行，包括对器件的内量子效率（IQE），电子注入效率和光萃取效率等，对这三者的整合结果将决定一个 LED 器件的 EQE 数值。

现在，我们在 LED 的设计中采取了一系列具有根本性的改进措施，以获得两位数的器件外量子效率（EQE），比如在一个 AlN 六棱柱体阵列上来制作 LED 器件。此外，我们已经开始进行一个项目，通过在硅衬底上来生长 LED 器件结构以进一步降低深紫外 LED 的成本。

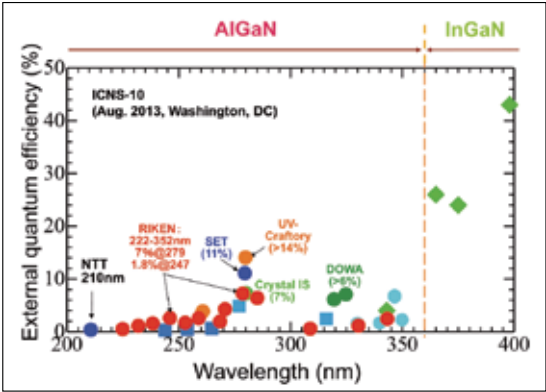


图3. 包括美国的Sensors 电子技术公司和Crystal IS公司，以及日本的UV Craftory和理化学研究所（RIKEN）在内的一些具有业界领先水平的紫外LED研究者，在2012年的氮化物半导体国际研讨会（WNS）和2013年的氮化物半导体国际会议（ICNS）上报导了他们对LED器件外量子效率（EQE）的研究结果。

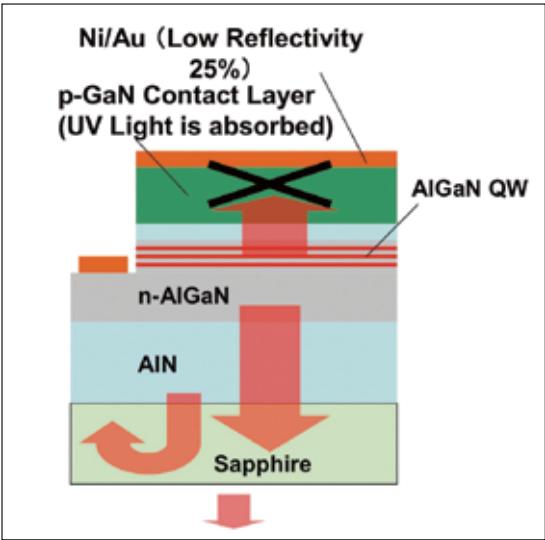


图4.为了提高对光的高效率萃取，深紫外LED需要具有一个与蓝光LED明显不同的体系结构。传统的p-型GaIn接触层会吸收紫外光，部分的紫外光还会在AlN—蓝宝石和蓝宝石—空气界面产生反射而重新返回到器件中。

提高内量子效率

从 2006 年到 2010 年期间，我们的工作是要努力提高我们器件的内量子效率（IQE）。我们从低于 1% 的 IQE 开始，通过改进材料的质量来提高效率，其关键是在蓝宝石衬底上制作一个具有低螺旋位错密度的 AlN 缓冲层，它是通过氨气脉冲气流经多层生长后形成。我们采用这种沉积技术已经生长出了具有原子级平整表面的 AlN 层，并且其螺旋位错密度仅为 $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。

尽管有了这些明显的提高，但是由于器件的光萃取效率还较低，使得其输出功率仍然很低。这里存在着两个方面的原因：量子阱朝着芯片上表面方向的发光会被 p-GaN 接触层所吸收；由于蓝宝石—空气和 AlN—蓝宝石这两个界面两边材料的折射率都有着明显的差异，使得大部分朝向衬底的发光又会被反射回到器件中（见图 4）。所有这一切造成的后果是光的萃取效率被限制在仅有 8%。

为了解决芯片深紫外发光会被 p-GaN 接触层吸收的问题，我们改用了一种 p-AlGaIn 透明接触层（见图 5）。仅进行这样单一的调整就可以将光的萃取效率提高到 40% 以上，但这是以降低空穴的注入效率为代价的。当采用较高含量铝的 p-AlGaIn 时，具有深受主能级的镁掺杂会将空穴浓度限制在 10^{15} cm^{-3} 以下。这就意味着当我们采用较高铝含量的 p-AlGaIn 接触层来制造 265nm 深紫外 LED 时，器件的外量子效率（EQE）并不会比之前的要高，但是也没有明显的变小。在下文中将可以看到我们已经掌握了制造更明亮紫外

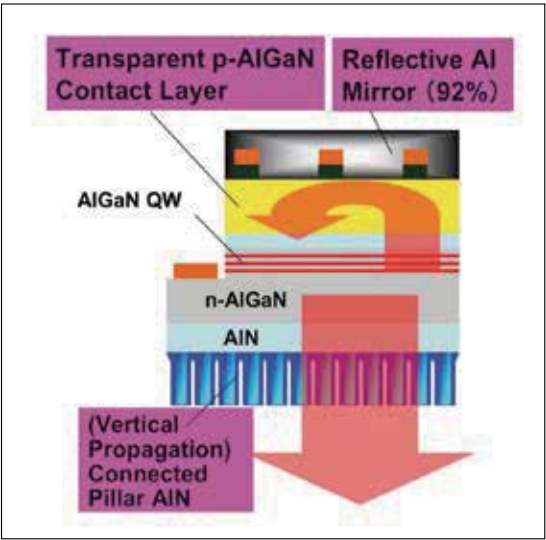


图5. 深紫外LED的光萃取效率可以通过以下方式进行改进：将接触层材料由p-GaN改换成对深紫外光是透明的p-AlGaIn；采用在深紫外波长范围有着高反射率的反射镜；将器件制作在AlN六棱柱体阵列上，由它来传输并导出芯片的深紫外光发射。

LED 器件的关键所在。首先要确定什么才是合适的 p-AlGaIn 波长组分，我们将波长从 290nm 变化到 270nm，对应于铝组分含量将从 48% 增加到 60%。这一简单的研究表明铝含量高达 60% 的 p-AlGaIn 可用来作为深紫外 LED 的接触层材料（见图 6）。

我们还进行了另一组实验来对这种铝含量的选择进行了验证，在该实验中我们将 p 型 AlGaIn 的组分波长固定在 270nm，其对应的铝含量是 60%，并将量子阱的发射光波长从 265nm 变到 282nm。实验表明，270nm 光发射波长的 p-AlGaIn 接触层对大于 280nm 波长的紫外光发射是透明的。这个特定实验的最后一步是解决用 p-AlGaIn 来替换 p-GaN 后所产生的空穴密度下降问题，我们通过增加一个具有更高性能的电子阻挡结构来对此进行补偿：即采用一个具有较高铝含量的 AlGaIn 层，再加入一个多量子势垒的高性能电子阻挡层。我们所面临的另一个问题是衬底会将发射光反射回器件中，这也已经通过加入一个具有高反射率镜面的 p 型电极的新器件结构而得到了解决。我们为什么要这样做，而不是简单地改换成一个透明电极呢？原因在此，虽然那对于蓝光 LED 是一个很好的方法，因为它可以采用透明的 ITO 电极层，但是目前还没有任何一种材料能满足在深紫外光波段作为透明电极层的要求。

一个用于制造反射镜面的候选材料是铝，它在超紫外波段（280nm 到 100nm）有着 92% 的反射率。但是铝在 p 型 AlGaIn 层上不能形成 p 型

封面故事 | Cover Story - 紫外 LED

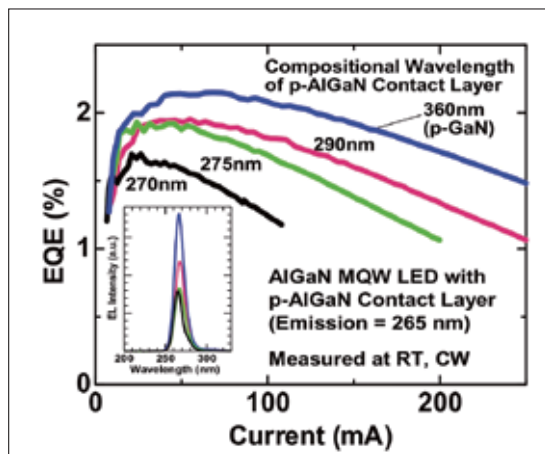


图6.降低AlGaIn的铝含量不会对EQE有很大影响,这表明AlGaIn层与GaIn层相比有着更小的光吸收,使得改进后的器件结构有着更高的发光效率。p-AlGaIn的缺点是具有较低的空穴密度,但是这个缺点可以通过一个性能更好的电子阻挡层来进行补偿。当RIKEN研究人员采用这种技术路线后,器件的EQE会远高于以往。

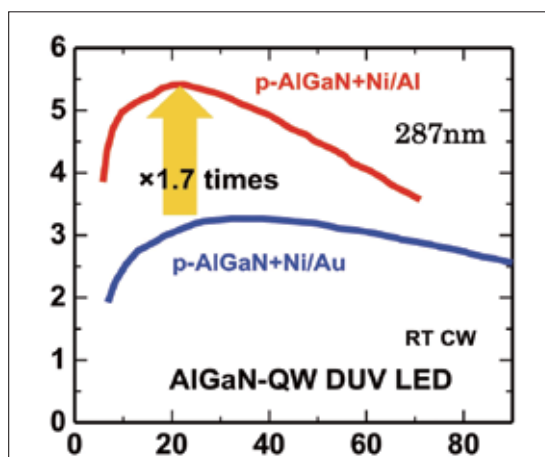


图7. 为了使深紫外LED的EQE能从3%提升至5.5%, RIKEN研究人员采用了p-AlGaIn接触层,并将Ni/Au接触层改成采用Ni/Al接触层。

的欧姆接触,所以我们首先插入了一个亚纳米级厚度的镍层。这种组合层的反射率是64%,这已经远远超过了传统的镍-金组合,它们的反射率仅有30%。需要注意的是,对高反射率p型接触层的另一种选择可以是采用网状电极图形。如果我们决定走这条路,我们将需要在电极下方插入一个p型AlGaIn空穴扩展层,它具有一个短周期的超晶格结构。这个结构也有助于器件能经受约为5V的正向电压,这也是采用p-AlGaIn来替代

p-GaN的结果。

将原先的p-GaN层改换成p-AlGaIn层,还增加一个高反射率的接触层,我们的这一努力到了回报。采用了新的阻挡层以及换成p-AlGaIn接触层使得器件的外量子效率(EQE)约提高了50%,而且采用透明p-AlGaIn接触层和高反射率p型电极使得其EQE又进一步提高了70%(见图7)。

提高光萃取效率

要进一步提高LED光萃取效率的途径是引入光子纳米结构,比如二维光子晶体或者虫眼(moth-eye)图形结构。我们正在研究采用这种途径的可能性,在我们器件的下方插入一个互联的AlN六棱柱体阵列缓冲层。AlN柱体阵列可以允许光线沿着柱体阵列垂直传播,将可以提高器件的发光效率,而且它也提高了材料的质量,因为AlN棱柱体中的螺旋位错密度应该是非常低的。

我们在这一方向上的工作是从经图形化的蓝宝石衬底开始,然后通过控制V/III族化合物的元素比和生长温度,以在蓝宝石衬底上形成互联的六角形AlN柱体(见图8)结构。为了降低这种柱体结构中的螺旋位错,在AlN柱体的初始生长阶段采用了脉冲氨气流的方法。一旦这个柱体阵列开始形成,我们就开始降低V/III族化合物的元素比率,以使得这些柱体相互联接并合并,来形成一个平坦的表面。根据透射电子显微镜(TEM)所提供的横截面可知,在这些柱体结构中其螺旋位错密度是很低的。

这些相互联结的柱体成为了265nm LED的基底,在其上制作LED的连续输出功率可达5mW以上,外量子效率(EQE)约为百分之几。这项工作目前还处于起步阶段,我们知道一旦我们对AlN柱体缓冲层的表面粗糙度进行优化后,我们器件的EQE将会有很大的提高。我们预计,将透明的p-AlGaIn接触层和AlN柱体阵列缓冲层相结合,我们的深紫外LED的EQE将可以提高百分之几十。

硅衬底

对于紫外LED而言,硅是一种非常具有吸引力的衬底材料。因为硅很便宜,可以获得尺寸很大的硅衬底,并且只需用湿法化学腐蚀方法就能很容易地将硅衬底与LED外延结构层进行剥离。这种剥离步骤是十分必要的,因为硅衬底会吸收器件的光发射,而且只有把它被移除掉,才

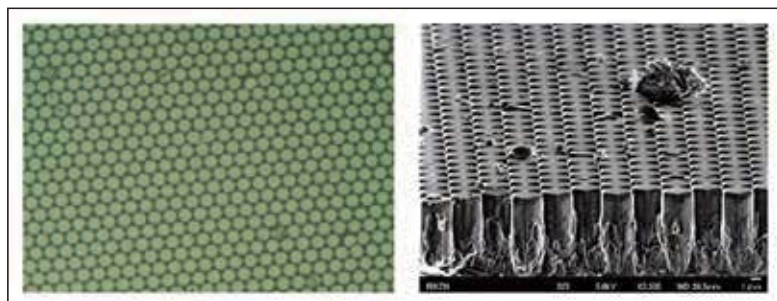


图8.在经图形化的蓝宝石衬底上通过氨气脉冲气流方法来生长AlN六棱柱体阵列。

有可能制造出垂直型的 LED 器件。在蓝宝石衬底上也可以用这种结构来制造 LED，但是蓝宝石衬底必须通过激光剥离方法才能移除，将会对器件材料层造成损伤。

我们开发了一种在硅衬底上制作深紫外 LED 的制造工艺（见图 9 的器件结构）。它包括在硅衬底上进行的 AlGaIn LED 结构生长，再将硅衬底晶圆键合到一个散热基片上，随之将硅晶圆移除，然后是 AlN 的干法刻蚀并形成网状电极。应用这种制造方法的最大挑战是要在硅衬底上生长出无裂痕缺陷的 AlN 层，因为这两种材料在热膨胀系数上有着显著的差异。我们解决这一问题的方法是采用脉冲氨气流的生长方法在硅衬底上形成一个 AlN 缓冲层。只要缓冲层的生长厚度在 $1\mu\text{m}$ 以内，我们就能获得具有低螺旋位错密度的、无裂纹缺陷的 AlN 薄层。这将为在硅衬底上进行各种深紫外 LED 结构的生长提供一个工艺平台，这种 LED 具有 InAlGaIn 量子阱，并能产生 284nm 到 300nm 波长范围的紫外光发射。

我们还探究了通过横向外延生长在硅衬底上沉积无裂纹缺陷 AlN 薄层的方法。同样地，我们先采用氨脉冲气流方法在硅衬底上沉积一个 AlN 薄层，然后在这种二元复合体上刻蚀出条纹状图形，最后生长 ELO 层。用这种方法我们在硅衬底上形成了具有低螺旋位错密度、厚度为 $3\mu\text{m}$ 的 AlN 缓冲层。采用上述方法制作了一系列深紫外 LED，其 AlGaIn 量子阱的光发射波长在 256nm 和 278nm 之间。

我们现在正在计划开发一种去除衬底后的垂直型的深紫外 LED，这种器件可以在低电压下工作并具有高的光萃取效率，这将有助于紫外 LED 能拓展到更多的应用中，这些应用将受益于一个更加便宜的便携式固态紫外光源。

RIKEN 的量子级联激光器 (QCL)

RIKEN 研究所除了研发了 220nm 到 350nm 波长的深紫外 LED 以外，我们这一处于业界领先的研究机构还开展了有关太赫兹 (terahertz) 量子级联激光器 (QCL) 的研究项目。

这个项目一个显著的成就是所研制的激光器创造了稳定运行下的最高工作温度记录，可激发出 2-4 THz 范围的激光。由于采用了新颖的量子级联结构，研究人员制作了一个可以在 1600K 温度下工作的 1.9 THz 激光器件。

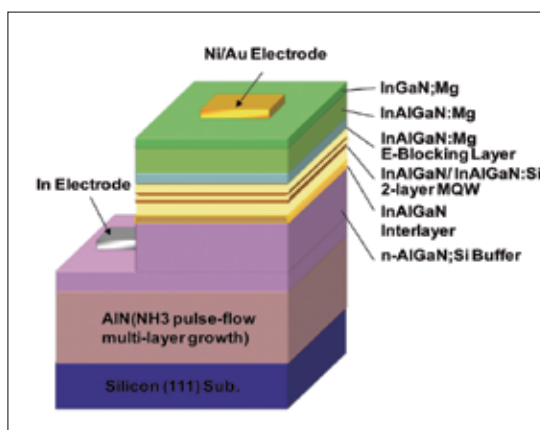


图9. 从采用蓝宝石衬底改为采用硅衬底有助于垂直LED器件的开发。要将外延叠层从蓝宝石衬底上进行剥离，就必须采用具有破坏性的激光剥离工艺，但是改用硅衬底后只需采用湿法化学腐蚀方法就可以制作形成一个LED原始芯片。

RIKEN 团队还开发了基于 GaN 和 AlGaIn 配对的 QCL，它们有望覆盖 5-12 THz 的频率范围，可以工作在相对较高的温度下，与此相比，早先的 GaAs 基材料系统由于声子的相互作用使其在该频率下的工作性能并不是很理想。

RIKEN 研究人员首先报道了通过从 AlGaIn 基 QCL 结构进行电流注入的方法来实现其自发射。该器件有源区含有 150 个周期的 GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N 基结构，可以发射出 1.37 THz 的激光。CS_C

New CS APP ready for Download NOW!

Continuing our aim of 'connecting the compound semiconductor industry', Compound Semiconductor has a Free app for Android, iPhone and iPad to allow you keep up to date wherever you are.

Available **FREE** from the App Store or Google Play, the app allows you to access:

- Latest Compound Semiconductor, CS China and CS Taiwan magazines
- Latest features
- Latest news and more...



For further information contact:
scott.adams@angelbc.com

www.compoundsemiconductor.net





加快 LED 制造业采用 GaN 衬底的进程

在高质量垂直 LED 结构生产中，通过化学剥离工艺来回收和重新利用“本体” GaN 衬底，有望成为一种极具成本竞争力的方法。

作者：David Rogers, NANOvation 公司

GaN LED 的商用化应用可以追溯到二十世纪九十年代的初期，当时在这种宽禁带半导体材料上成功地开发了 p 型掺杂技术。从那时起，这种器件的性能就呈现指数式的上升趋势，推动了它从移动设备屏幕的背光源到固态照明光源大范围应用的进程。然而，尽管 LED 光源现在已经随处可见，但是它在提升性价比的道路上仍然有很长的一段路需要走。到目前为止，基于真空灯泡传统照明技术依然处于主流，在市场占有着支配地位。

如今人们在 GaN LED 上遇到的一个主要技术瓶颈是必须要使用“非本体”（non-native）的衬底材料。目前大约有 95% 的 GaN 基 LED 是在 c-蓝宝石衬底上利用异质外延方法来进行生长的。这是因为理想的“本体”（native）GaN 衬底产量很小，并且价格极其昂贵。例如，一个 2 英寸的 GaN 衬底的价格将达数千美元，它只能主要用于激光器器件生产上。

蓝宝石材料要作为一种理想的 GaN LED 衬底距离还甚远，它的两个最大的缺点是它的晶格常数和热膨胀系数与 GaN 材料相比有着显著的差别。这将会在 GaN 外延层中引起应变，而应变又会产生点缺陷和位错，从而会限制了 LED 器件的光输出能力。

蓝宝石材料所具有的电绝缘特性是阻碍其用

于制造高性能 LED 的另一个障碍。蓝宝石衬底所具有的高电阻率使得 LED 器件不得不采用并非理想的横向结构，它具有一个顶部接触电极会使得它的横向电流受到约束。这样就会导致电流的拥挤效应和局部热点的产生，这些对于器件的发光效率、寿命和最大亮度都是不利的因素。

再加上蓝宝石材料具有热阻大的特性，这将会严重地阻碍热量的耗散，反过来又将会进一步限制了器件的发光效率、寿命和亮度。

一种新的替代结构平台

为了解决这些问题，高端 LED 芯片制造商所采用技术是将 GaN 基外延层转移到另一种具有优良电导和热导性能的衬底上。通常是通过激光剥离以及晶圆键合工艺来完成，即是将 LED 薄片结构从蓝宝石衬底上剥离下来之后再转移到另一种衬底上。激光剥离工艺是采用一束短波长的激光——通常是 KrF 准分子激光器发射的 248nm 激光——照射并穿过蓝宝石衬底到达 GaN 层，该激光将会被 GaN 中最初的 100nm 薄层所吸收，这部分 GaN 薄层将会被分解，而使整个 GaN 薄片结构能够从蓝宝石衬底上得以剥离释放。

然后将剥离后的 GaN LED 薄片键合在具有高电导和高热导性能的衬底上，此时 LED 器件整体就具有了更好的散热性能，并且可以形成垂直结构的 LED（VLED），使得其电流能贯通整个衬底（见图 1）。相比于传统横向结构的 LED，这种垂直结构具有更为均匀的电流分布，能使器件的驱动电流提高 25 倍。VLED 结构同样也避免了为形成顶部接触而必需采用复杂的、高成本的光刻工序，并且比传统横向 LED 结构至少能节约 30% 的占位面积，这意味着在每个晶圆上就可以生产

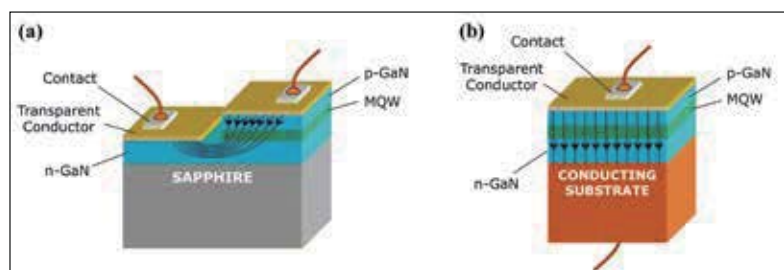


图1. 采用绝缘性衬底的横向LED结构 (a) 中其电流拥挤问题要远比其对应的垂直LED结构 (b) 更为严重。



出更多的 LED 芯片，使得器件制造商可以获得更大的收益。

除此之外，倒置型的器件结构可以增加对光的总体提取量，由于用激光对 GaN 表面进行了粗化处理，可以减少由于器件内部光的全反射而被约束在器件结构内的光。除此之外，经过对激光剥离烧蚀所留下的表面残留物在进行抛光去除后，该蓝宝石衬底还可以回收再次利用。然而，尽管激光剥离工艺有着种种的优点，但经剥离转移的 LED 结构的器件性能仍然会受到限制，其原因在于它是生长在具晶格失配蓝宝石衬底上，存在着初始外延层的质量问题。

这样看来似乎最佳的方案是在 GaN 衬底上直接生长 VLED 结构，因为这样可以获得非常高的晶体质量，之后再行激光剥离以实现昂贵的“本体” GaN 衬底的再次回收利用。但是此时将无法对这种 VLED 结构进行 GaN 外延层的激光剥离工艺，这是因为对于所必需采用短波长的激光来说，GaN 衬底对它来说并不是一种透明材料。

另一种引起了广泛重视的备选衬底材料是 ZnO，它不仅与 GaN 有着相同的晶体结构，并

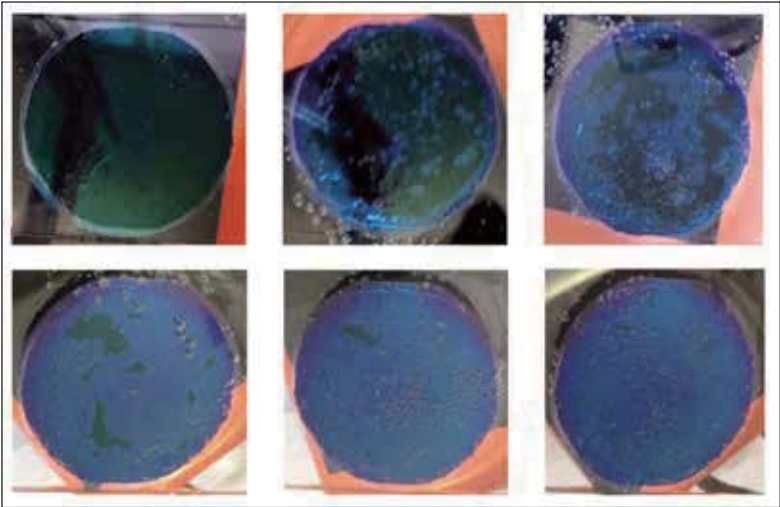


图2. 2英寸GaN/ZnO/蓝宝石晶圆（浸没在浓度约为1M 的HCl溶液中）的背面照片，显示出ZnO被化学溶解和逐步从衬底上去除的过程。

且还有着相似的晶格常数和比较接近的热膨胀系数，但是 ZnO 在化学特性上要比 GaN 更为活泼。

正因如此，很多研究课题组在尝试使用 ZnO 衬底时都遇到了问题，即在利用 MOCVD 工艺中所使用的气体来对 ZnO 进行背面刻蚀时都出现了问题。

然而，这并不是一个不能克服障碍，我们在

CONSOLIDATED
KNOW-HOW

evatec
process systems

oerlikon
systems

See us At Semicon China 18-20th March. Booth 3323

Evatec AG has acquired the Oerlikon Advanced Technologies Segment

From Wafer Level Packaging on 300mm, to damage free GaN processing for HBLEDs and advanced solutions in Touch Sensor manufacturing, Evatec’s process control know how brings higher yields, higher throughput and lower thin film production costs.

Choose from our extended range of batch, cluster and inline platforms.

EVAPORATION & SPUTTER SOLUTIONS FOR:
COMPOUND SEMICONDUCTORS • ADVANCED PACKAGING • NANOTECHNOLOGY • POWER DEVICES • MEMS • LEDs
More information at www.evatecnet.com

MORE INFO

www.compoundsemiconductorchina.net

化合物半导体 2015年第1期 13

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR · CHINA

广告索引
Ad Index

目录
Contents

推荐朋友
Refer a friend

免费赠阅
Subscribe

◀

🔍

⊕

▶

ACT

技术 | Technology – LED 制造

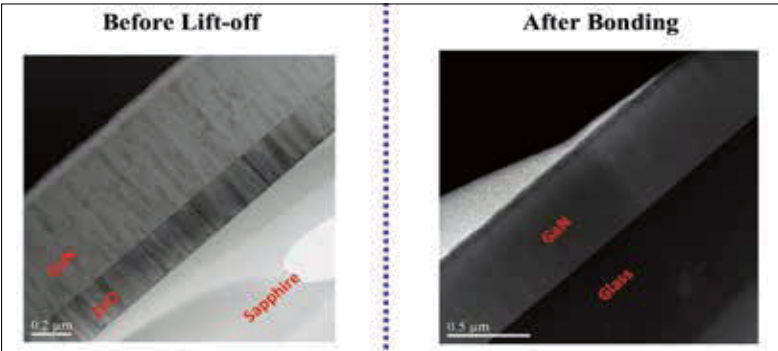


图3. 透射电子显微镜的截面图像，显示了用MOCVD方法在ZnO/蓝宝石衬底上外延生长GaN层的结构，它没有经过ZnO的背面刻蚀，在经过化学剥离和直接熔融键合后具有优异的GaN/玻璃的界面结构。利用高分辨透射电子显微镜的X射线能量色散谱微分析技术，显示在剥离下来的GaN层界面上并没有锌元素的残留痕迹。[授权: G. Patriarche, LPN, Marcoussis, France].

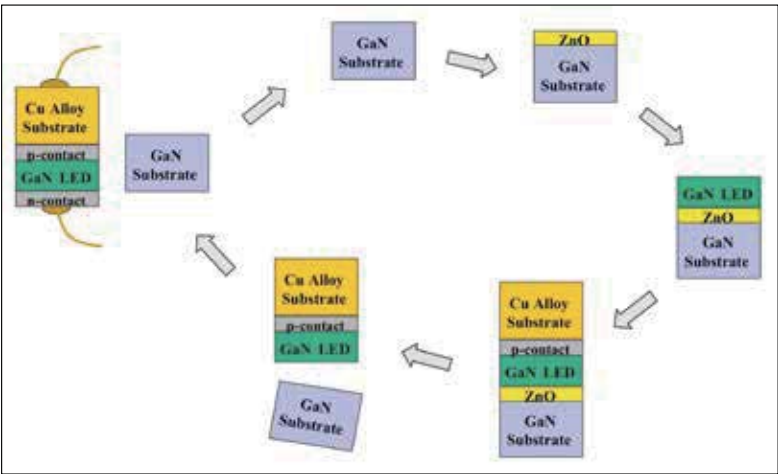


图4. 采用“本体”GaN衬底来制造垂直结构GaN LED，其成本可以利用化学剥离和再次回收利用的方法来得到削减。

法国 Nanovation of Châteaufort 的 ZnO 研究团队，与法国的 Georgia Tech 和 CNRS lab 的 Abdallah Ougazzaden 的 GaN 研究团队共同工作，已经解决了这个问题。

Nanovation 是一个专业生产 ZnO 外延片的公司，它是在 2001 年由四位科学家所创建，因为他们看到了 ZnO 在光电半导体器件的市场，即从透明导体、透明电子学到 LED、激光和光伏器件商业化应用中所显现的潜力。

为此，在半导体业界中我们开创了用脉冲式激光沉积作为生产手段的先例，这是因为脉冲式激光沉积在形成高质量 ZnO 层上有着独特的能力，几乎能在任意衬底材料上进行具有广泛性能范围 ZnO 的生长。

这种令人瞩目的对所沉积材料性能的调节能力是来自于在脉冲激光烧蚀流中某些具有特高能量的原子，它们的能量通常可高达 10-100 eV。而作为对照，在溅射过程中原子的能量只有 1-10 eV，而在另一些更为常见的半导体沉积方法，如

MBE 和 CVD 中其原子的能量只有 0.1-1eV。由于这种具有特高能量原子的作用，使得整个沉积过程可以在更低的温度条件下进行，同时也允许氧分压可以在很宽的范围中进行调节。氧含量对于氧化物基材料的性质具有决定性作用，这样使得氧的化学计量比可以在更大的范围内实现精确的调节和控制，而不需要考虑在材料质量上进行相应的折衷。

LED 结构

ZnO 之所以能适用于 GaN 基 LED 结构中，是在于可以将我们所开发的光电子级薄膜“伪衬底” (pseudo-substrate) 用来作为 GaN 进行再生长的模板。

在过去的几年中，Georgia Tech / CNRS 实验室已经开发出一种新颖的 MOCVD 方法，用 GaN 作为帽层覆盖在我们的 ZnO 外延层上，这样就免除了进行背刻蚀的需要。当 ZnO 层被 GaN 层封装后，不用破坏氧化层就可以在标准的 MOCVD 条件下直接生长 GaN LED 结构。

对在 ZnO 层上所生长的 GaN 层进行表征，显示它具有非常好的材料质量。在仅仅生长了 100nm 之后，GaN 层就呈现了光学上的活性，其表面的均方根粗糙度为 1 nm，与在蓝宝石衬底上直接生长同样厚度的 GaN 薄膜相比，具有明显更小的晶体色散。

这表明，如果在 LED 的生产中将衬底从蓝宝石改换成 ZnO/ 蓝宝石衬底，将可以使用更薄的 GaN 层，这对于输出光耦合和外量子效率的提升都将会益处。

然而，这并不是故事的终结。我们已经证明 ZnO 薄膜模板层最终还可以被用来作为 GaN 的化学释放牺牲层，可以用它来替代激光剥离工艺。它是基于 ZnO 底层具有的选择性化学溶解特性，这个释放过程仅需要几个小时的时间，可以利用一系列稀释的酸或碱溶液来完成——这是因为 GaN 对于除 HF 之外的各种酸和碱化学腐蚀有非常强的抵抗能力，但是 ZnO 却不具备这种能力 (见图 2，显示了一个完整的 2 英寸晶圆的化学剥离过程)。采用高分辨电子显微镜的 X 射线能量色散谱的微分析技术显示，所剥离下来 GaN 层的界面上没有锌元素的残留痕迹。

英国的 Heriot Watt 大学在另一种材料系统上进行了平行性的工作，该校的 Kevin Prior 研究团

下转第27页

Book your place at the

CS International Conference

Wednesday 11th & Thursday 12th March 2015

The compound semiconductor industry is developing and manufacturing new devices that will help to shape the world of tomorrow.

Limited
availability



This industry is currently debating a handful of key questions: -

- Multi-mode, multi-band PAs: friend or foe?
- How will the solid-state lighting evolution unfold, and what will it mean for the makers of LEDs and lasers?
- Are III-Vs going to make an impact in silicon foundries? And if they do, how long will this last?
- How can wide bandgap power electronics become more competitive to displace the current silicon incumbents?
- Where is the CPV industry heading?

To know what the leading industry insiders are thinking about these important issues, make sure you attend CS International.

Book your place NOW!

Sheraton Frankfurt Airport Hotel, Germany

Register: www.cs-international.net

CS INTERNATIONAL
CONFERENCE

Connecting, informing and inspiring the compound semiconductor industry

硅上 GaN 功率电子器件的改进

加入稀土元素氧化物可以提高半导体材料的质量、降低晶圆的弯曲度，从而提升晶体管的性能。

作者：David Williams, Andrew Clark, F. Erdem Arkun, Rytis Dargis；TRANSLUCENT 公司

据国际能源机构（IEA）的报告，电能在一级能源消耗中占据着 43% 这一惊人的份额，因而无论是从环保角度还是从经济角度，实现高效率电能转换的重要性将比以往任何时期都更为重要。而且这一重要性还在不断地增加，因为在电动汽车、电脑电源、太阳能电池逆变器和 LED 发光照明中的电源变换器中，将会使用越来越多的各种电力系统。

增长最快的电力系统应用将是在电动汽车领域。在 2014 年化合物半导体国际会议上代表福特公司发言的功率半导体研发工程师 Ming Su 透露，到 2020 年该公司 25% 的汽车产品将会实现电动化。在这些车辆中实现尽可能高效的电能转换将成为福特美国总部工程师们的首要目标，这将有助于他们的汽车能满足 2025 年美国政府的的要求，即每加仑汽油至少要具有行驶 54.5 英里的燃料效率。

由于硅半导体材料的成本低、应用广泛且研究成熟，所以多年来都是电力系统的首选半导体材料，包括了在电压转换等方面多种应用。然而，单纯从其工作性能上判断，硅材料却要

逊色于如 SiC 和 GaN 等其他宽禁带半导体材料。将硅材料转换到 GaN 材料就可制造出兼有低导通电阻和低寄生电容的半导体器件，这种器件在工作时，或者在其工作模式切换时，它具有更低的电能损耗。

之所以具有这些优异的性能，是因为在这种 HEMT 器件的 GaN 和 AlGaIn 层间界面具有高迁移率的二维电子气，使得这种类型的晶体管可应用于开关模式的功率电源中。据位于美国加州 EI Segundo 的 GaN 功率半导体制造商 EPC 公司称，额定电压为 600V 的功率半导体器件已经占据了整个功率晶体管市场的四分之一，而额定电压为 200V 或以下的器件已经下降到了占市场的四分之一。由于 GaN HEMT 器件能够覆盖所有这些电压范围，所以有充分的理由相信，这种宽禁带半导体可以广泛应用于电力功率转换中。

GaN 的衬底材料结构

理想情况下，制造 GaN HEMT 器件需要在一个天然 GaN 衬底上来生长 GaN 膜层的工艺。但是，天然 GaN 衬底材料非常昂贵，而且它在尺寸及供应上都存在一定的限制，所以必须采用其他类型的衬底结构材料。最为常见的选择就是采用硅衬底材料，它能用于 GaN HEMT 器件的制造，而且与 GaN 衬底相比其在价格上的优势十分明显。但是，要在硅材料衬底上生长和制造这些器件并不容易，工程师们不仅要控制外延晶圆片的弯曲度，这主要是由不同材料的晶格常数和热膨胀系数所引起的，还要应对如何

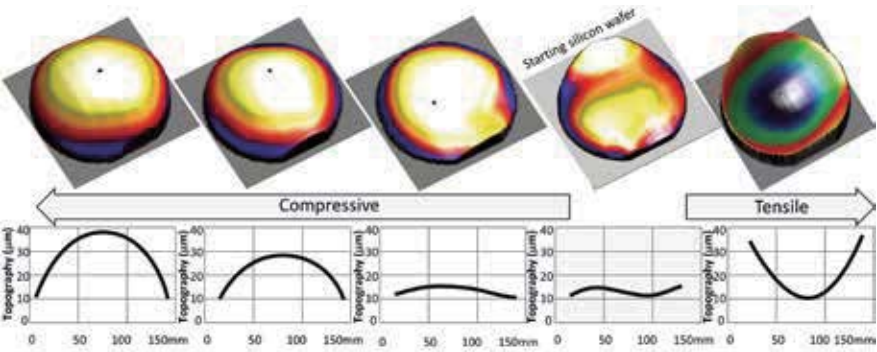


图1. 可以通过采用REO层来控制晶圆片的弯曲弧度。右侧的第二张曲线图对应的是没有经过沉积工艺的空白硅晶圆片，晶圆弯曲度测量是采用了FRT MicroProf 3D光学轮廓测量仪。

来处理对硅表面不利的化学反应。

其中一个不利化学反应就是硅会与氮作用形成 SiN。该反应会导致无定形氮化物层的生长，它会破坏在晶格取向上的对准，同时也会影响到覆于其上 GaN 层的质量。采用镓浸润层也不是一个可行的解决办法，因为硅可溶于液态镓中，所以镓在回熔（meltback）时会产生缺陷。唯一可选的浸润性材料只有铝，因为铝不会发生上述问题，但是此时其生长条件必须要有精确的控制，以尽量减小由共晶化所驱动的硅扩散到上部 GaN 层的现象。

为了避免产生上述问题，位于加州 Palo Alto 的 Translucent 公司团队首先开发了一个精心制作的缓冲层，它将有助于硅层和 GaN 层之间的过渡，使得 MOCVD 工程师在工艺设计上将具有充分的自由度。我们的缓冲层是一个绝缘性的、单晶稀土氧化物（REO），这是一种经过精心挑选的、其下表面结构与硅晶格具有良好匹配的一种化合物。同时，其上表面结构也经过了精心制作，使

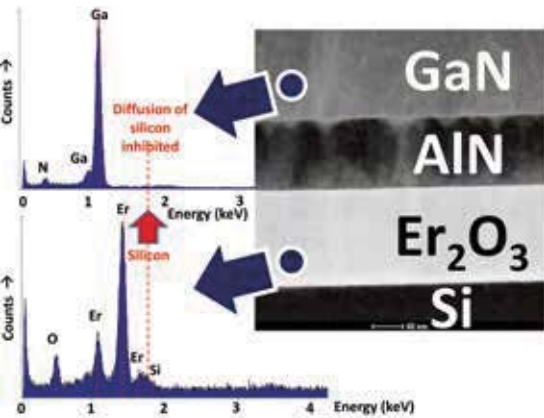


图3. TEM照片和EDX成分分析表明，稀土元素氧化物层能够提供一个难以逾越的屏障来防止硅的扩散。

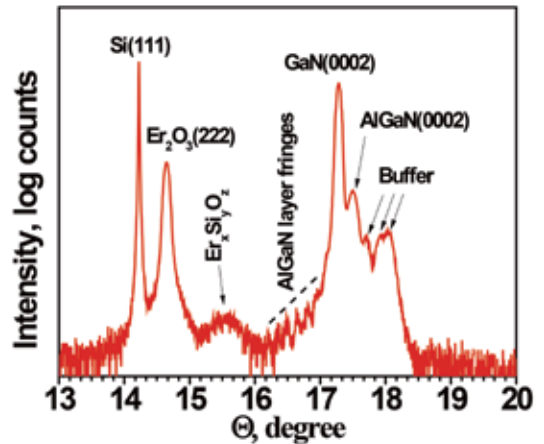


图4. X射线衍射显示了具有REO模板的衬底以及GaN 2DEG HEMT 器件结构的组分

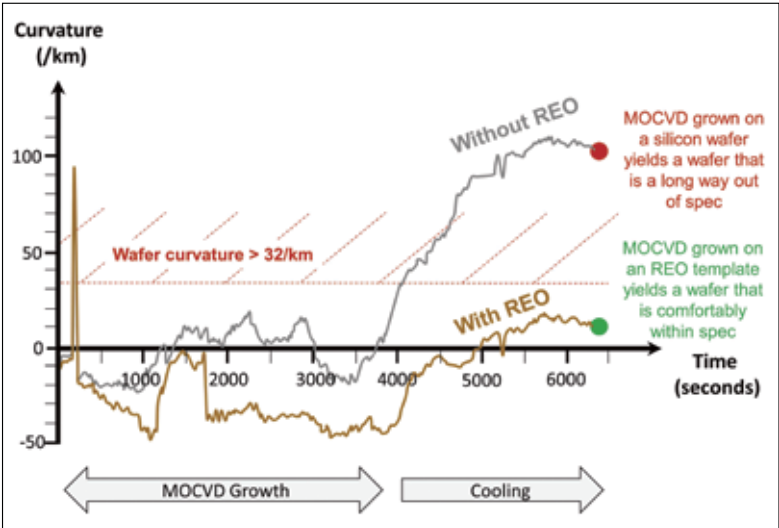


图2. 在MOCVD生长过程中形成的晶圆弯曲弧度。这个弧度曲线显示了同一运行批次下位于同一个台盘上两个晶圆片的曲率。其中一个裸硅晶圆，另一个是具有REO模板的晶圆。通过LayTec EpiTT系统对整个生长过程进行实时的监控，记录晶圆的温度、曲率以及在450nm和633nm波长的光反射信号。这些装置对整个生长工艺中的GaN表面演变情况和GaN体层的生长质量进行监测。MOCVD运行的起始时间为0，在生长3800s秒后晶圆开始冷却，拉伸应力开始对晶圆产生弯曲形变。在6400s秒后运行停止时，裸硅晶圆上的二维电子气的曲率为106/km，而在具有REO模板的晶圆上进行生长时该曲率只有11/km。106/km电子气曲率对应着133μm的晶圆弯曲弧度，这已经超出了工艺规范的要求，而11/km的电子气曲率对应着14μm的晶圆弯曲弧度，对于这一尺寸的晶圆而言正是处于其规范所要求的范围内。

得其缺陷生长情况与硅上的 GaN 生长有着完全不同，而更像是蓝宝石上的 GaN 生长，使得其 GaN 晶格能与硅衬底匹配得十分紧密。

REO 氧化物的优点不仅仅是体现在晶格匹配上，而且该材料层也是化学惰性的，所以它能提供一个物理屏障来防止硅原子的扩散，也使得镓原子不可能进入到与硅相接触的状态。更为重要的是，由于 REO 与硅衬底晶格是匹配的，使得在我们制作衬底上所生长的外延层结构也能够保持在晶格取向上的高度对准。需要注意的是，在 GaN 和 REO 上部界面故意保持有一些不匹配性，因为这样做可以使界面变得“温和”些，并使其具有一定程度的柔性。

REO 氧化物的优点

REO 层提供了一种新的途径来生产具有极低弯曲度的外延晶圆片，这是硅晶圆生产线进行工艺加工的先决条件。我们可以通过对硅晶圆进行预应变来控制其弯曲弧度。在 MOCVD 沉积 GaN 层之前，我们预先将晶圆片处理成呈圆顶形的弯曲状，因为不这样做的话，MOCVD 加工工艺将会自然地使晶圆片形成碗状。由于有了对晶圆的预应变处理，我们就可以得到非常平整的外延晶圆片（如图 1 所示，所选择的晶圆片经过了 REO 层的生长，采用了三维光学轮廓仪来测量其

技术 | Technology – 功率电子

平整度)。

采用这种方法后使得具有 REO 层的 GaN 外延片非常的平整,足以满足步进式光刻机对晶圆平整度的要求。这些要求来源于步进光刻机中光学系统的景深要求,是由 SEMI 所定义的最大晶圆弯曲度值。对于直径为 100mm 的晶圆片其弯曲弧度必须要低于 40mm,而对那些直径为 150mm 和 200mm 的晶圆片而言,其弯曲弧度必须要分别低于 60mm 和 65mm。

加入这一 REO 层也使得器件性能得以提升。这种 REO 氧化物是一种绝缘体材料,因此它能增加晶体管的击穿电压。此外,一些常见的失效机理也得以解决:器件经常由于硅扩散效应而容易产生击穿失效,但是引入 REO 层之后就不会发生这种击穿,因为这种氧化物层成为了硅原子难以穿越的一个屏障。

在常规的器件生产制造中,为了减轻这种硅原子扩散过程的影响,就需要生长较厚的 GaN 层,这样会增加生产成本。与此同时也必须将它与采用沉积 REO 层而增加的相关成本进行权衡。要注意,该氧化物层所具有的绝缘性质意味着它可以减小为达到特定阻断电压所需的 GaN 厚度。我们预计,通过采用 REO 层来防止硅原子扩散以及提高器件的耐压,我们可以将 GaN 的厚度至少削减 25%,同时也可以省略所有的中间层,这些做法可以显著降低与器件生产相关的成本。

我们技术的另一个优点是,它与采用其他技术制作的硅上 GaN 有着明显的不同,使得它在知识产权方面有着令人羡慕的地位。随着行业的成熟,专利所有权越来越被视作为一项重要的资产:

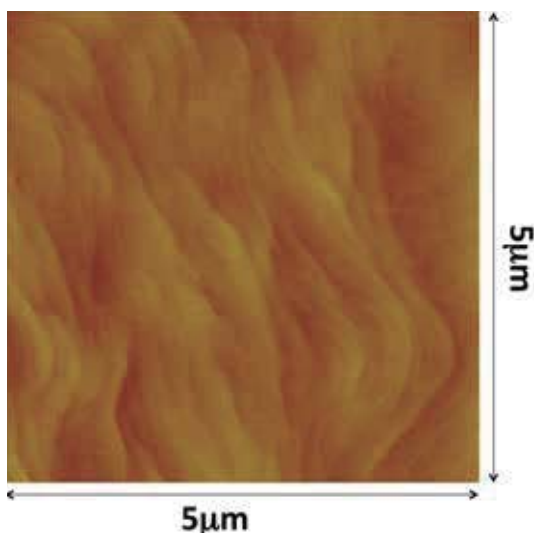


图5. 原子力显微镜分析显示具有台阶流动形貌特征,在Z方向上波动为4.2nm, RMS为0.51nm。

事实上,法国市场分析公司 Yole Développement 最近发布了一个市场报告,专门针对的是关于硅上 GaN 的知识产权问题,强调了对知识产权进行保护的重要性。

富有应用前景的成果

在外延晶圆和 HEMT 器件上的实验结果也充分支持了我们宣布的采用 REO 技术制造硅上 GaN 晶体管的优异性能。我们的工作包括了对一个 100mm 硅片的并行比较,以及对我们的基于 REO 模板衬底进行预应变,以抵消由 MOCVD 沉积层所产生的应力。这些晶圆被放置于 MOCVD 批次反应室中的相邻位置,采用了标准的蓝宝石衬底沉积工艺,来制造 2DEG HEMT 结构。在进行沉积生长之后,带有氧化物中间层的外延晶圆片曲率只有那些生长在裸硅衬底上结构的四分之一都不到,弯曲弧度仅有 14mm,具有 REO 层的外延晶圆片能够满足硅晶圆工艺线的规范要求(见图 2)。与此相反,普通的硅上 GaN 晶圆片是明显超出了规范要求。

采用 AlN 中间层就可以降低晶圆的弯曲弧度,并控制好硅上 GaN HEMT 器件中的缺陷扩散。这种 AlN 层也可以应用在我们的器件结构中,但是我们还是打算努力减少甚至省略这一 AlN 层,因为我们希望 REO 能具有 AlN 中间层的大部分功能(图 2 显示了在晶圆弯曲弧度的控制上,是如何采用 REO 层来使超出规范要求的工艺转变呈能为适合规范要求的工艺。

我们综合采用了透射电子显微镜(TEM)和能量色散 X 线分析(EDX)手段对硅上 GaN、AlN 层和 REO 层的结构进行了分析,证明了 REO 层确实对于硅原子扩散起到了阻挡作用(见图 3)。根据 EDX 的分析结果,在 GaN 层中并没有发现有硅元素的存在。此外,在 GaN 中也没有发现有氧和铒(Er)元素,这表明 REO 层将不会成为杂质沾污的来源。

从 X 射线衍射图中可以看出,在我们所制作的模板衬底上形成的 HEMT 器件结构具有很高的晶体质量,它具有尖锐的 AlGaN 谱峰。根据 Bremen 大学 Detlef Hommel 及其合作者的分析,X 射线衍射图中的峰宽可以用来确定该外延结构层中的位错密度。

在(002)面衍射峰宽反射为 600 弧秒,而在(102)面反射为 1400 弧秒,该数值对应在 GaN 层

中的位错密度为 $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。在我们看来，这个数值是确实可信的，它进一步证实了我们的模板衬底能为后续 MOCVD 生长 GaN 提供很好的基础。

我们 REO 层的另一大特点就是它的生长机理和在蓝宝石衬底上沉积 GaN 时的机理相同，而蓝宝石是用于 GaN 生长最为常见的衬底，但因它所具有的绝缘特性，所以不适合用于制造电子学器件。在 REO 层上生长的 GaN 层表面的原子力显微镜扫描图显示存在有平行的原子台阶形貌，这说明发生了二维台阶的流动状生长过程—正如在蓝宝石上所发生的一样（见图 5）。

未经掺杂的底层 GaN 的质量是由霍尔测试独立进行评估，对掺杂浓度为 $1.1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 的 n 型 GaN 校正层所测量得到迁移率值为 $250 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

器件上的结果

采用改良后的蓝宝石上 GaN 的 MOCVD 工艺，使得可以在硅（111）/ Er_2O_3 模板层衬底上生长 HEMT 器件层。AlN 缓冲层是生长在 Er_2O_3 层上，接着再生长一层厚的 GaN 层、一个 3nm 厚的 AlN 中间层、一个 30nm 厚的 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ 阻挡层以及 1nm 厚的 GaN 覆盖层。在整个 MOCVD 沉积运行中，采用了激光反射计和具发射率校正的高温测定仪来对氮化物层的生长进行实时监控。

采用了标准的叉指图形的源极和漏极版图设计（没有采用场版），对上述晶圆衬底用标准的工艺步骤进行加工处理，诸如 BCl_3/Cl_2 反应离子蚀刻和无金接触层沉积等工艺，这些都是在现今硅上 GaN FET 器件中常用的处理工艺。

图 6 显示了这种器件在制作完成后的典型结果，证实了这种采用 REO 缓冲层在硅晶圆上制造 III-N 族功率 FET 器件的新方法，可以用来替代

其他在硅上沉积 GaN 的常用方法。我们已经证明，使用标准的 MOCVD 工艺，就可以制造出性能完全符合要求的器件。

事实上，这种器件所具有的性能与那些不在 REO 层上生长的器件相类似。此外，由于 REO 层所具有的化学和物理性质，我们已经证明在整个 MOCVD 工艺的设计自由度上已经超出了 MOCVD 实际可用的工艺范围。

下一步的工作

我们已经可以生产直径为 150mm 和 100mm 的 REO 模板衬底，而且我们的工厂正在提升 200mm REO 的制造能力。综合这些努力，我们正在与客户接触来推广 REO 模板衬底的应用，来真正用它来替代当前普遍使用的台阶级（step-graded）和超晶格方法。

在与客户的交谈中，我们指出我们的 REO 材料也可以用于 MOCVD 沉积层的顶部来作为栅电介质，因为它的介电常数可高达 12 到 15。

我们的基于 REO 模板的衬底并不只限于功率电子应用，它对用于制造 LED 和 RF 器件也是一种具有吸引力的选择。这种 REO 层可以用来在硅上生长 LED 结构，该方法是通过在有源区下方引入一个反射镜层，来防止光被衬底所吸收。

然而，插入一个分布式布拉格反射镜层还不是 REO 唯一可以发挥的作用，它还可以帮助 LED 产业引入更为常见的、如硅的（100）晶向的硅衬底。在这种晶向的硅衬底上进行沉积可能是非常有用的，因为它可以进行非极性和半极性 GaN 层的生长，可使 LED 能在更广的波长范围中有着更高的效率，这是因为它可以减小或消除了会消耗能量的内部电场。

基于 REO 模板的衬底所提供的这些应用机会，以及它们在功率电子器件中的良好应用前景，表明了硅衬底和 GaN 层之间插入这样一个氧化层有着多重的效益。我们希望有更多的人能够注意并采用这种方法，并允许我们在帮助这个功率半导体行业制造出更好的化合物半导体器件方面发挥更为重要的作用。

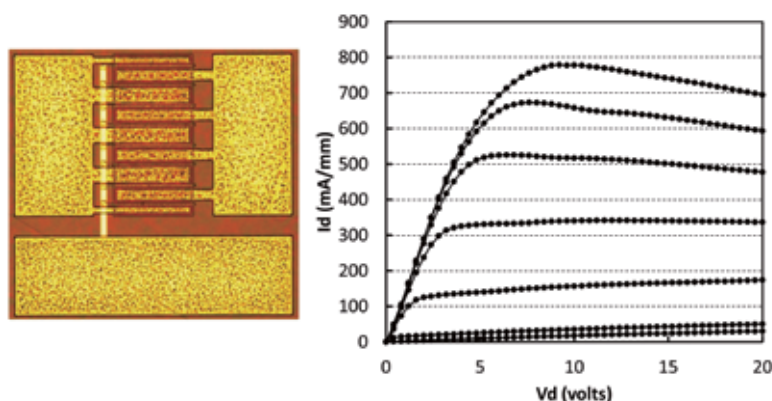


图6. 一个典型器件布局的显微照片，显示了经加工后的REO/硅上GaN FET器件的结果：800mA/mm的漏极电流， $920 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的沟道迁移率， $1.36 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 的表面沟道层载流子浓度和 $496 \Omega/\text{sq}$ 的表面薄层电阻。

Last few remaining seats



5th CS International Conference 2015



CS International 2015 will provide timely, comprehensive coverage of every important sector within the compound semiconductor industry.

The 5th CS International conference will be held at the Sheraton Frankfurt Airport Hotel, in Germany on Wednesday 11th & Thursday 12th March 2015. The conference will build on the success of its predecessors, with industry-leading insiders delivering more than 35 presentations spanning six sectors.

Please visit www.cs-international.net for further information on this event.

Book your place NOW

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

TWO DAYS, SIX THEMES, OVER 35 INSPIRING PRESENTATIONS

Six key themes lie at the heart of CS International 2015: solid-state lighting, power electronics, front-end mobiles, optoelectronics, III-V CMOS and RF electronics. Within each topic there is a key-note presentation from one of the most influential companies within each sector; one talk by a leading market analyst who will discuss trends within the industry and presentations by the leaders of firms developing cutting-edge technology in each field.

CS INTERNATIONAL
CONFERENCE

Connecting, informing and inspiring the compound semiconductor industry

All speakers and presentations are subject to change.

35+ presentations over two days covering six themes

SOLID-STATE LIGHTING

Soaring sales of LED bulbs are creating a great opportunity for chipmakers. But what do companies need to do to stand out from the crowd and win substantial orders while maintaining healthy margins?

KEYNOTE		Opportunities for laser diodes in solid-state lighting Jon Wierer - SSLS Scientist - Sandia National Laboratories	
ANALYST		How will the solid-state lighting evolution unfold, and what will it mean for the LED chipmakers? Will Rhodes - Research Manager - IHS Technology	
SPEAKER		Commercialisation of GaN-on-silicon for LEDs Keith Strickland - Innovations & Technology Director - Plessey Semiconductors	
SPEAKER		Increasing LED output with advanced plasma processing Mark Dineen - Product Manager - Oxford Instruments Plc	
SPEAKER		Yield optimisation of compound semiconductor processes through an effective metrology strategy Torsten Stoll - Product & Marketing Manager - Nanometrics Inc.	
SPEAKER		Plasma dicing for III/V and thin wafers Reinhard Windemuth - Sales Director ME Europe - Panasonic Factory Solutions	

OPTOELECTRONICS

Does the growth of the datacom market signal a long-awaited return to better times for the makers of optical components? Is CPV technology finally starting to gain a foothold in the solar industry?

KEYNOTE		Highest CPV cell and module efficiencies and CPV power plants Rainer Krause - Director Smart Cell Development - Soitec	
ANALYST		Where is the CPV industry heading, and what needs to happen to increase its market share? Karl Melkonyan - Analyst Solar Research - IHS Technology	
SPEAKER		Mid infrared LEDs enable portable, battery powered gas sensing Des Gibson - CEO - Gas Sensing Solutions Ltd	
SPEAKER		IC design for very high-speed optical communications – a holistic approach The' Linh Nguyen - Senior Manager IC Development- Finisar Corporation	
SPEAKER		UV LED - We are just scratching the surface of the technology's true potential Pars Mukish - LED & Sapphire Activities Leader - Yole Développement	
SPEAKER		Unlocking opportunities for compound semiconductors with micro assembly Chris Bower - CTO - X-Celeprint Ltd	

Delegate registration: www.cs-international.net/register.php



III-V CMOS

By the end of this decade, it is said that silicon CMOS will have run out of steam. But what role will III-Vs have to play in the microprocessors of the future?

KEYNOTE		Heterogeneous integration of III-Vs and CMOS Daniel Green - Program Manager - Defence Advanced Research Projects Agency	
ANALYST		When will III-Vs make an impact in the silicon foundries? And will it last for long? Mike Corbett - Managing Partner - Linx Consulting	
SPEAKER		III-V FETs for future logic applications Jesús A. del Alamo - Director of the Microsystems Technology Laboratories - MIT	
SPEAKER		Opportunities and challenges of III-Vs in Si-based nanoelectronics industry Matthias Passlack - R&D Deputy Director Europe - Taiwan Semiconductor Manufacturing Company	
SPEAKER		Advanced in-situ metrology for III-V on silicon technology Kolja Haberland - CTO - LayTec AG	
SPEAKER		Eliminating material borders for heterogeneous integration through new wafer bonding processes Thomas Uhrmann - Head of Business Development - EV Group	

FRONT-END MOBILES

What's the biggest threat to revenues for GaAs power amplifiers? Is it the emergence of multi-band, multi-mode PAs built with this material, or the emergence of CMOS solutions?

KEYNOTE		The path to intelligent integration Jim Cable - CEO, President and Chairman - Peregrine Semiconductor Corporation	
ANALYST		Multi-mode, multi-band PAs: friend or foe to the compound semiconductor industry? Eric Higham - Director - Advanced Semiconductor Applications - Strategy Analytics	
SPEAKER		Improving system level integration and overall efficiency Ed Anthony - VP Engineering - Skyworks Inc.	
SPEAKER		LTE is driving complexity in smartphone design Sean Riley - VP of Mobile Products - Qorvo	

CS INTERNATIONAL
CONFERENCE

Connecting, informing and inspiring the compound semiconductor industry

Delegate registration: www.cs-international.net/register.php



POWER ELECTRONICS

From a performance perspective, GaN and SiC are superior to silicon, but high prices are holding the materials back from displacing the incumbent silicon. How can this be addressed?

KEYNOTE		Ditching the package to drive down GaN transistor costs Alex Lidow - CEO and Co-Founder - Efficient Power Conversion Corporation	
ANALYST		When can WBG power electronics truly take off? Pierric Gueguan- Senior Power Electronics Market Analyst - Yole Développement	
SPEAKER		SiC technology in Power Electronics – A step change in value Tang Yong Ang - VP Compound Semiconductors - Dow Corning Corporation	
SPEAKER		High performance GaN-on-Si power epiwafers employing rare earth oxide buffer layers Andrew Clark - VP Engineering - Translucent Inc.	
SPEAKER		Automated defect monitoring strategy for surface and photoluminescence yield impacting defects Brian Crawford - Director of Business Development - KLA-Tencor	
SPEAKER		Driving down costs for next-generation PVD processes Reinhard Benz - VP Sales and Marketing - Evatec Ltd	
SPEAKER		Gallium nitride epitaxy on large area silicon substrates for power applications Yoga Saripalli- Principle Engineer - GaN Epitaxy Group - imec	
SPEAKER		Optimisation of III-V R&D and manufacturing using advanced analytical methods Temel Buyuklimani - Senior Director, Quadrupole SIMS Services - Evans Analytical Group	
SPEAKER		Accelerating GaN power electronics devices using MOCVD technology Sudhakar Raman - VP Marketing - Veeco Instruments	
SPEAKER		Measurement solutions for high power WBG semiconductor materials and devices. How to optimise and minimise power conversion switching loss Stewart Wilson - European Business Manager - Keysight Technologies	
SPEAKER		Cutting conversion losses with cost-efficient GaN-on-silicon Marianne Germain- CEO - EPIGaN nv	

RF-ELECTRONICS

The potential of GaN in the RF arena has never been in doubt. But does it now satisfy all the requirements for deployment in the most taxing situations?

KEYNOTE		GaN for radar applications Takahisa Kawai - General Manager - Sumitomo Electric Device Innovations, Inc.	
ANALYST		The future for GaN, SiC, InP and GaAs in defence/military applications Asif Anwar - Director - Strategy Analytics	
SPEAKER		GaN for commercial RF applications enabled by the pure-play foundry model Walter Wohlmuth - Associate VP Technology - WIN Semiconductors Corporation	



Event Sponsors

Platinum



Gold



Exhibition

Pen/USB Sponsor

CS Industry Awards



Theme Sponsor

Delegate bag

Lanyard

Portfolio



Supported by



Delegate registration: www.cs-international.net





界面失配位错可能不再会制约绿色激光器性能的提高

将失配位错局限在界面位置使得绿色激光器的设计者可以采用弛豫 InGa_N 波导结构。

来自康宁 (Corning) 公司研究团队的工作成果引起了氮化物业界的关注, 由他们开发的激光二极管, 即使是存在有失配位错的情况下, 依然可以在连续波状态下工作数百个小时,

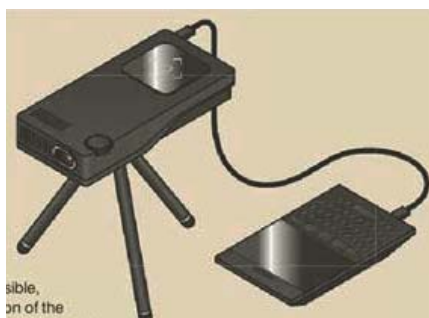
康宁研究团队的成员 Dmitry Sizov 表示: 为了应对失配位错这种会严重限制激光器性能的缺陷, 他们选择采用了半极性的 III-N 族材料系统, 并且在设计中采用了专门的控制方法来使失配位错所处的位置与有源区保持有足够远的距离。

Sizov 说道: “过去我们对此并不清楚, 即如果高密度的失配位错在距离量子阱 100nm 以上时, 半导体激光器仍能可靠地工作”。

由于不必再对激光器件结构中的失配位错进行消除, 这就打开了通向新的设计方法的大门, 例如可在波导结构的核芯层中采用具有更高镓浓度的材料, 以及在波导结构的 AlInGa_N 包覆层中采用具有更高铝浓度的材料。Sizov 解释道: “在这两种结构材料上的改进都能增强波导对光的限域能力, 从而可以获得更高的光学增益和减少在包覆层中的光损耗”。与此同时, 他还指出这些改进措施将能够提高激光器的效率。

根据 Sizov 的说法, 允许在器件结构中存在一些失配位错还有着更进一步的好处, 即可以通过在弛豫 InGa_N 波导结构上生长活性区以减少量子阱中的压应变。“因此, 如果要进一步增加激光器的波长, 采用更高的镓浓度应该使可行的”。引入弛豫 InGa_N 波导结构将有望创造绿色激光器性能的新记录。

然而, 为了验证上述做些说法是



高可靠性绿色激光器将有助于全色微型投影机的开发。

否可行, 就首先必须对制造工艺、晶体生长和其他一些设计要素进行优化。Sizov 表示: 上述这些工作正在进行中, 但是也面临着很多困难。美国加州大学 Santa Barbara 分校的科学家们已经在弛豫 InGa_N 模板上制作了 LED, 并且采用了将有源区夹在两个弛豫 InGa_N 波导层中间这种三明治结构来制作激光器, 而康宁公司的研究团队正是在上述成果的基础上开展工作的。

Sizov 和他的同事们的工作已经向前推进了一大步, 他们已经利用这种类型的设计制造了一种连续波激光器, 它是用 MOCVD 工艺在一个独立的 (2021) 基板上生长形成这种激光器结构。

康宁研究团队在沉积了 Ga_N 缓冲层之后, 还增加了一个 n 型 AlInGa_N 包覆层, 此包覆层具有在 c 轴向的晶格匹配, 但是在 a 轴向有着轻微的晶格失配。在其顶部还生长了一个 n 型 In_{0.05}Ga_{0.95}N 层, 它的厚度大于 c 轴向弛豫所需的长度, 这使得在包覆层和底部波导层间的界面上形成了一个失配位错的阵列。

增加一个空穴阻挡层可以防止空穴流入包覆层和底部波导层之间的界面, 然后再沉积含有两个量子阱的有源

区层, 之后再沉积一个 p 型 In_{0.05}Ga_{0.95}N 波导层, 该波导层具有和底部波导层具有相同的晶格常数。最后, 将一个与 n 型包覆层组分相同的 p 型包覆层沉积在这种外延叠层结构上, 它的厚度超过 600nm, 是通过在顶部波导层和顶部包覆层之间形成另一失配位错阵列来获得弛豫。利用这种生长方法制作的外延晶圆就可以用来制造具有标准脊型波导结构的激光器。对这种激光器结构的光损耗测量表明, 采用 p 型激发会使其内部波导损耗从近乎于零增加到 10 cm⁻¹。最终获得的结论是: 失配位错对内部损耗没有影响, 产生内部损耗的主要原因是 p 型激发后受主束缚空穴的吸收效应所致。

该研究团队对他们的 503nm 波长激光器进行了可靠性测试, 所用的驱动电流为 150mA, 产生的输出功率为 3-4mW。测试表明, 这些器件的工作寿命为 400 小时, 这距离商用器件所要求的 1000-3000 小时还有相当大的差距。Sizovs 说道: “但是我们没有发现存在有证据来证明器件性能退化是由于失配位错引起的, 而且我们希望对制造技术的进行改进后还将能大大增加器件的工作寿命”。

Sizovs 和他的合作者们采用光致发光和透射电子显微镜分析手段仔细地研究了性能已经退化和没有退化激光器的结构, 发现器件的可靠性问题与材料中氮空位所造成的点缺陷有关。

该团队的下一步工作计划还不清楚, 因为最近他们已经被 ThorLabs 合并了。

D. Sizov et. al. Appl. Phys. Express 7 112710 (2014)





晶圆键合为提升太阳能电池的效率提供新途径

多结太阳能电池可以利用室温下的晶圆键合工艺来进行制备。

来自日本索尼公司和中国科学院的合作研究团队已经开发出一种新工艺，它可以将 InP 和 GaAs 太阳能电池晶圆键合在一起。

这种新方法可以提升太阳能电池的转换效率并降低聚光型光伏系统的生产成本，并且这种技术可以使光伏发电这种可再生能源形式更具竞争力。

该团队开发的这种晶圆键合技术打开了增加光电池结的数量的大门，能否增加结的数量是提升太阳能电池效率的关键。目前的高效率太阳能电池通常使用三个结来吸收从 390 nm 到 1700 nm 波长范围的太阳光辐射。然而，根据研究者的说法，要制造超过四个结的光电池就必须要对 InP 和 GaAs 晶圆实现高质量的键合。

作为发表这项研究论文的通讯作者，来自索尼公司的 Shiro Uchida 表示：“我们的主要的研究成果就是将不同类型化合物半导体材料晶圆进行键合后获得了最低的接触电阻”。

对于聚光型太阳能电池系统而言，极低的晶圆键合电阻是必需的。这是因为太阳光会被汇聚成比原来强度高数百倍甚至更多，电池芯片在如此高强度光辐射下会在电池中产生高达 10A/cm² 的电流。

Uchida 和他的同事们采用了一种在室温下基于氦离子处理的方法来将晶圆进行键合，这种方法相比于快原子束活化晶圆键合和融合键合方法都更具优势。这两种更为常见的方法可以实现晶圆的牢固键合，但是其键合界面的接触电阻过高，即使是通过 30 分钟到 3 小时的长时间或温度高达 700℃ 的退火都无法得到改善。在键合界面的典型面接触电阻为 0.01 Ω·cm² 或者



借助晶圆键合工艺来增加结的数量将有望提高聚光型光伏系统的市场竞争力。

更高的情况下，光电池中的峰值电流就将会受到限制。并且，如果把高温因素也考虑进来的话，这种具有混合结构的电池就可能由于缺陷、裂纹和空洞等产生失效。

该团队研发的室温键合技术可以实现仅有 2.5 × 10⁻⁵ Ω·cm² 的界面接触电阻，这种方法是由日本东京大学的 Tadatomo Suga 研究团队所发明，在其实现手段中使用了氦离子处理。

Uchida 和他的合作者们在将一系列商用衬底晶圆键合在一起之后，找到了能实现低界面接触电阻的方法。一系列的实验是在三菱重工的室温晶圆键合设备上进行的，在此设备真空度优于 10⁻⁵ Pa 的真空室中配备有氦离子枪。

首先在设备的真空室中采用低能氦离子对晶圆进行轰击，以活化其表面并产生悬挂键，之后在同一真空室中对晶圆施加 5000N 的压力进行键合，再在

晶圆表面淀积金属叠层以形成欧姆接触，然后晶圆被切割成 3 mm × 3 mm 的芯片并测试其伏安特性。将厚度为 450μm、硅掺杂浓度为 3 × 10¹⁸ cm⁻³ 的 GaAs 衬底晶圆与厚度为 600μm、硫掺杂浓度为 3 × 10¹⁸ cm⁻³ 的 GaAs 衬底晶圆进行键合，所制作出来的键合结构具有较高的面接触电阻，而且该结构还具有类似于二极管的电学特性，这可能是由于该键合界面对于电子的传输呈现出一个高的势垒所致。

依据上述的试验结果，该研究团队尝试采用在晶圆上沉积一层很薄的钛薄膜来降低键合界面的电阻。这是因为钛能够有效地降低上述 Schottky 势垒的高度。研究人员在厚度为 450μm、锌掺杂浓度为 3 × 10¹⁹ cm⁻³ 的 GaAs 衬底上沉积厚度为 2nm 或者 2.8nm 的钛膜层，而在另一片 n 型 InP 衬底晶圆上也沉积相应的同等厚度的钛膜层。

电学性能测试表明，当都沉积有 2nm 钛膜层的两个晶圆进行键合后，其键合界面电阻为 1.4 × 10⁻⁴ Ω·cm²，当两个晶圆的钛膜层厚度都增加到 2.8nm 时，其键合界面电阻值相应会增加到 2.1 × 10⁻⁴ Ω·cm²。

如果是将重掺杂 p 型 GaAs 衬底晶圆与 n 型 InP 衬底晶圆直接进行键合，就可以得到较低的键合界面电阻。随着对键合工艺条件的不断优化，目前得到的界面接触电阻的最低记录已经达到了 2.5 × 10⁻⁵ Ω·cm²。能获得如此低的键合界面电阻，其原因可能是其能带结构同时存在着隧穿电流和陷阱辅助电流这两种效应。

S. Uchida et. al. Appl. Phys. Express 7 112301 (2014)





GaN：制造性能更好的晶体管

采用低温中间层和双异质结构制作的晶体管具有低的缺陷密度和高的击穿电压等特性。

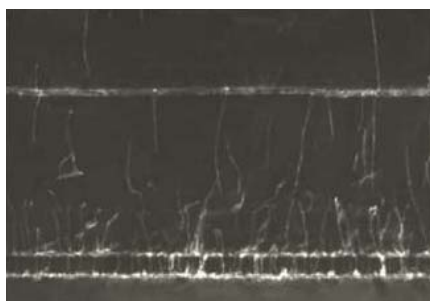
要能在硅衬底上制造出性能更好的 GaN 晶体管需采用两种顶级技术：一是在缓冲层中插入 AlGaIn 中间层来调整应变，或是引入双异质结构来增加对电子的束缚。

虽然很多研究团队都对这两种技术中的某一种进行了研究，但是位于台湾的国立交通大学课题组声称通过将这两项技术相结合，已经取得了较采用单一技术具有更好器件性能的研究结果。

作为详细介绍该项研究成果论文的第一作者，Yu-Lin Hsiao 说道：“据我们所知，这是首次对在硅衬底上的 AlGaIn/GaN/AlGaIn 双异质结构中插入 AlGaIn 中间层所进行的研究”。

由于插入了这一低温中间层，使得器件只受到较小的应力，从而具有更少的材料位错以及更高的击穿电压。引入双异质结构也提高了器件性能：在 GaN 沟道中由于增加了对电子的束缚，将有助于降低在背阻挡层中的漏电流。

为了证明这种双管齐下方法的优越性，研究人员对三种不同结构器件的性能进行了评估：其中一种包含有一个双异质和一个低温中间层结构，而另外两种则要么是含有一个低温中间层和一个单异质结构，或是一个没有低温中间层的双异质结构。



透射电子显微镜的截面照片表明，插入一个低温 AlGaIn 中间层能显著降低螺旋位错密度。这种螺旋位错密度的降低是非常有益的，因为这种类型的缺陷被认为是降低硅上 GaN 晶体管击穿电压的首要原因。

所有这三种结构都是沉积在 150mm 硅衬底上，该衬底上有着 800nm 厚的过渡层，它是由一个 AlN 层和三个 AlGaIn 层组成。Hsiao 解释说：“我们认为这是一种常见的过渡层结构，但是不同的团队所采用的过渡层的结构厚度可能有所不同”。台湾研究团队所插入的中间层是一个 21nm 厚的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 薄层，它是夹在两个 1μm 厚的 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 层之间形成一种三明治结构。

Hsiao 说道：“对于这种类型的结构而言，最为重要的是需要在不同生长温度和不同生长时间下对低温 AlGaIn 中间层实现优化”，经优化后的中间层能够降低 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 背阻挡层中的位错密度。

Hsiao 解释说：“另一个重要的因素（尚有待确定）是插入这个低温 AlGaIn 层的最佳时机，我们必须在第

一层 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 背阻挡层的生长过程中来获得其临界厚度”。为了确定这个厚度，我们采用了实时的曲率测量方法，它是由安装在我们 Thomas Swan MOCVD 系统中一个 Laytec EpiCurve TT 仪器来进行测量的。

要最终完成双异质结构晶体管的生长过程，还需淀积一个 90nm 厚的沟道层和一个 30nm 厚的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 顶部阻挡层。对于具有单异质结构的对比试验样品来说，其器件是由一对 GaN 和 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 层组成。

为了比较这三种器件结构的击穿电压，先采用干法刻蚀形成隔离区，然后利用电子束蒸发系统来沉积多层金属，然后在 800℃ 的氮气中进行 60s 的快速热退火（RTA）。所形成器件栅极宽度为 100μm，栅极长度为 1μm，栅、漏极间距为 4.5μm，栅、源极间距为 1.5μm。

与两种普通结构器件的击穿电压均低于 400V 相比，结合有低温中间层和双异质结构器件的击穿电压超过了 600V。

该研究团队目前正计划在较厚的 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 背阻挡层中插入两个或者更多的低温中间层，以进一步提高器件的击穿电压。

Y. -L. Hsiao et. al. Appl. Phys. Express 7 115501 (2014)

上接第14页

队开发了一种新工艺来将 GaAs 衬底上的 ZnSe 薄层整体转到其它衬底上。它们先把 MgS 牺牲底层用化学方法进行剥离，之后再 ZnSe 薄层直接与晶圆进行键合。与这种键合工艺相类似，我们现在也能够将 GaN LED 结构层从蓝宝石衬底上剥离并转移到

另一种材料的衬底上（见图 3）。

感谢在 2013 年来自于 European Commission FP7 和 Scottish Universities Physics Alliance 的资金支持，使我们可以和 Prior 和 Ougazzaden 的研究组合作，来进一步证明类似的工艺也适用于在覆盖有 GaN 层的 ZnO/GaN 衬

底结构进行 GaN 层的化学剥离。

这看起来是一种违反直觉的方法，但它的优势是在覆盖有 ZnO 模板层的 GaN 衬底上能生长出更高质量的 GaN 层。X 射线衍射和电子显微镜分析都显示，与在 ZnO/ 蓝宝石衬底上进行异质外延相比，它所得



科技前沿 | Research Review

到的 GaN 外延层有着明显更大的晶粒尺寸、更小的应变和更低的缺陷密度。这是由于下面的 GaN 层对 ZnO 模板层施加了应力使得它能与 GaN 的晶格更为匹配。

另外, GaN 薄膜的应力很低, 这是由于其下方 GaN 衬底对 ZnO 模板层施加了应力, 使得 GaN 层的晶格将会变得更加匹配。

X 射线衍射分析显示, 在 ZnO 模板层 /GaN 衬底上生长 100nm 厚的 GaN 层具有类似于 GaN 衬底的 Ω 摇摆曲线峰宽 ($\sim 0.05^\circ$), 与在 ZnO/ 蓝宝石衬底上生长类似厚度的 GaN 层

相比, 其晶体色散下降了一个数量级。

除了具有更好的 GaN 外延层质量以外, 在这个工艺中最为昂贵的 GaN 衬底并没有被消耗掉, 可以对它进行多次的回收再利用, 而且并不会对 GaN 外延层质量造成明显的影响 (见图 4)。

另一方面, 在再次抛光中工序中所采用的化学清洗方法并不会对 GaN 衬底晶圆造成损伤, 因此在 LED 芯片生产中并不需要准备大量的 GaN 衬底, 这意味着每一个外延生长批次的 GaN 衬底成本可以压缩到能被工业生产所接受的水平。从单位晶

圆的输出功率和单位流明的成本上来看, 这将会对 LED 芯片制造业带来突破性的进展。有充分的理由可以相信, 这种技术也可以用于更为稀有、更为昂贵的非极性 GaN 衬底上, 这种类型的衬底正在作为一种可克服发光效率下降, 即能克服高电流密度下 LED 发光效率所产生下降问题而得到使用。

显然这种化学剥离技术是非常具有应用前景的, 如果能把它的全部潜力都释放出来的话, 它将会在未来的固态照明中扮演一个重要的技术角色。OSc

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.php	15, 20-24
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	13
EV Group		www.EVGroup.com	6

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)
Sunnie Zhao (赵雪芹)
sunniez@actintl.com.hk

Sales Director (销售总监)
Mark Mak (麦协和)
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 (麦协和)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852-28386298

China (中国)
Jenny Li (李文娟)
jennyli@actintl.com.hk
Tel: 86 755 2598 8571

Shanghai (上海)
Judy Huang (黄作美)
judyh@actintl.com.hk
Tel: 86-21-62511200

Beijing (北京)
Oasis Guo (郭镜园)
Oasisg@actintl.com.hk
Tel: 86-13011108861
86-10-67484833

Wuhan (武汉)
Sky Chen (陈燕)
skyc@actintl.com.hk
Tel: 86-13723739991
86-27-68852360

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

Singapore (新加坡)
Joanna Wong
triplesinternational@gmail.com
Tel: 65-63395596
65-90626227

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

半导体科技

制·造
封·装
测·试

Solid State
TECHNOLOGY
Insights for Electronics Manufacturing

CHINA

电子书(eMagazine)

solidstatechina.com



直接连结
广告商网站

一点即开
想看的文章

推荐朋友下载
免费的电子书

申请成为免费印刷
版或电子书的读者

上页、下页，
放大/缩小文章



化合物半导体

COMPOUND · CHINA
SEMICONDUCTOR

电子书(eMagazine)

www.compoundsemiconductorchina.net



[直接连结
广告商网站](#)

[一点即开
想看的文章](#)

[推荐朋友下载
免费的电子书](#)

[申请成为免费印刷
版或电子书的读者](#)

[上页、下页，
放大/缩小文章](#)

化合物半导体
COMPOUND · CHINA

讨论区
BBS

广告索引
Ad Index

目录 Content
P.19-31 P.33-37

推荐朋友
Refer a friend

免费赠阅
Subscribe

◀

🔍

🔍

▶

ACT

化合物半导体
COMPOUND · CHINA

SEMICONDUCTOR

季刊 2015年 第1期

太赫兹晶体管生长

聚焦GaAs和GaN