

化合物半导体

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

• **CHINA**

季刊 2016年 第3期

红外LED应用



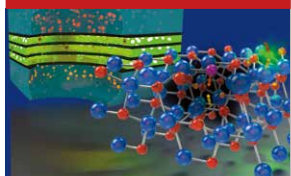
固态射频器件



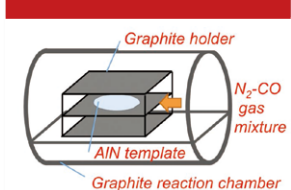
采用WLCSP在
200mmGaN-on-Si
上制造LED



揭示氮化物LED点
缺陷



蓝宝石上AlN薄膜



GaN 产品多样化



您认为,

AIXTRON
Our technology. Your future.

氮化镓功率器件的生产 需要高产能解决方案.

我们也这样认为.

最新型 AIX G5+ C



发现最新型 AIX G5+ C.

基于荣获最佳单晶片性能奖项的行星式反应技术,
提供多晶片反应腔的产能优势,
提供晶盒到晶盒晶片自动化放取技术,
提供炉内原位清洁技术,
提供已被验证的器件工艺制程.
实现工艺流程全自动化,
与现有的硅晶片产线无缝衔接.



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 ACT Media Group

封面故事 Cover Story

- 11 促进GaN器件产品的多样化
Driving diversification in GaN device production
- KOH MATSUMOTO, TAIYO NIPPON SANSO 公司

市场 Market

- 4 化合物半导体产业前景剖析
Dissecting prospects for CS industry
- 9 跨越磁控管时代
Move over magnetron

技术 Technology

- 16 提升硅上GaNLED的竞争力
Increasing the competitiveness of the GaN-on-silicon LED
- HYUN KUM, JOOSUNG KIM, YONGJO TAK, JONGSUN MAENG, JUN-YOUNG KIM, YOUNGSOO PARK; 三星电子公司
- 20 采用新型合金材料制作高效率光伏电池
Pursuing high-efficiency photovoltaics with novel alloys
- KIN MAN YU, 香港城市大学;
WLADEK WALUKIEWICZ, 美国劳伦斯伯克利国家实验室

科技前沿 Research Review

- 24 揭示氮化物LED点缺陷的本质
Unravelling the nature of point defects in nitride LEDs
- 26 提高蓝宝石上AlN膜的质量
Improving the quality of AlN-on-sapphire films
- 27 简化混合信号电路中GaN器件的制造工艺
Simplifying mixed-signal circuits in GaN

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》中文版(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.

关于雅时国际商讯

雅时国际商讯(ACI)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。ACI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--为跨国公司和中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACI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。ACI亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACI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



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

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

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 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



5G 为 GaAs 带来巨大商机

5G 将在 4G 基础上带来一系列的性能提升,使它能更好地服务于手机通信、物联网、机器到机器间的通信等方面的应用。

Strategy Analytics 公司先进半导体应用部主任 Eric Higham 认为:5G 网络的出现会将 GaAs 的市场收益推至一个新的高度。

5G 发展的主要推动力来自于移动数据流量的飞速增长。Higham 引用了 Cisco System 的研究报告,该报告分析了从 2009 年到 2019 年移动数据流量的年复合增长率高达 75%,相当于 10 年中翻了 266 翻,这个数据是十分惊人的。Cisco 还预测了未来十年的进展情况,移动数据流量的增速会放缓,但依然会有翻 40 翻的增长。

Higham 指出,发展 5G 的好处不仅在于能应对数据流量上的增长,还有着其他方面的效益,他对 5G 的未来有着这样的畅想:“不论何人,何处何时,都能做到讯息无阻,共享无忧”,极致移动宽带技术将会与大容量、极高可靠性的机器通信技术相结合。

实现极致移动宽带需要达到的目标有:超过 10Gbit/s 的峰值数据传输速率,以及 100Mbit/s 的全面覆盖速率。与此同时,实现 5G 愿景的另外两大支柱可以概括成两个词:“即刻反应”和“万物互联”,这就需要涉及到触觉互联网和物联网,而且还需要包括机器到机器的通信技术。

实现 5G 高数据速率的核心技术是一种多输入多输出 (MIMO) 技术。该技术使用了多个传输和接收天线的链接来增加容量。Higham 强调了在该项技术上所取得的进步,包括来自贝尔实验室和 Rice 大学的团队所开发的 64 单元阵列,该阵列可以在 28GHz 频率下工作,在传输容量上有了 10 个数量级的提升,其外形尺寸为 2.5 英尺 × 2 英尺。“虽然它尺寸不小,但是作为基站应用还是可以接受的”。

Higham 认为,5G 将为 GaAs 行业带来了巨大的商机,因为它充分发挥了 III - V 族器件在高频响应、良好线性、超高效率方面的优势。根据 Strategy Analytics 的统计数据,2015 年全球 GaAs 业的利润仅略高于 70 亿美元,这个数字与整个化合物半导体业的 570 亿美元和整个半导体市场的 3360 亿美元的销售相比,实可谓相形见绌。

未来可能会出现很多阻碍 5G 发展步伐的不确定因素。5G 的商用化将于 2020 年启动,恰逢重大国际性体育赛事譬如东京奥运会的召开。技术上的展示效应能推动它的部署运用,但如果在应用中出现什么初期问题或者进度推迟等问题,5G 技术的崛起就可能受到受到影响。

调查显示,76% 移动网络运营商目前尚无采用 5G 的计划,主要顾虑在于投资回报率上的风险。Higham 认为,最为不济的情况就是它发展成为“增强版 4G”,但即便如此,GaAs 行业的利润依然会得到上升。

赵雪芹

化合物半导体产业前景剖析

在化合物半导体国际会议（CSI）上，业界分析师表示，5G 时代将大大有利于 GaAs 产业，在红外领域的发展机遇将使 LED 的产品实现多样化，多结电池也将成为航天应用中的主力。

RICHARD STEVENSON 报道

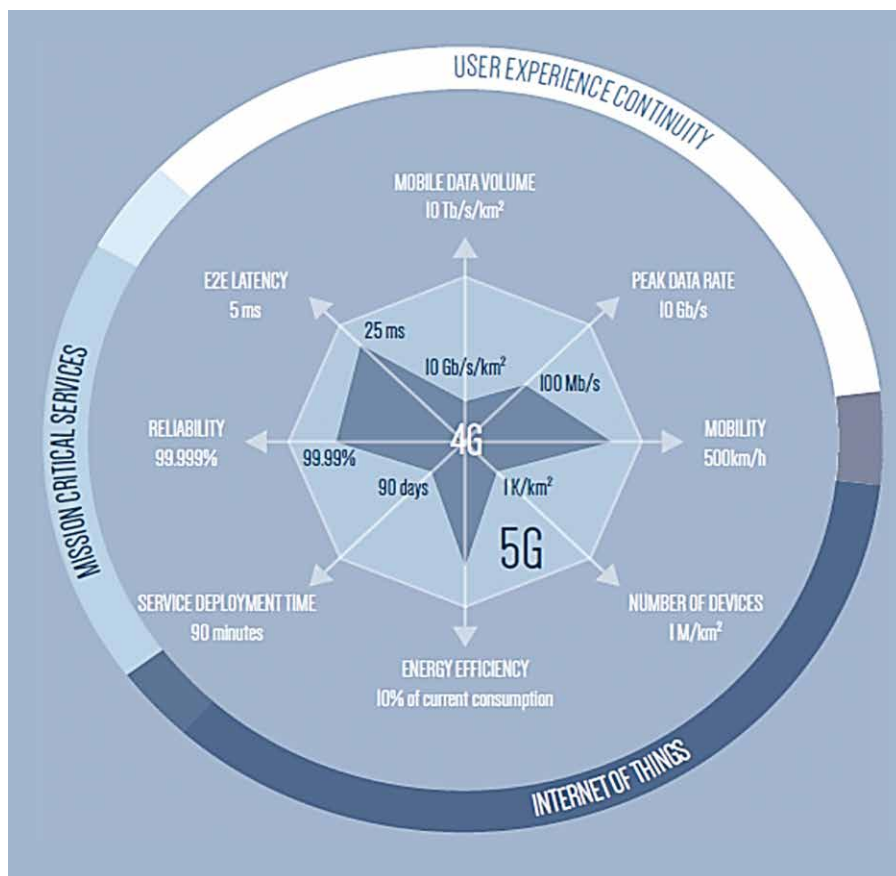
我们的行业既是统一的，也是高度分化的。不同制造商采用的都是相同的芯片制造技术，在衬底选择、外延生长和表征以及在后续的器件制造方面都采用了相类似的工艺。但生产的器件则用途各异，使得行业能向通信安全、医疗、航空航天以及家用电器等领域提供诸多类型的产品。

器件产品的分化如此明显，以至于没有人能够掌握这个行业各方面的全部知识。如果我们想要了解行业现状和前景，就需要听取来自多个领域专家的建议。

于是我们就来到了 CS（化合物半导体）国际会议现场，这里汇集了众多颇有声誉的市场分析师和业界资深人士，他们可就化合物半导体器件的发展可能性提供各自的见解。在今年三月初召开的 CS 国际会议正好是与光集成电路（PIC）会议在同一地点举行，会议主要讨论了以下几个方面的议题：5G 技术对 GaAs 芯片销售量的影响，红外 LED 产品在智能手机和手表中的应用机遇，聚光型光伏多结电池的出货量骤减问题，以及在下一代逻辑电路中如用 III-V 族替代硅来作为沟道材料时哪种器件结构最为合适等议题。

5G: 大大利好 GaAs

在 CS 国际会议上，Strategy Analytics 的先进半导体应用部主任 Eric



5G将在4G基础上带来一系列的性能提升，使它能够更好地服务于手机通信、物联网、机器到机器间的通信等方面的应用。

Higham 强调说：他认为 5G 网络的出现会将 GaAs 的市场收益推至一个新的高度。Higham 首先解释了为什么对这种更新颖、更优质网络的需求呼声是如此之高，继而又陈述了这种新技术应用对 GaAs 器件提出的性能要求。

5G 发展的主要推动力来自于移动数据流量的飞速增长。Higham 引用了

Cisco System 的研究报告，该报告分析了从 2009 年到 2019 年移动数据流量的年复合增长率高达 75%，相当于 10 年中翻了 266 翻，这个数据是十分惊人的。Cisco 还预测了未来十年的进展情况，移动数据流量的增速会放缓，但依然会有翻 40 翻的增长。

Higham 指出，发展 5G 的好处不

	Si solar cell today *	III-V/Si solar cell today	Required Cost for III-V/Si cells in flat plate modules
156x156 mm Mono-Si substrate	0.82 €	0.82 €	0.82 €
Growth substrate polishing/ preparation	--	5-10 € (CMP polished)	< 0.05 €
Processing: pn-junction, metal, ARC	0.66 €	0.66 €	0.66 €
5 µm III-V Ga(In)AsP growth	--	50-80 €	0.67 €
Waste treatment III-V materials	--	10 €	0.1 €
Depreciation of III-V reactor	--	Not considered	0.1 € (2.8 Mio wafers/year for 2-3 Mio € machine)
Total 156x156 mm solar cell	1.48 €	67 €	2.40 €
Efficiency	18 %		30 %
Watt Peak (Wp) @ 1000 W/m ²	4.38 Wp		7.30 Wp
Solar Cell cost in €/Wp	0.34 €/Wp		0.33 €/Wp
Area for 1000 Wp	5.6 m ²		3.3 m ²
PV Module cost in €/Wp	0.58 €/Wp		0.47 €/Wp (due to less area)

来自Fruanhofer ISE 的 Frank Dimroth 展示说道，为了使硅上III-V能与Si圆片展开竞争，那么外延生长的成本、衬底的制备和废弃物的处理等费用至少要降低100倍才行。

仅在于能应对数据流量上的增长，还有着其他方面的效益，他对5G的未来有着这样的畅想：“不论何人，何时何地，都能做到讯息无阻，共享无忧”，极致移动宽带技术将会与大容量、极高可靠性的机器通信技术相结合。

实现极致移动宽带需要达到的目标有：超过10Gbit/s的峰值数据传输速率，以及100Mbit/s的全面覆盖速率。与此同时，实现5G愿景的另外两大支柱可以概括成两个词：“即刻反应”和“万物互联”，这就需要涉及到触觉互联网和物联网，而且还需要包括机器到机器的通信技术。

在某些情况下，对这种传输线路的要求极为苛刻，其延迟必须控制在1ms之内，对可靠性也有着更为严格的要求。而在某些其他情况下，涉及的是大容量的机器通信，所使用的是几十或几百个具有极低成本的器件和寿命长达10年的电池。

实现5G高数据速率的核心技术是一种多输入多输出(MIMO)技术。该技术使用了多个传输和接收天线的链接来增加容量。Higham强调了在该项

技术上所取得的进步，包括来自贝尔实验室和Rice大学的团队所开发的64单元阵列，该阵列可以在28GHz频率下工作，在传输容量上有了10个数量级的提升，其外形尺寸为2.5英尺X2英尺。“虽然它尺寸不小，但是作为基站应用还是可以接受的”。

会议还讨论了工作频率为60GHz的64单元阵列模块，采用的是由TowerJazz公司SiGe工艺制造的22×22mm²芯片，Higham对其质疑道：该器件的尺寸是否过大，难以应用于手持设备的阵列中。

在5G的研发中已经使用了MIMO技术。诺基亚在高层建筑群的无线通讯中实现了70GHz下超过2Gbit/s的数据传输速率，三星在60km/h速度行驶的车辆上实现了最高值为2.5Gbit/s的传输速率，爱立信的研究结果更为惊人，其数据速率超过了10Gbit/s，富士通利用移动器件建造的基站，实现了超过11Gbit/s的数据传输速率。

Higham认为，5G将为GaAs行业带来了巨大的商机，因为它充分发挥了III-V族器件在高频响应、良

好线性、超高效率方面的优势。根据Strategy Analytics的统计数据，2015年全球GaAs业的利润仅略高于70亿美元，这个数字与整个化合物半导体业的570亿美元和整个半导体市场的3360亿美元的销售相比，实可谓相形见绌。

不过，Higham承认他的预测可能过于乐观，未来可能会出现很多阻碍5G发展步伐的不确定因素。5G的商用化将于2020年启动，恰逢重大国际性体育赛事譬如东京奥运会的召开。技术上的展示效应能推动它的部署运用，但如果在应用中出现什么初期问题或者进度推迟等问题，5G技术的崛起就可能受到受到影响。

Higham谈到了“Rethink Wireless and Lewis Insight”一文，重申了在5G推出上的不确定性。调查显示，76%移动网络运营商目前尚无采用5G的计划，主要顾虑在于投资回报率上的风险。

Higham认为，最为不济的情况就是它发展成为“增强版4G”，但他认为即便如此，GaAs行业的利润依然会得到上升。

红外发光二极管的市场增长的近期机会之一是用于可测量心率的智能手表中。





来自Fraunhofer ISE的Frank Dimroth给出的数据表明，CPV产业已日薄西山，其装机容量已从2012年的100MW骤降至2015年的20MW。

LED：寻求更大的利润空间

LED 芯片行业的主流应用方向是背光和普通照明的可见光 LED，这个领域的竞争异常激烈，利润空间很小。因此包括领军者 Osram, Nichia, Epistar 在内的一些芯片制造商开始转向红外 LED，尝试打通更为宽敞的盈利渠道。

Yole Développement 旗下的 LED、OLEM 和照明系统的技术和市场分析师 Perrick Boulay 在 CS 国际会议上讨论了红外 LED 的未来的主要市场和新类型的应用领域。

根据 Boulay 的统计，2014 年红外 LED 最大的市场是监控照相机，在这种类型的照相机中，红外 LED 是安装在照相镜头框的周边，来对相机所拍摄的场景进行照明。

现在，日用电子产品已经成为红外 LED 市场增长的主力。Boulay 解释道：“智能手表采用了红外 LED 技术来进行如心率等生命体征的监控”。红外 LED 还用于手机的接近式传感器，探测到近距离内的人耳，这样在接电话时触摸屏将会自动变暗。

展望更远的未来，Boulay 相信红外 LED 在汽车领域中的应用会将它的市场销量推向一个新高度。红外 LED 可以通过探测人眼而应用于驾驶员注意力的监控系统中，而最为重要的应用方向还是夜视仪和激光定位器 (LIDAR)，它是一种性能与雷达相类似的光学远程探测技术。

车载夜视系统一般有着两个光谱范围。一种是基于微红外辐射测量的被动谱带，其工作典型波长是在 8-14μm 的远红外区。另一种是基于红外 LED 或者其他发射源的主动谱带，其波长

是在 800nm 左右，用来对 CMOS 传感器所探测到的物体进行照明。后者的分辨率更高，但是难以对行人进行探测，而且探测范围仅有 200 米；前者的探测范围可达到 500 米，不过价格将更为高昂。这两种类型的红外探测系统早在 2000 年就均已问世，但是由于其售价超过了 2000 美元，高昂的成本使汽车制造商对它望而却步。

Boulay 认为，车载夜视系统的价格将会下降，成像系统的性能也会更好。他指出，在 2014 年 Autoliv 开始供应集近红外和远红外探测于一身的夜视系统，被梅赛德斯 S 系列奔驰车作为选装件，目前它的售价为 2260 美元，不过在价格上它将会有快速的降低，进而来提高它的普及率。

这位来自 Yole Développement 的分析师还简要概括了红外 LED 在其他方面的应用：在医疗行业，850nm 和 940nm 的红外 LED 能够用于皮肤科和神经科；在军工行业，红外 LED 可以用作只有夜视镜或夜视仪才可见的尾灯；在手机和平板电脑行业，通用遥控器功能正是采用了这项技术；在电影业，在放映屏幕后面用红外光照射，私自非法拍录所得的画质将会大大下

降，从而能有效地防止电影盗版。

可见在红外 LED 行业中是充满了机遇，因此越来越多的芯片制造商开始投向红外 LED 产品制造，这也不令人感到意外了。不过，Boulay 还是提醒大家，红外 LED 和白光 LED 器件虽师出同门，但在制造工艺上有着天壤之别，小型制造商想要进入这个已经被 Osram、Nichia、Epistar 等巨头已经至少统治了五年的行业，将会是充满困难和挑战的。相比之下，大型企业能更好地应对在产品转向上的挑战，Boulay 预测，在未来的短到中期内，大型企业将会逐步占领这个市场。

CPV 的崩溃

来自 Fraunhofer ISE 的学者 Frank Dimroth 向参会者展示了多结太阳能电池的发展前景。他认为在航空航天领域多结 PV 电池仍将占据着无可取代的地位，但仅此而已，在其他领域就很难再有大的发展了。

为了揭示 CPV 市场发展的重重困难，Dimroth 突出强调了 CPV 的主要竞争对手——硅工艺的几大亮点。硅工艺目前的价格极其低廉，根据 2015 年的数据，一个边长 156mm 的正方形



来自Yole Développement的分析师Pierick Boulay认为红外LED市场将会有进一步的扩大，因为它在智能手机、智能手表、车载夜视系统中有着越来越广的应用。

PV 硅晶片的价格只有 \$1.48 美元，而且它的市场已经发展的非常之成熟，去年全球出货量总计达 51GW，相当于 100 亿片 156mm 方形 PV 硅晶片，这个数字令人瞠目结舌。

Dimroth 讲到：“CPV 行业的败落很大程度上是与硅 PV 行业的产量过剩有关，这让 CPV 行业有点措手不及”。他展示了 Lux Research 的统计数据，在 2012 年、2013 年和 2014 年这三年中，其过剩产量分别达到 104%、85% 和 50%（后两个数据为估测值），与此同时，PV 模块的价格也呈直线下降的态势，使得羽翼初成的 CPV 行业就从此一蹶不振。大规模 CPV 装机量在 2012 年达到了总计超过 100MW 的峰值，而到 2014 年它的装机量缩减至半，而去年仅为 20MW。

在 Dimroth 的讲演中，他还比较了去年多结电池在航天领域和地面领域上的市场规模。据他估计，全球用于航天领域的 4 英寸晶圆的年出货量达到了 20 万片，而用于 CPV 领域的仅为 1.5 万片。

要想让 III-V 族材料能在地面 PV 市场中占据一席之地，一般的想法是把它们沉积在硅衬底上。Dimroth 指出了这样做的结果是能提高性能，Dimroth 介绍了一支包括美国俄亥俄州立大学的 Steve Ringle 在内的研究团队，他们研制出了效率超过 30% 的双结电池，该电池厚 5 μm ，采用 III-V 族外延堆叠层。

这种硅上 III-V 族电池比硅电池的效率要提高 12%，但目前效率上的提高还无法摆脱在成本上增加带来的限制。为了满足外延要求而对 156mm 方形晶片进行抛光只需 5-10 欧元的成本，而沉积 5 μm 厚的化合物半导体膜层所需的成本会猛涨至 50-80 欧元，这还没有算上 10 欧元的 III-V 族废弃物处理费用。事实就是这样，除非外延层生长、衬底制备、废料处理的费用能降低到目前的百分之一，否则 III-V 材料就很难能与传统硅材料展开竞争。

III-V 族逻辑器件的两大挑战

硅材料和化合物材料并非在所有的应用领域都是相互竞争的对手，在某些领域，我们需要做的是将两者结合到一起。硅基微处理器行业就是一个例子，由硅晶体管制成的集成电路正在持续地向 7nm 节点逼近，未来发展方向将会在硅晶体管的沟道中采用具有高电子迁移率的材料，譬如在硅基 pFET 中采用锗沟道，在硅基 nFET 中采用 InGaAs 沟道等，以在进行尺寸缩小时能降低单位晶体管的功耗。

来自 IMEC 的项目经理 Nadine Collaert 谈到了在各类硅基晶体管结构中采用非硅沟道的优缺点。首先她进一步谈论了由 Higham 所概括的未来发展趋势，比如机器学习的影响和物联网对集成电路的要求。不同的应用方向有着不同的需求：数据中心的集成电路是通过有线连接来工作，需要在一个恒定的功率密度下来提高性能；智能移动器件和传感器则必须在无线连接下工作，移动器件需要在恒定的漏电流下来提高它的性能，而传感器则需要在超低功耗下工作。

Collaert 表示说，要将 III-V 族和硅材料相结合，“需要能在 300mm 硅片上实现兼容”，包括在硅基工艺及其设备上。

随之，她大致描述了由 IMEC 研究的鳍式结构的替换问题。在硅衬底上生长高质量 III-V 族材料的难点在于两种材料间存在 8% 的晶格失配，因此极易引发各种缺陷。减少这种缺陷的一种办法是在 V 形沟槽中来生长化合物材料，因为很多类型的缺陷会在沟槽的侧壁处湮灭，不过缺陷还是会沿沟道方向伸展。

制作 III-V 族晶体管的另一大难点在于其栅介质材料的选择。与硅不同，III-V 族没有合适的天然氧化层，多数替代材料会使得它的界面陷阱密度增加，使得器件的可靠性降低。

IMEC 的工程师们最近已从传统



IMEC 的逻辑项目经理 Nadine Collaert 强调，缺陷密度和栅介质材料是开发硅上 III-V 族晶体管的两大主要挑战。

的 finFET 结构转为采用栅极被四周包围的器件结构，它能够增强对沟道的静电控制。这项改进极为成功，能反映载流子在沟道中运动速率的跨导从 500 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ 提升到了 2000 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ ，反映器件开关能力的亚阈值摆幅从 190 mV/decade 降到了 110 mV/decade。

在栅极堆叠层上的最新改进还可使亚阈值的摆幅进一步减小，但是任何类别的传统 FET 的亚阈值摆幅都无法降到 60 mV/decade 以下。Collaert 女士认为，如要得到更小的亚阈值摆幅值，就得要考虑采用隧道 FET。她对这种器件进行了解释：隧道 FET 的电流密度较小可能是一个问题，但是通过用窄禁带宽度材料如 InGaAs 来替代硅材料，将能使它的电流密度得到增加。IMEC 目前在这个领域很活跃，现已成功用 $\text{In}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$ 来替代 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 来增加器件的电流密度。

在 III-V 族材料能对硅微处理器市场产生影响之前，还有很长的路要走。但正如 CS 国际会议讲演者所说的那样，III-V 族材料已经在诸多行业中发挥着重要的作用。到本世纪 20 年代前后这种化合物半导体芯片究竟将会在哪些领域获得应用，让我们拭目以待。☞

跨越磁控管时代

最新一代的 LDMOS 和 GaN 射频功率器件的出现宣告了磁控管时代的结束吗？

当 固态射频功率业界的眼光正锁定在将 LDMOS 和 GaN 器件用于微波基站的功率放大器上时，这个大有前途的市场为功率器件制造商提供了丰富的想象空间。

你家里的微波炉现在都是靠磁控管产生微波来将里面的食物煮熟。

但是改用固态射频功率源的话，就能够让你对传输到炉内各个位置的微波能量实现更为精确的控制。除了可以简单地控制微波能量水平之外，根据实际的情况以及微波炉内的食物的大小和种类，这种微波能量的输送还可以通过调节频率来达到最佳化。

家用电器的 OEM 厂商，例如 E.G.O. Elektro-Gerätebau 和 Whirlpool 都注意到了上述优点，在去年年底，这些公司与业界元件制造商通力合作成立了一个射频功率联盟（RFEA）。

一些小型的、但正在成长中的联盟，包括 MACOM 和最近从 NXP 衍生出来的 Ampleon 等公司，正打算制订新的标准来推动固态射频功率源的发展。

正如 RFEA 执行主任 Klaus Werner 告诉《化合物半导体》杂志那样：“我们正在研究我们的技术发展路线图，并且要专注讨论我们产业发展中的热点”。

那么固态射频微波炉到底是什么样的呢？根据 Werner 所述，固态射频产生和传统微波的生成在原理上是一样的，都是采用固态射频功率放大器和信号调制。

但是，射频功率并没有被输送到



固态射频器件是一种可控性更好的射频功率和加热源。

天线来传输数据，而是通过波导传送到微波炉里来加热食物。

事实上，在今年年初，NXP 半导体公司发布了一款它的‘聪明型’固态射频微波炉的概念验证款，该微波炉可以精确地控制在什么时候、什么地方、用多大能量来加热食物。

正如 Werner 所强调的那样：“我也想看到 Whirlpool 和 E.G.O. Elektro-Gerätebau 明年能在市场上销售固态射频功率微波炉，我已知道了某些公司正打算在 2016 年发布这种产品”。

Werner 补充道：“这种第一代固态微波炉在价格上不会对磁控管产品产生优势，但是它会给顾客提供更好的微波可控性”。

小体积并且高效率

这种第一代固态微波炉的核心部件是 LDMOS 射频晶体管，它对于将固态射频功率源推向市场起着非常重要的作用。

令人捧腹可笑的是，Werner 过去曾把固态射频器件描述成“野兽”，但是他强调了更小、更有效率的最新一代 LDMOS 器件能将固态射频功率器件的性能提升到可以进入消费应用中市场。

举个例子，NXP 已经发布了很多种工作在 2.45GHz 到 915MHz 之间的射频功率器件，而且它最近衍生的公司，Ampleon 希望能从其中得到回报。

正如这家新公司的多元市场和射



射频功率的业务副总裁，Rob Hoeben 所说的那样：“我们曾经不遗余力的去设计和制造基于磁控应用的晶体管，现在它在现有的基站应用市场上有着很大的发展潜力”。

他补充道：“很多习惯于采用传统磁控元件的客户现在都希望在它们的设计中应用固态功率源。我们希望这一市场会成长起来，这样对大家都有利”。

Ampleon 公司的 Rob Hoeben 说道：

“至少在未来五年内，射频功率源在应用价格上的敏感性将使 LDMOS 得地位要好过任何 GaN 技术”。

Hoeben 相信：LDMOS 晶体管，而不是硅上 GaN 或者 SiC 上 GaN，将会在这一新的市场中占有一席之地。

他说：“我们同时拥有 LDMOS 和 SiC 上 GaN 这两种可供选择技术，但是在射频功率应用上，我们只考虑 LDMOS 技术”，“顾客对产品的需求是在一定的价格水平上能保持产品在性能上的稳定和高质量。但是，无论是价格还是性能，任何形式的 GaN 器件目前都还无法做到这一点”。

他进一步说道：“至少在未来五年内，射频功率源在应用价格上的敏感性将使 LDMOS 得地位要好过任何 GaN 技术”。

正如他所指出的那样，这位副总裁对变化是持开放态度的，公司目前向基站和航空航天应用提供了大量的

GaN 器件，但会“保留对这种选择的开放性”。

他说道：“在过去的二十年里，LDMOS 已经历了好几代的技术变革，但是如果硅上 GaN 能持续的降低制造成本，再考虑到它的功能表现的话，这种技术还是有优势的”。

他还补充道：“我们是 IC 设计公司，所以我们可以考虑每件事情”。

Wener 对 SiC 上 GaN 也抱有同样的观点，简单说来：“目前我没有看到 SiC 上 GaN 出现在射频功率领域，该业界里的人士只对器件的重复性和可靠性感兴趣，至于器件的效率（SiC 上 GaN 的优势），他们觉得这还不是个大的问题”。

但是，RFEA 的执行主任对 SiC 上 GaN 有着不同的看法：“如果这项技术可以在 8 寸晶圆上应用的话，那么它的成本就会接近 LDMOS，到时候我们就会手握一项伟大的技术”。☞



KEEPING AN EYE ON THE FUTURE

Visit us at SEMICON Taiwan 2016, Sept 7-9, Booth 100

Evatec brings you advanced thin film production solutions for Advanced Functionality Materials

From new high piezoelectric coefficient materials like AlScN to highly aligned NiFe soft magnetic layers or complex optical interference coatings, Evatec sputter platforms and processes help you keep an eye on the future. Advanced Process Control (APC) technologies bring precision and throughput to the deposition of new **Advanced Functionality Materials** in **Wireless, MEMS** and **LED** technologies. To find out more about Evatec processes and platforms visit www.evatecnet.com or contact your local office.



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



MORE INFO

ADVANCED PACKAGING • HP OPTICS • MEMS • OPTOELECTRONICS • POWER DEVICES • WIRELESS • THE THIN FILM POWERHOUSE

www.evatecnet.com

促进 GaN 器件产品的多样化

MOCVD 反应器可以快速地进行富铝 GaN 外延层的生长，并能对外延层中的掺杂分布进行严格的控制，促进 UV LED 和垂直功率器件产量的提升。

KOH MATSUMOTO, TAIYO NIPPON SANSO 公司

到目前为止，GaN 芯片中销售量最高的是 LED 器件，它可作为众多液晶屏的背光源，并且推动了为追求更高发光效率的固态光源革命。

未来的十几年中，GaN LED 可能仍然会继续盈利，但是很快就要进入到增长的停滞期了。所以，如果要想使 GaN 芯片能保持长期的增长势头，那么我们就需要一种能够产生巨大商业利益的新型 LED 芯片。

UV LED 和垂直型电子器件是 GaN 基器件中最具发展前景的两类器件。前者很有可能取代现在的汞灯，可应用于很多领域，如杀菌灭毒、水净化、光学加工、树脂固化、降解环境污染物和防止医院内感染等。用 UV LED 取代汞灯有很多的好处，例如可以提高灯的寿命，它是一种可产生更宽波长范围、波长可调节、功率更高的发光源，具有能提高电光转换效率、缩小器件体积和减少对环境的影响等优点。

同时，由于在商业上的竞争性，GaN 基功率器件还可能会占据硅器件的市场份额，因为现有

硅器件所具有的窄禁带、较低电子迁移率和较低的击穿电场等缺点阻碍了它的进一步发展。很多研究宽禁带功率器件的研究者都把目光投向在 GaN 体衬底上制作垂直型电子器件上，因为这样做可以简化布线设计，使得这种器件可封装在一

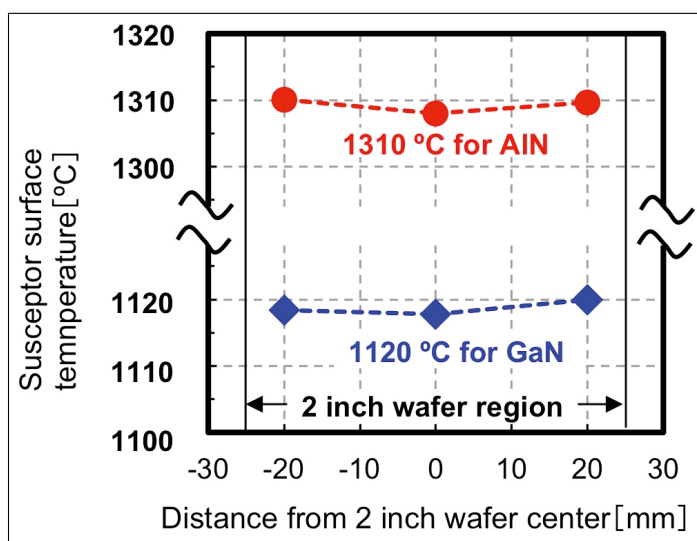


图1. SR4000HT在2英寸晶圆基座表面具有很好的温度均匀性。

图2. AlN和Al_{0.6}Ga_{0.4}N的高生长速率使得能够以较短的时间来完成厚外延层结构的生长。

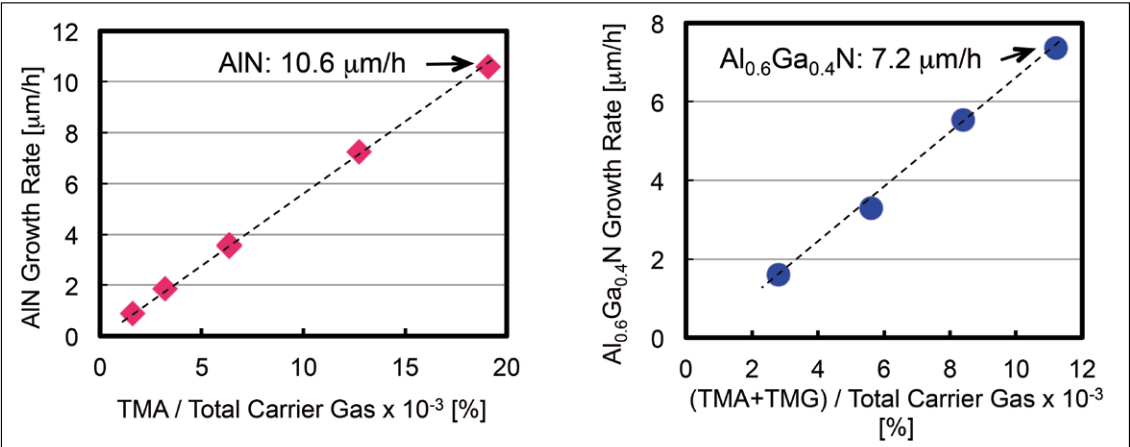
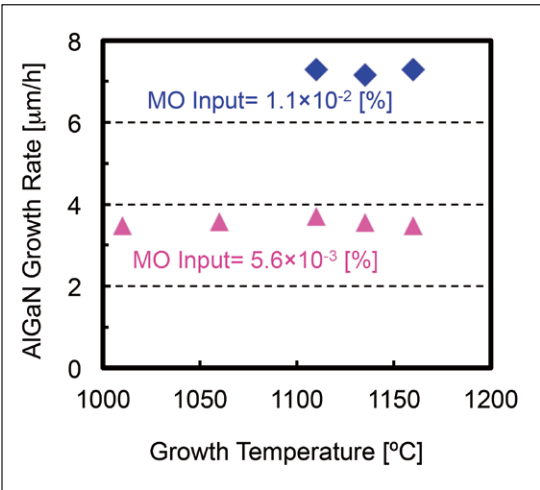


图3. MOCVD工艺工程师将会受益于AlGa_{0.4}N的生长速率随生长温度的变化而只有很小的波动。



个小型的封装体中。

为了进一步提高UV LED的经济效益，MOCVD设备必须要具有以下性能：在高铝浓度下能够对气相反应进行控制，能控制好碳的浓度，并能在高的生长速率下保证沉积膜层的高质量。我们是位于日本东京的Taiyo Nippon Sanso公司，我们的MOCVD反应器可以满足上述所有的要求，我们的MOCVD反应器系列组合的特点是具有“垂直三层”的结构设计和能在常压下进行生长。我们最新的改进是将高温单元引进到了我们的GaN MOCVD设备中，这些种设备的历史

非常悠久，其第一代产品的诞生可以追溯到上世纪的80年代。

制备UV LED和垂直GaN功率器件的最大挑战之一就是要能生长出高质量的AlN膜和高铝含量的AlGa_{0.4}N膜层。由于三甲基铝（TMA）、三甲基镓（TMG）和氨之间的气相反应极易产生颗粒，所以难以获得高质量的膜层生长。为了解决这个问题，前几年我们在2014年3月期的《Compound Semiconductor》杂志上介绍了一种型号为SR4000的高反应气体流速的MOCVD设备。

我们将高温单元引入我们最近发售的SR4000HT设备中，该高温单元有着高效率的热屏蔽、高功率输入和经优化的反应器内部设计等优点（如图1所示，它具有非常均衡的表面温度），使我们就可以将参与沉积的晶圆加热到1300℃以上。高温反应对于形成厚的富铝膜层来说是非常有利的，而富铝厚膜正是制备UV LED和GaN功率器件所要求的。尤其对于GaN功率器件来说，其外延层需要堆叠到数十微米的厚度，而高温对在二次生长过程之间的反应器烘培处理则是非常有利的。

我们的SR4000HT和SR4000设备有着很多共同的特点，已经证明我们这两种设备在R&D

表1. SR4000HT设备的具体参数。

Item	Detail
Wafer size	3 2 inch, 1 4 inch
Wafer Temperature	Up to 1300 °C
Growth pressure	From 10 kPa to 100 kPa
Gas flow	Three layered horizontal laminar flow
Safety standard	Correspond to UL regulation
Options	In-situ monitor, gas concentration monitor, etc.

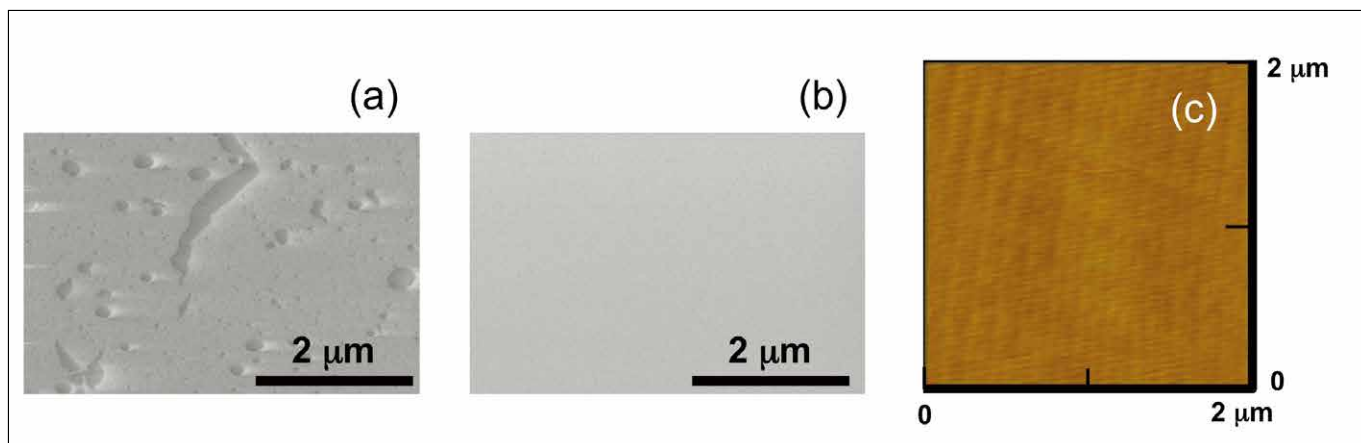


图4. 在进行MOCVD生长并进行高温退火后的AlN模板表面的SEM图像 (a)，以及AlN薄膜的SEM图像 (b) 和AFM图像 (c)。

和 InGaN 基激光器的小规模生产上，以及在 GaN 基电子器件领域中是很受欢迎的。SR4000HT 设备仍然保留着原来的三层喷气嘴设计、从常压到低压的大范围气压控制能力和一个高流速的运载气体。每次加工量是 3 片 2 英寸晶圆或 1 片 4 英寸晶圆。

制备高质量的 UV LED 外延层

我们已经介绍过我们的 SR4000HT 设备在生长 AlN 和 AlGaIn 膜层上的能力了。对外延层的检测结果表明用我们反应器生长的膜层其材料质量非常之高。UV LED 具有一个位于底部的 AlN 缓冲层，还有一个高铝含量的 AlGaIn 层，所以其理想的衬底就是采用 AlN 体材料。但是，由于缺乏成熟的技术来生长这种衬底材料，使得在目前市场上广泛采用的是用蓝宝石来作为 UV LED 的衬底材料。

想要在蓝宝石衬底上生长出高质量的 AlN 和 AlGaIn 膜层，就需要更高的生长温度，以增强在生长界面上铝原子的迁移，但是这仍然还是一个寄生的气相反映。我们的 SR4000HT 设备可以满足这种需求，可以使得 AlN 的生长速率达到 $10.6\mu\text{m/h}$ ， $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 的生长速率可以达到 $7.2\mu\text{m/h}$ （如图 2 所示，在不同的 TMA 和 TMG 反应气体浓度下的生长速率）。AlGaIn 在 1000°C 到 1160°C 之间的生长速率几乎是个常数（如图 3 所示），这说明我们对气相反应有着很好的控制能力。

我们的 SR4000HT 设备也可以用来制备 AlN 模板晶圆，并且还可以在这种经加工过的衬底上进行 AlN 膜层的再生长。我们已经在蓝宝石衬底的 AlN 模板上再生长了一层 $3\mu\text{m}$ 厚的 AlN 薄膜，并且在一氧化碳和氮气的混合气氛下进行高温退火，这些工作是由日本东北大学和三重大学的研

究者实际进行的。对 AlN (002) 和 AlN (102) 模板进行 x 射线摇摆曲线测量所得到的半高宽分别是 64 和 191 弧秒。对在 AlN 模板晶圆上所沉积的 $3\mu\text{m}$ 厚 AlN 薄膜测量也得到了类似的结果，AlN (002) 的半高宽是 49 弧秒，AlN (102) 的半高宽是 214 弧秒。这些测量结果表明，将这些技术相结合，就能够制备出具有低位错密度的高质量 AlN 膜层。除了具有较窄的 X 线衍射半峰宽 (FWHM)，在 1300°C 下生长的 AlN 膜层表面还有着原子级别的优异平坦度。

这个 $3\mu\text{m}$ 厚 AlN 膜的扫描电子显微镜和原子力显微镜检测也显现出它有着平滑且高质量的表面（如图 4 所示）。该表面的均方根粗糙程度为 0.103nm ，并且原子力显微镜检测显示，它具有原子级别的平整度。

高性能的 UV LED 需要具有良好电学性能的 n 型 AlGaIn 膜层。要生长好这种薄膜，减少那些会补偿施主的杂质是非常重要的。减少碳杂质元素的含量十分关键，因为它会与 GaN 中的氮原

由于 SR4000HT 在高的生长速率下还能保持较低的碳浓度，使得反应器只需数个小时就能完成整个二极管结构层的生长。



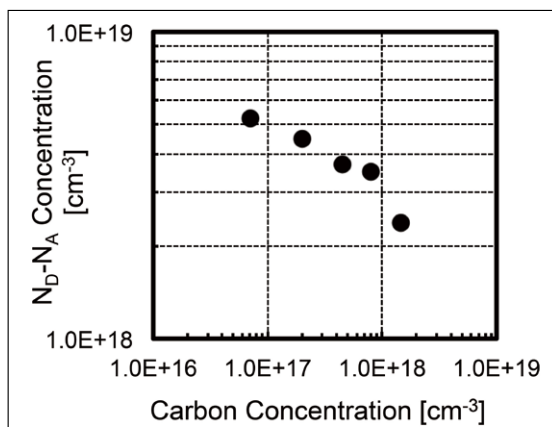


图5. 即使生长速率达到7.2 $\mu\text{m/h}$, 也可以用于低碳浓度的n-型 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 的生长。

子相结合, 从而产生一个深能级的受主。我们发现即使是在生长速率为7.2 $\mu\text{m/h}$ 时, 仍然可以将碳原子浓度从 $5.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 减少到 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 这一结果充分展示了 SR4000HT 在 UV LED 制造上的能力 (如图5所示)。

另一个展示我们设备性能的成果来自于台湾工业技术研究所 (ITRI) 的工程师们, 他们采用了我们的 SR4000 设备来制造 UV LED。该器件的电致发光光谱在 284nm 处达到峰值, 其半高宽是 15nm, 并且其深能级发光也非常弱 (如图6所示)。

改进对二极管的掺杂

另一个能增加 GaN 芯片出货量的主要驱动力是来自于 GaN 垂直型电子器件技术, 由于它有着更低的导通电阻, 使得它的效率要显著高于现今的硅器件。要减小这个导通电阻就需要对掺杂浓度进行精确的控制, 并且要尽可能减少杂质。对

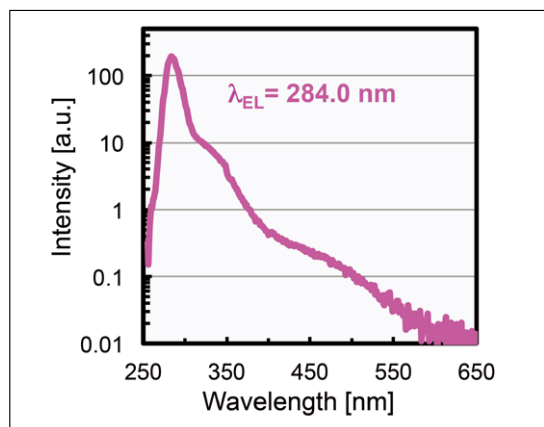


图6. 陡峭的电致发光谱证明了SR4000HT生长UV LED外延层的能力。

MOCVD 工艺工程师的另一个挑战就是要采用高的生长速率来生长这种具有极高击穿电压的厚外延层。

我们的 MOCVD 反应器就非常适合来生长这种功率器件, 因为它们能适应非常大范围的反应气压、生长速率和 V/III 原子比。这种在性能上的柔性使得我们的设备在高速率生长时还具有对杂质的优异控制能力。在本文的余下的部分, 我们将详细地介绍我们 MOCVD 反应器在同质衬底上生长 GaN p-n 二极管时对降低碳和硅杂质, 以及在掺杂浓度上的控制能力。

我们已经进行了双极型 p-n 二极管, 而不是对单极肖特基势垒二极管生长工艺的研究, 因为这种双极型二极管有着更小的导通电阻。在该二极管器件的硅掺杂 n- 型薄层中, 它的载流子浓度必须严格控制在 10^{15} cm^{-3} 到 10^{19} cm^{-3} 之间, 同时其碳原子浓度也必须小于 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。为了使 n- 型载流子浓度的最小值不超过之前所述的范围, 硅烷的供气流速和碳杂质的浓度必须要非常低, 要满足这些要求就得依赖于 MOCVD 反应器的设计和生长技术。

传统的 MOCVD 反应器经常会不适合生长这种类型的二极管, 因为它们在生长 n- 型 GaN 时的速率太低, 导致整个生长时间需要达到数十个小时。但是, 由于我们的设备具有较低的碳原子浓度和高的生长速率等特点, 使其只需要几个小时就可以完成整个外延层的生长 (如图7所示)。

在常压下膜层的生长速率为 2.3 $\mu\text{m/h}$ 时, 碳原子浓度可以低至 $3.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。我们能够在高的生长速率条件下得到更低的碳原子浓度。在某些器件结构中, 高生长速率下也需要较高的碳原子浓度, 例如硅上 GaN 器件, 较高的碳浓度可以

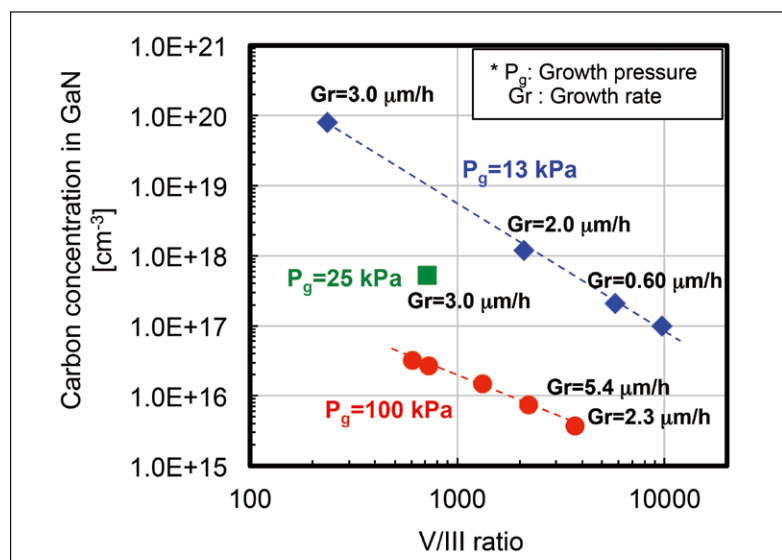


图7. 即使是在高的生长速率下, 通过选择合适的V/III原子比和生长气压, 碳元素浓度可以在 10^{15} cm^{-3} 到 10^{20} cm^{-3} 之间进行调节。

提高其电阻率。

我们还利用了我们的反应器来制作垂直型 GaN 电子器件, 该器件结构是由美国康奈尔大学和日本 Hosei 大学的研究者们率先设计的 (如图 8 所示)。以 $2.3\mu\text{m/h}$ 的生长速率来沉积未经掺杂的 GaN 膜层, 以及以 $5.4\mu\text{m/h}$ 生长速率来沉积 n-型 GaN 膜层, 并将它们用于 GaN 衬底上 p-n 结二极管的制造中, 对这些器件进行了二次离子质谱 (SIMS) 分析 (如图 9 所示)。分析检查结果表明在未经掺杂的 GaN 膜层中碳和硅原子的浓度都很低, 在 p-型膜层中这些元素的掺杂也非常之精确。值得令人注意的是, 我们只用了不到 4 个小时就完成了整个 $20\mu\text{m}$ 厚 n-型 GaN 漂移层的生长。

我们目前正在对这种二极管进行电学表征, 我们预见该表征结果将能证明我们的 MOCVD 反应器是非常适合于 GaN 二极管的生长。正如我们之前所展示的那样, 它所具有的高温沉积性能使得它们成为制作 UV LED 的一个极好的选择。

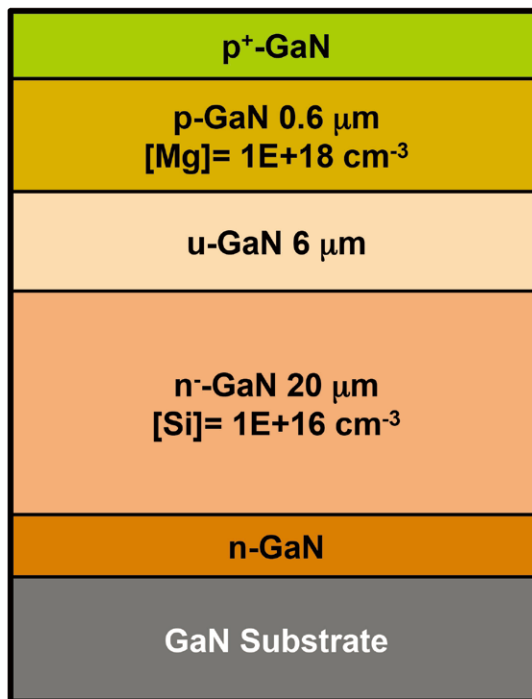


图8. 由Taiyo Nippon Sanso工程师生长的p-n二极管结构

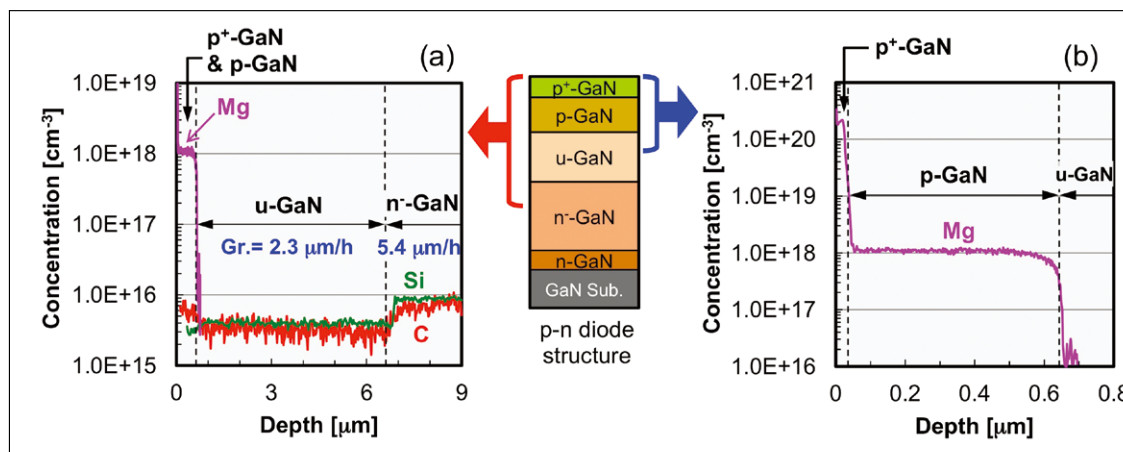


图9. SIMS剖面元素分布证明了SR4000设备的优秀性能, 它生长的膜层具有低的杂质浓度, 并且对掺杂分布的控制也很好。 (a) $9\mu\text{m}$ 深的SIMS剖面分布图。 (b) $0.8\mu\text{m}$ 深的SIMS剖面分布图。不同元素的探测极限如下: 碳为 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; 硅为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 镁为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

中国科学家在单晶石墨烯制备上取得突破

石墨烯是由碳原子构成的只有一层原子厚度的二维晶体材料, 在电、光、机械强度上的优异特性, 使其在电子学、太阳能电池、传感器等领域有着众多潜在应用。虽然需求巨大, 但其制备速度缓慢, 利用率一直徘徊在 25% 左右, 成为制约其进入实际应用的瓶颈之一。目前制备高质量石墨烯的方法, 除胶带剥离法、碳化硅或金属表面外延生长法外, 主要是化学气相沉积法。但通过 CVD 技术生产单晶石墨烯薄膜仍然需要耗费很长的时间, 制备一块厘米见方的单晶石墨烯薄膜至少需要一天的时间, 十分缓慢。

中国北京大学和香港理工大学的研究人员开发出一种新技术, 通过对 CVD 的调整和改进, 他们将石墨烯薄膜生产的速度提高了 150 倍, 能将这一过程从每秒 0.4 微米加速到每秒 60 微米。而其中的诀窍, 就是在参与反应的铜箔上直接加入了少许氧气。

新研究为石墨烯的大规模应用奠定了基础。研究人员称, 对石墨烯产业而言, 该研究意义重大。通过该技术石墨烯的生产将能采用效率更高的卷对卷制程。而产量的增加和成本的下降, 会进一步扩大石墨烯的使用范围, 刺激其需求量的增长。

提升硅上 GaN LED 的竞争力

采用 200mm 硅衬底的晶圆级芯片尺寸封装 (WLCSP) 可以增强 LED 发射波长的一致性, 降低热致光效衰减, 提升光发射效率, 并可大幅削减生产成本。

HYUN KUM, JOOSUNG KIM, YONGJO TAK, JONGSUN MAENG, JUN-YOUN KIM, YOUNGSOO PARK; 三星电子公司

固态照明的时代已经来临。为了使 LED 灯泡的购买人群从投资该项科技的早期采购者拓展到广大人群, 使这种高效、可靠的光源能够走进千家万户来降低他们的电费开销, 我们还需要进一步改进 LED 灯泡的性能, 并降低它的价格。

为了降低 LED 灯泡的价格, 让更多消费者愿意用它来替代荧光灯, 首要任务就是要降低 LED 芯片的制造成本。为实现这一目标的一种方法是使用更便宜、尺寸更大的衬底材料, 例如 200mm 硅晶圆。LED 生产商还在考虑的另一种选项, 即

是采用晶圆级芯片尺寸封装 (WLCSP) 形式, 这种封装能够省去传统 LED 封装复杂的筛选和工艺过程, 能够直接在外延晶圆上来制作这种封装结构。

在位于韩国京畿道的三星电子公司, 我们将这两种方法结合在一起, 即使用 WLCSP 封装方法在 200mm 尺寸的硅上 GaN 晶圆上来制造 LED (其成本削减的潜力见图 1)。这种方法的意义重大, 因为在传统的蓝宝石衬底晶圆上尚未实现真正的 WLCSP 技术, 这是由多重原因所造成的, 其中包括“蓝光泄漏”问题, 即蓝光光子会从器件的侧边逸出 (见图 2)。实际的晶圆级封装工艺无法解决这个问题, 因此蓝宝石上 GaN 晶圆必须经过切割、筛选 (binned) 后, 再将它一个个“移栽”到热胶带上以涂敷荧光层, 之后再进行下一步的切割。

而我们的 WLCSP 工艺是基于薄膜倒装芯片技术, 在去除硅衬底的同时还减薄了 GaN 层的厚度 (小于 3 μm), 这就从根本上消除了蓝光的侧面泄漏问题, 还简化了荧光层涂敷和芯片切割工艺。由于省略了分类和“移栽”过程, 芯片的发射光波长一致性就变得至关重要。因为荧光膜层覆盖整个晶圆表面, 要获得所需的色温和显色指数, 就必须依靠芯片发射光波长和荧光膜层荧光特性间实现完美的匹配。

为了使我们的 WLCSP 工艺具有足够高的良



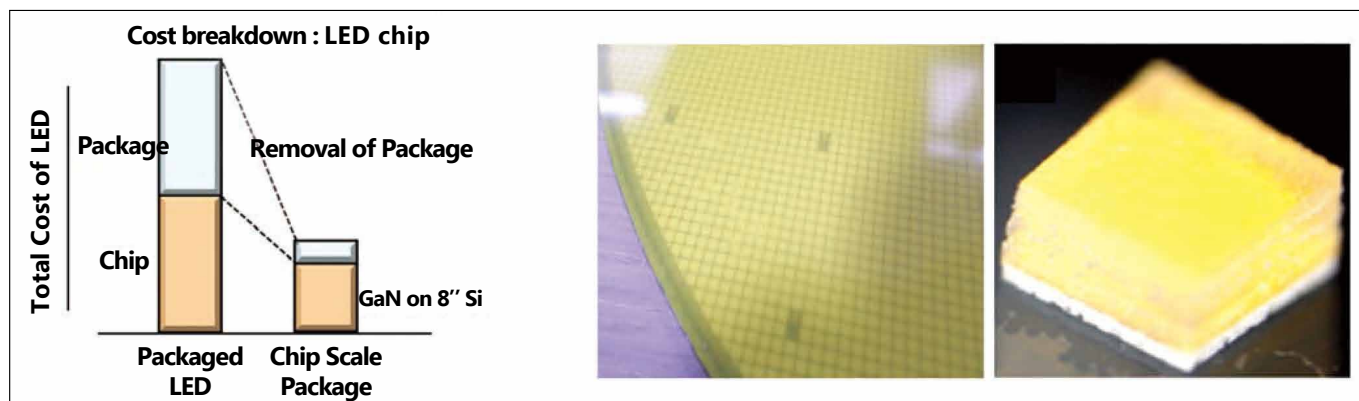


图1. 改用晶圆级芯片尺寸封装和200mm硅晶圆，能使LED制造成本大幅下降60%。

品率，我们需要在 200mm 硅上 GaN 晶圆上制造出高性能、高可靠性、高波长一致性的 LED 芯片。

具体而言，我们的目标是在 95% 以上的晶圆面积区域将其发光波长范围控制在 4nm 以内，这是一个相当高的标准。作为对照，目前对在先进 100mm 蓝宝石衬底上制作的 LED 而言，它在整个晶圆范围的发光波长均匀性范围大概是 8nm。

用于硅上 GaN 生长的 MOCVD 设备

Aixtron AIX G5+ 系统是能够完美达到发射波长均匀性严格要求的、同时还具有高产量和低生产成本的理想设备，该系统可以实现 5×200 mm 多晶圆的批量生产。

该反应器的高良品率是依靠诸多核心技术得以实现的，保证晶圆良品率的手段有：旋转对称沉积的固有配置、射频加热器的优化设计、生长气体分布的精细调节等手段。

使用硅衬底来替代蓝宝石衬底是另一项关键性技术，因为硅的热导率更高，可以减小晶圆的弯曲，从而能进一步减小整个晶圆和所沉积外延结构之间的温度梯度。由于每一片晶圆的温度都可以控制在目标温度上，就可以做到 WLCSP 所要求的晶圆上的整体均匀性（见图 3）。

AIX G5+ 系统的另一个优势是它具有热激活化学反应器的重置功能，这保证了每一个工艺循环的生长条件都能保持相同，同时还能避免了由

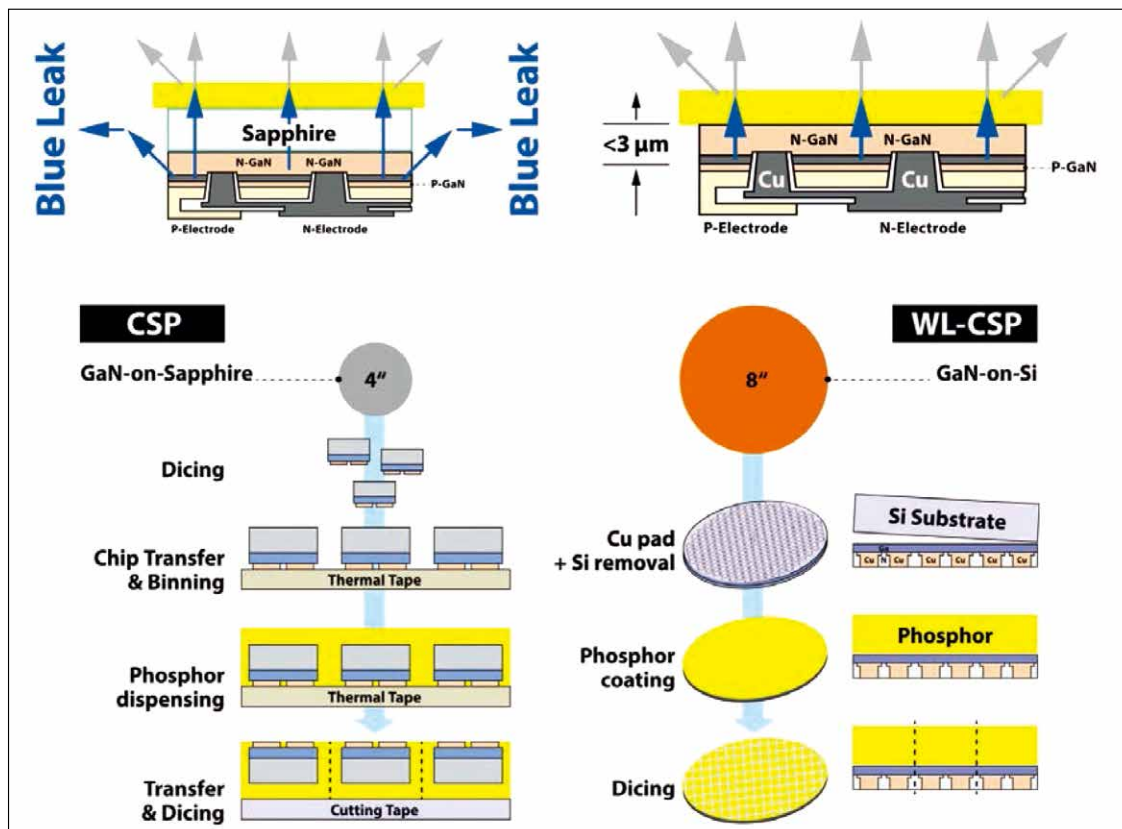


图2. 蓝宝石衬底不适用于实际的晶圆级芯片尺寸的封装，因为有蓝光从芯片侧面泄出（上左图），而硅上GaN就不存在这个问题（上右图）。使用蓝宝石衬底的工艺包括有切割、芯片“移栽”和筛选、荧光层涂敷、芯片再次“移栽”和切割（下图）。

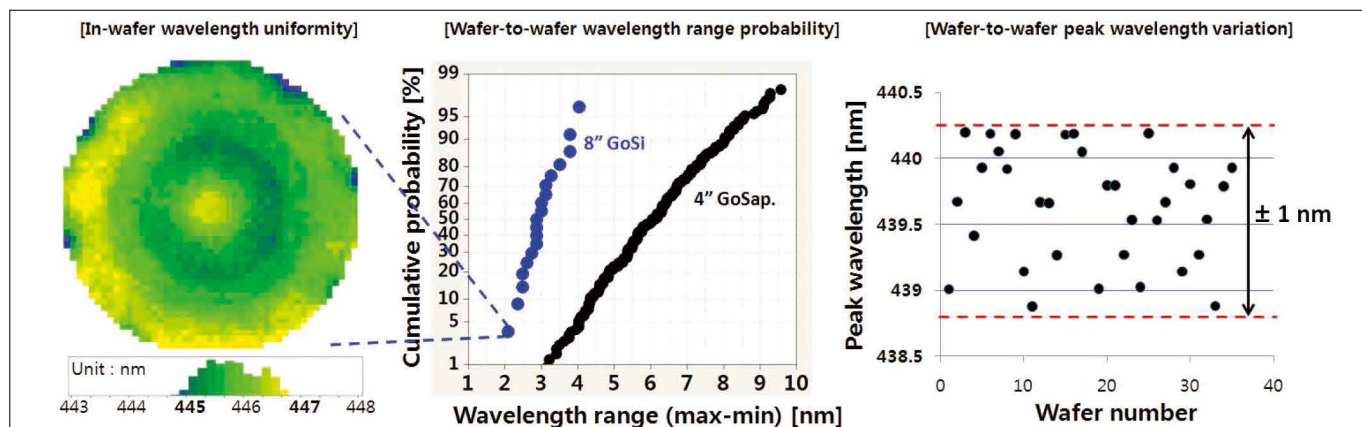


图3.尽管硅上Ga_N (GoSi) 晶圆的直径达200mm,要比蓝宝石上Ga_N (GoSap) 晶圆尺寸增加了一倍,但GoSi晶圆的发射光波长均匀性仍然要显著优于GoSap。

于镓的回熔而导致的硅晶圆的边缘损坏现象,还可以使颗粒和缺陷造成的良品率损失达到最小化(见图4)。

尽管使用大直径硅晶圆来制造LED的优点非常吸引人,但该类器件尚未真正进入照明市场的主流。这是因为生长在硅片上Ga_N薄膜的质量还不是很理想,影响了这类器件的效率和可靠性。

想要在硅衬底上生长出高质量的Ga_N外延层并不容易,因为这两种材料之间存在着显著的晶格失配。并且二者热膨胀系数的差异接近50%,这种差异会引起晶体缺陷,例如位错和开裂,影响了器件的效率和可靠性,最终导致器件的低良品率和高成本。

当Ga_N外延层中的应力超过某一阈值时,就会发生开裂。这种开裂往往会发生在晶圆的边缘,因为该区域的应力在生长过程中和完成后都是最大的,而且这些开裂还会进一步扩展到晶圆的中心区域,从而严重地降低了良品率。

硅上Ga_N外延层中另一种常见的晶体缺陷是螺旋线位错,因为两种材料存在17%的晶格失配,在生长过程中就会形成这种线位错。采用应力补偿层即缓冲层,可以减少位错的发生。但即使采用这种方法,在硅上生长的Ga_N的位错密度

仍然要比在蓝宝石衬底上生长的高两到三倍。位错问题成为硅上Ga_N LED进入市场的一大障碍,因为它降低了器件的效率,引发各种可靠性问题,并且由于存在静电放电效应,它还可能是产生一些致命失效的源头。

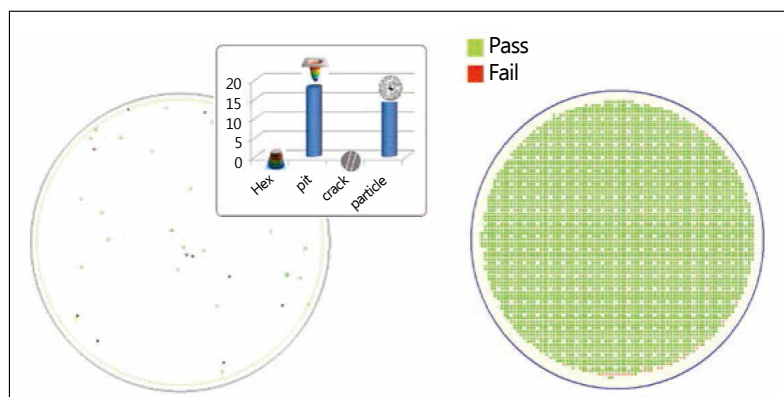
通过优化生长在200mm硅上LED结构的缓冲层,我们可以开发出位错密度仅为 $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 的无开裂材料,使得可用于制造LED芯片的优良晶圆比例有了很大的提高(见图4)。

相比于白炽灯和荧光灯而言,固态照明的一大优势是光源的长寿命。尽管LED的价格相比于其它灯泡要高一些,但是需要更换的频率大幅降低,并且它还能节省电费的开支。

考虑到固态照明的长寿命,就不难理解设计师对于硅上Ga_N外延层中缺陷的担忧。通常而言,对于固态光源产生致命失效和性能退化机制的研究表明,整个模块比器件更容易产生失效。

令人可喜的是,我们在硅上Ga_N LED上的研究证实了这一观点,数千小时的可靠性测试显示,与蓝宝石衬底相比,在相同的应力控制工艺条件下,硅衬底器件具有类似的可靠性,这两类LED的性能退化特性也十分相似(器件测试结果见图5)。

图4.晶圆上缺陷和LED合格/不合格分布图表明,Aixtron AIX G5+生产的外延层质量十分优异。



减小器件的光效衰减

在较高的驱动电流下,器件发光效率产生下降称之为光效衰减(droop)效应,它是制约所有类型Ga_N LED性能的因素,然而,我们的LED由于热致光效衰减的性能下降仅仅只有蓝宝石基器件的一半(见图6)。较低的热致光效衰减具有重大意义,因为大多数中、高频率器件的工作温度都远高于室温,而在高的温度下单位电费所能产生的流明光强度是衡量LED性价比的最佳标

准。值得注意的是热致光效衰减的精确物理机制目前还处于研究阶段,但对某些过程已经有所了解,例如载流子溢出问题在较高温度下将会更加剧烈。

直接测量结温对确定器件在特定应用中的性能将会有很大的帮助。通过这种测量,我们发现硅上器件的工作温度要比蓝宝石上器件的低约 20°C (为了测定这个参数,我们首先提取热系数,它可以通过以下方法进行测量,即施加一个很小幅度脉冲电流作为精确控制环境温度的函数,然后再考虑正向电压随温度的变化。在我们的实验中,在 350mA 驱动电流条件下,将环境温度从 25°C 变化至 85°C 来测量正向电压的变化)。更低的结温是有益的,因为它可降低生产成本,结温升高就意味着需要采用更加昂贵的散热片和冷却系统来防止芯片和封装性能的退化。

与在蓝宝石上生长不同,在硅上生长的 GaN 层中存在着更高层次的应变,它由于会损害晶体的质量而被视为不良因素。但这种看法并不全面,因为采用硅材料衬底会增强辐射复合过程。在蓝宝石上生长的 GaN 外延层中存在着压应变,会在外延层中因出现压电效应而产生内建电场。这个电场是由于在 GaN/InGaIn 界面晶体结构中的电子状态重排而产生的,这个电场使得电子和空穴在量子势阱中分离,降低两者波函数的交叠,最终降低了辐射效率。

当在硅上生长 GaN 外延层时情况就大不相同。施加在有源区的是拉伸应变,但由于二者热膨胀系数不同,正好能部分抵消压电效应产生的电场。由于最终电场的减弱,加强了电子和空穴波函数的交叠,使得辐射效率得到提升。

除了辐射效率得到了增强,电场强度的降低还使得发射光波长向着长波方向移动。如果保持势阱的厚度不变,用于调节波长的铟的用量就可以减少。这具有很重要的意义,因为减少铟含量就意味着可以在更高温度下进行生长,进而可提升晶体的质量。

我们器件的另一个优势是具有较低的热致光效衰减,比在蓝宝石上生长的 WLCSP LED 的热致光效衰减值要低 73%。这项优势充分说明我们硅上 GaN 外延层出众的晶体质量。这种器件活性区的热致衰减要低于对于蓝宝石衬底的同类器件,随之对应的是器件具有平缓的性能衰减和更长的使用寿命。固态照明产品的预期寿命将会突

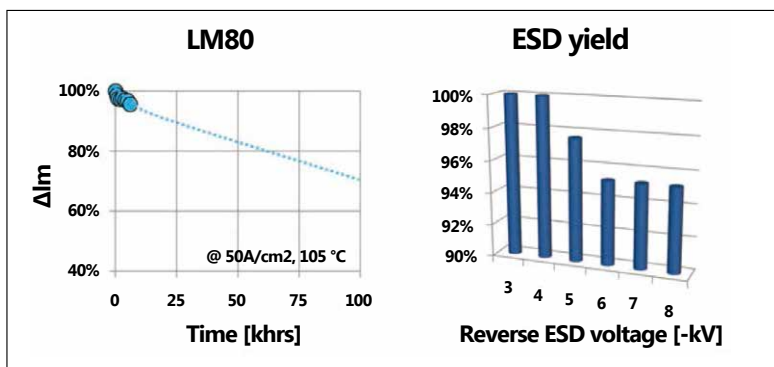


图5. 三星公司的硅上 GaN LED 具有强大的抗静电损伤能力,经过长时间的运行,其输出只有适度的下降。注: 2500 小时相当于连续使用 3 年的时长。

破 50000 小时,我们器件的性能将具有极大的长期效益。

在未来,硅上生长 LED 的整体性能将有望超越传统 LED。这类器件的发展前景十分喜人,因为硅衬底材料更加适用于 WLSCP 技术。例如,要从 GaN 外延层上去除硅衬底的难度相对较低,为了降低由 LED 芯片光子吸收导致效率衰减而采用 GaN 层厚度减薄工艺也比较简单。此外,在晶圆层面上对 GaN 或者荧光层的表面进行图形化的难度也有所降低,这些图形可以使光子提取的效率达到最大化。如果在器件的封装层面上再采取一些新颖的设计,例如多层和多色荧光层涂敷,其发光效率将会有更大的提升。

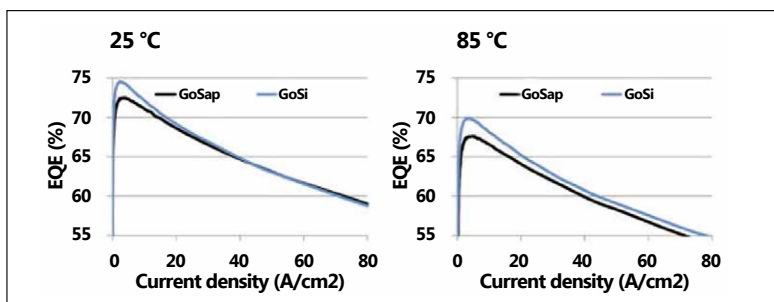


图6. 在 25°C 时,硅上 GaN (GoSi)LED 的外量子效率 (EQE) 与蓝宝石上 GaN (GoSap) LED 十分接近,但在典型的工作温度 85°C 时,(GoSi)LED 的外量子效率 (EQE) 要更高一些。

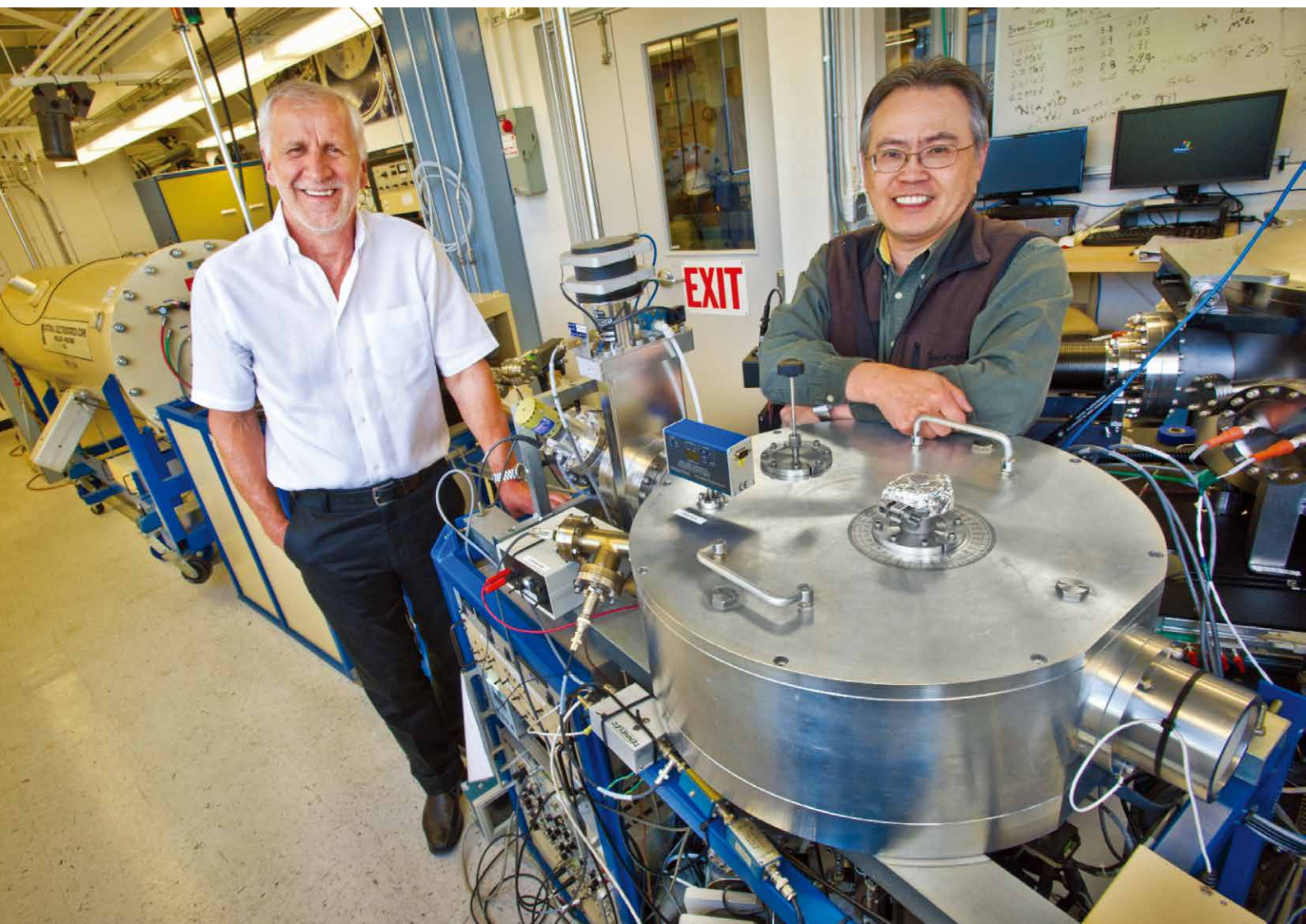
基于目前的工作进展,我们对硅上 GaN LED 的发展前景充满信心。通过结合 WLCSP 封装技术与硅衬底上生长 GaN 外延层的 AIX G5+ 系统在设备上优势,我们已经成功地生产出与蓝宝石衬底同类产品性能相当的高效率 LED 器件。目前我们正在着手将该器件实现商业化,期待着它能在 LED 市场中占据一席之地。如果该种器件经过优化后其性能可以超越传统同类器件,或者开拓出新的目标市场,它的市场份额将会继续得以扩大。例如,我们的技术更易于缩小器件尺寸,所得到的微型 LED 可以运用于下一代显示技术中。尽管蓝宝石衬底 LED 器件还掌握着现在的市场,但未来一定属于硅衬底 LED 器件。

采用新型合金材料制作 高效率光伏电池

通过形成中间能带和采用低浓度氮化物材料能够将单结太阳能电池的效率提升到一个新的高度。

KIN MAN YU, 香港城市大学

WLADEKWALUKIEWICZ, 美国劳伦斯伯克利国家实验室



目前世界上的各国政府都在鼓励使用更多的可再生能源以减少二氧化碳的排放量，这推动了太阳能电池更广泛的应用，其中绝大多数太阳能电池都是由硅材料制成的。

虽然硅电池目前还具有最高的性价比，但它也存在重大的弱点，包括它的效率还不够高以及进一步改进的空间也很小。这些弱点是由于太阳光光子具有很大的能量分布范围所造成的。太阳光辐射能量从 0.4 eV 的中红外波段一直延伸到 4 eV 的深紫外波段，对于一个单结太阳能电池来说，是不可能把所有这些能量的光子都实现有效的吸收，大于禁带能隙宽度能量的光子必然要把其超出的能量部分转化为热，而小于禁带能隙宽度的光子将不会被吸收。

为了提高光伏转换效率，就必须将太阳光谱进行分区，由具有不同禁带能隙宽度的分立电池来进行吸收，这就是多结太阳能电池的基本工作原理，它具有由不同材料形成的 PN 结串联结构。

最早确立多结太阳能光电池类型是基于 III-V 化合物电池，它也可能将锗电池作为它的底部单元。这种特定结构的多结光电池已是一种商业化技术，主要应用于卫星电源以及兆瓦级的地面功率发电站中，此时这种多结光电池将作为太阳能聚光 PV 系统的核心部件。然而，由于这种光电池高的材料成本以及与外延生长相关的工艺复杂性等原因，这种光电池芯片是一种非常昂贵的器件。

有一种非常具有发展前景的替代技术——在 50 多年前，当时工作于加州 El Monte 的 Hoffman 电子公司的 Martin Wolf 先生提出了使用多能带单结光电池器件的解决方案。这一技术是在半导体带隙中引入了一个处于部分填充状态的窄能带，可以实现与具有不同带隙多结光电池相同的目标。这项对单结光电池的结构改进可以通过吸收两个较低能量的光子来实现从价带到导带的跃迁（参见图 1 中的简化能带图）。在某种意义上，中间能带起到了跳板的作用，使得具有小于带隙能量光子所激发的电子能够穿越整个带隙。

这些含有中间能带的太阳能电池具有大幅度提高光转换效率的潜力。在 1997 年由西班牙马德里技术大学的 Antonio Luque 和 Antonio Marti 所进行的详细对比计算表明，当这种中间能带位于理想的位置时，其光功率转换效率将有可能达到 63%，此值是远高于双结串联光电

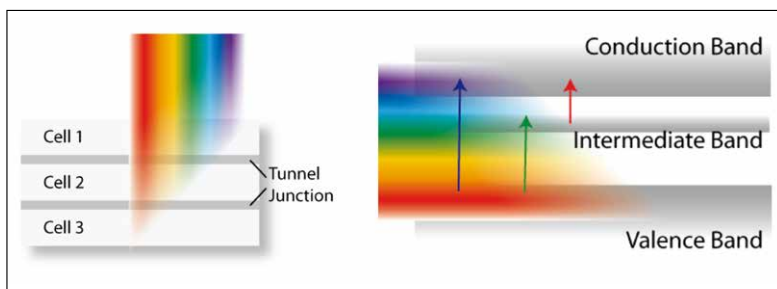


图1.多结 (MJ) 太阳能电池 (左图) 和中间能带太阳能电池 (IBSC) (右图) 的简化能带图。在多结太阳能电池中，具有不同带隙的半导体材料相互堆叠，并将具有最大带隙的材料位于最上方，使得它能够吸收太阳光谱的很大部分。在中间能带太阳能电池 (IBSC) 中，太阳能辐射可由价带 (VB) 到中间带 (IB) 或导带 (CB) 的跃迁所吸收，与此同时也会被从导带 (CB) 到中间带 (IB) 的跃迁所吸收。

池的效率值。更为重要的是，如果是采用包含有两个中间态能带的材料来制作 PN 结，其转换效率可以达到近 72%。

由于难以获得这种具有合适中间能带结构的理想半导体材料，要实现这一高转换效率并非易事。其中一种选择是转为采用量子限制效应的半导体超晶格和量子点材料，这一技术已经获得了一定的成功。然而，很难将它们制作成一种器件，因为此时的半导体材料既要具有足够小的维度尺寸，又要有一个具有足够光吸收性能的中间能带。与此同时，还要能控制好结构中的应变，以使它不会损伤到材料的质量。如材料的质量降低，其光学质量也就会降低，更为重要的是会对中间能带的位置调整产生限制。

高度不匹配的合金

我们香港城市大学和位于美国加州伯克利的劳伦斯国家实验室之间所建立的伙伴合作关系，是为了追求一种与众不同的基于高度不匹配合金

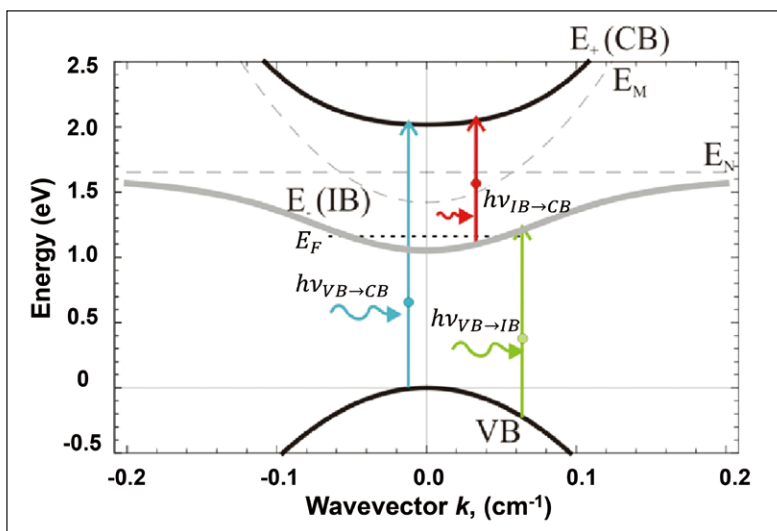


图2. $\text{GaN}_{0.024}\text{As}_{0.976}$ 的能带结构，它是采用能带的反交叉干扰 (BAC) 模型来进行计算的。

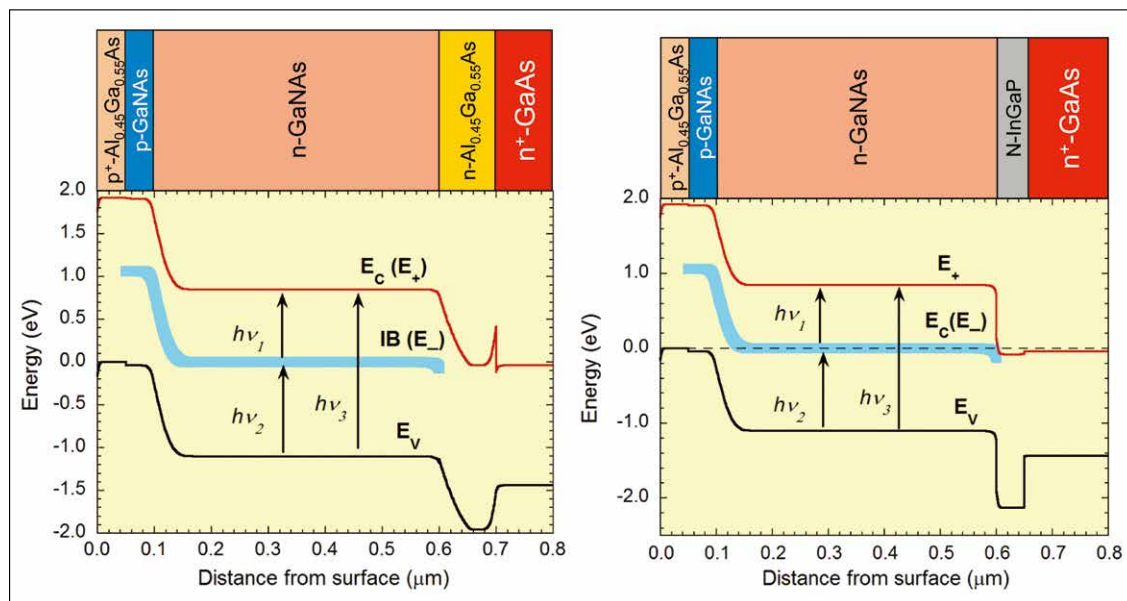


图3. (a) 具有中间能带 (BIB) 阻挡层的器件结构及其能带图, 它的中间能带 (IB) 与接触是断开的。利用 IB 跃迁生成的电子-空穴对被标记为 $h\nu_1$ 和 $h\nu_2$ 。从价带 (VB) 到导带 (CB) 的跃迁由 $h\nu_3$ 表示。 (b) 一个将 IB 连接到背面接触的 UIB 器件结构及其能带图。

材料的制备方法。这种由我们伯克利研究小组所开发的新型材料是将不同类型的半导体材料进行合金化熔合后形成的。

已经进行了深入研究最主要的两种高度不匹配合金材料是稀氮化物和稀氧化物。对前者而言, 在 III-V 族化合物半导体材料中的部分 V 族原子由氮原子替代, 而对后者而言, 在 II-VI 族化合物半导体材料中的部分 VI 族原子是由氧原子所替代。

我们选择把重点放在稀释氮化物的研究上,

是因为氮原子部分替代砷原子会产生一种截然不同的 $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ 能带结构。

这类高度不匹合金的能带结构可以很好地用能带的反交叉 (anti-crossing) 模型来进行描述。例如, 采用这一模型对 $\text{GaN}_{0.024}\text{As}_{0.976}$ 的能带结构进行计算, 结果表明如果用氮原子来替代 2.4% 的砷原子, 那将会使导带分裂成两个子能带: 一个是能量较低的、相对较窄的能带, 它形成的中间能带位于价带上方的 1.1 eV 处, 另一个是能量较高的、位于原 GaAs 导带 0.5 eV 下方的能带 (能带图见图 2)。这种稀氮化物材料十分适合用于具有制作中间能带的太阳能电池, 因为它能够实现 0.9 eV、1.1 eV 和 1.9 eV 光子能量为的光跃迁。

要实现中间能带太阳能电池的关键性要求之一是中间能带与电荷收集接触区的电学隔离, 以确保能具有由最大的带隙所决定的操作电压。

为了说明这个先决条件的重要性, 我们用 MOCVD 制作了两种器件。一种具有一个被阻挡层的中间能带, 这是在表面和衬底侧形成一个 AlGaAs 阻挡层来实现 (见图 3 (a))。对电荷收集接触区与中间能带之间隔离失效所产生的失效危险采取了特别的预防措施, 就是将中间能带连接到器件的衬底侧上 (见图 3 (b))。

实现中间能带太阳能电池的另一个必要条件是它中间能带有着部分填充的电子, 使它能增加低能量光子的 (0.9 eV-1.10 eV) 的光吸收, 也促进了电子从中间能带到导带的跃迁。我们是通

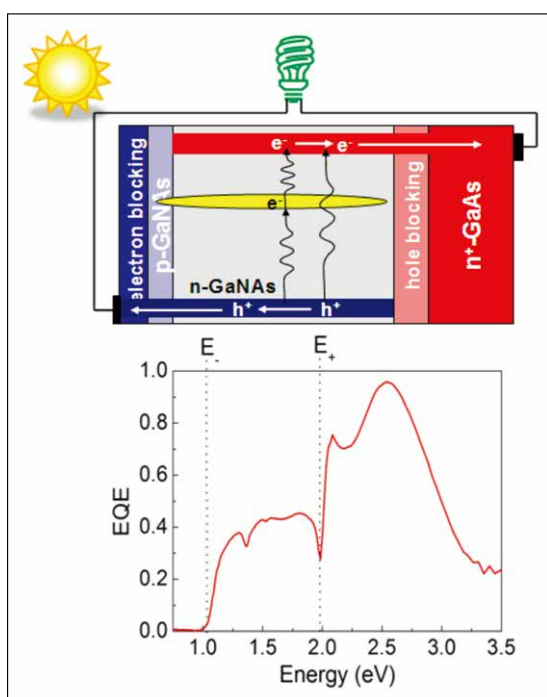


图4.具有阻挡层的中间能带太阳能电池的结构, 以及对这种器件外量子效率 (EQE) 的测量。

通过对 GaNAs 进行碲掺杂来达到这一目标的, 这样就使中间能带中的电子浓度可以达到 10^{16} 到 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 之间。

我们测量了这种器件的外量子效率 (见图 4)。正如我们所预料的那样, 在没有阻挡层的中间能带结构中, 中间能带充当了导带的作用。这样将会形成一种单一带隙的光伏电池器件, 表征测试显示它具有 1.1 eV 的带隙。在更高的光子能量段, 光电流会迅速地下降。与此形成鲜明的对比是, 在具有阻挡层的中间能带器件中, 光电流清楚显示出有着两个阈值。其中第一个阈值出现在 1.1 eV 左右, 对应的是价带至中间能带的跃迁。第二个阈值出现在 2 eV, 它所对应的是从价带直接到导带的光跃迁。产生这两种阈值的原因已经由光调制反射光谱测量所证实。

在这种特定的器件中, 背面阻挡层可以防止从中间能带到背接触的电子输运。所以, 电池在光照下, 积累在中间能带中的电子会吸收另一种低能量的光子, 然后激发到导带而由背面接触所收集, 也有可能是将电子直接从价带激发到导带, 这就是更高能量 2eV 阈值的由来。

总之, 对外量子效率的测量结果是非常令人鼓舞的。具有阻挡层的中间能带器件有着多波段太阳能电池所必需的全部基本功能: 由最大带隙决定的开路电压, 以及通过子能带的双光子吸收性能来提升光电流。

基于高度不匹配合金的中间能带太阳能电池还存在有一个困扰性的问题, 就是在价带、中间能带和导带之间三种光跃迁之间的耦合度较弱。为了确定在我们的器件是否会产生这种问题, 我们已经测量了这种中间能带太阳能电池的电致发光性能 (结果见图 5 所示)。我们发现在反向和正向偏压下具有阻挡层的中间能带器件会产生双色的电致发光, 这应该是一个好消息, 因为它清晰地表明存在着两种光跃迁, 这是中间能带太阳能电池能正常工作的必要条件。不出所料, 正向偏置的无阻挡层的中间能带结构会产生一个孤立的电致发光峰, 这是由中间能带和价带之间的激发所造成的。

虽然通过我们的努力, 已经可以清晰地证明基于高度不匹配合金的中间能带太阳能电池具有良好工作性能。但这种器件还需要做出进一步的改进, 这将包括还必须增加在中间能带和导带之间的光耦合强度, 增加导带中电子的扩散长度及

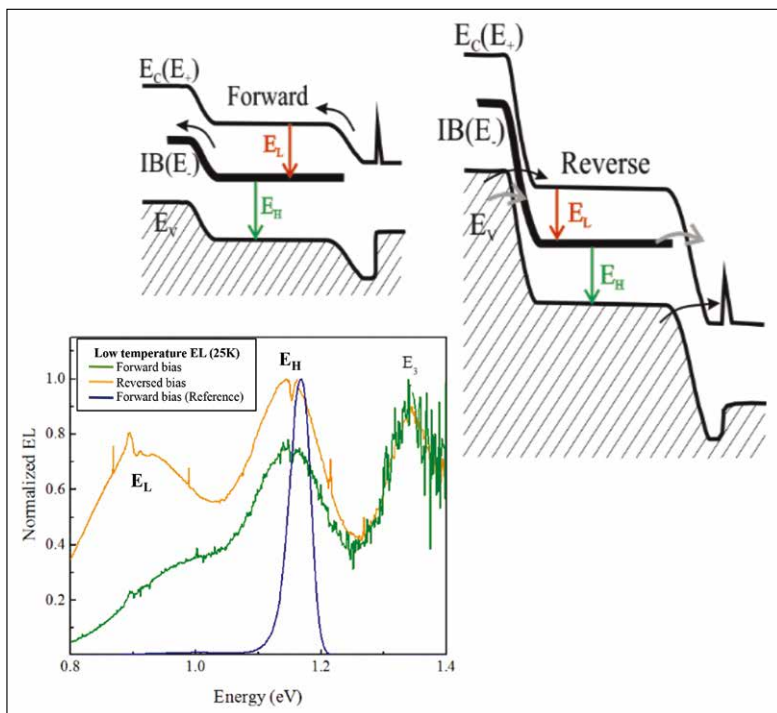


图5.如图3 (a)所示的具有阻挡层的中间能带 (BIB) 结构在正向 (绿色) 和反向 (黄色) 偏置下的电致发光光谱。无阻挡层中间能带 (UIB) 结构的电致发光 (蓝色) 是作为一个参照显示, 此外还显示了正向和反向偏压下BIB结构的能带图。

其寿命, 以及进一步优化吸收层中的掺杂等。

在性能上的进一步提升还需要引入新的高度不匹配的合金材料, 这种材料很可能具有新的稀氮化物合金的组份, 能提供一个与导带有更好相对位置的中间能带。最近已在这种新的高度不匹合金材料的制备工艺中取得了进展, 它可能更适合于在中间能带太阳能电池中的应用, 这种新材料包括有稀的 II-VI 族氧化物以及基于 GaAsP 的稀 III-V 族四元氮化物。

扩展阅读

- R. R. King et. al. Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., New Orleans, 2002 (IEEE, New York, 2002) pp. 852-5
- A. Luque et. al. Phys. Rev. Lett. 78 5014 (1997)
- Y. Okada et. al. Appl. Phys. Rev. 2 021302 (2015)
- W. Shan et. al. Phys. Rev. Lett. 82 1221 (1999)
- K. M. Yu et. al. Phys. Rev. Lett. 91 246403-4 (2003)
- Nair López et. al. Phys. Rev. Lett. 106 028701 (2011)
- Y. J. Kuan et. al. Appl. Phys. Lett. 102 112105 (2013)
- T. Tanaka et. al. Appl. Phys. Lett. 102 052111 (2013)
- Nair Lopez et. al. Adv. Energy Mats. 1501820 (2015)

揭示氮化物 LED 点缺陷的本质

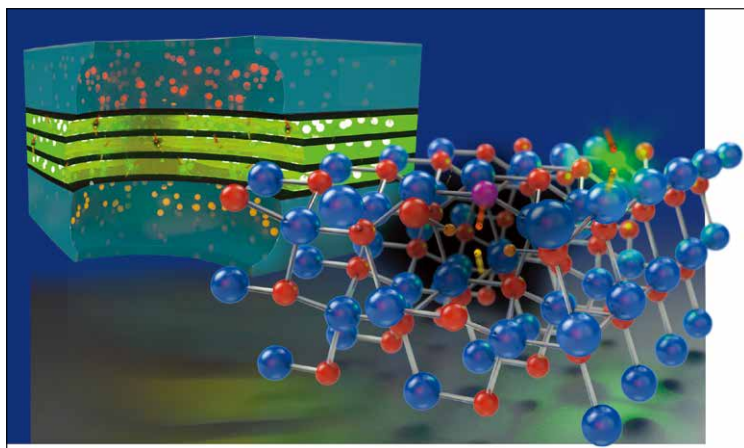
模拟计算结果表明基于镓空位的络合物会极大地增强 LED 的非辐射复合过程。

来自美国和立陶宛的科研合作伙伴进行的计算结果强调了减少 LED 中点缺陷的必要性。

这个由计算科学家组成的团队发现 LED 中的缺陷来自于镓空位，这种空位会与氧原子或者氢原子络合，从而产生非常高的 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合率。由于这种复合过程是非辐射性的，所以它会降低 LED 的发光效率，从而降低了 LED 的性能。

这个工作团队的另一个发现是当缺陷密度一定时，SRH 复合率会随着镓在 InGa_N 层中的浓度增加而提升。这种趋势被称之为“绿色鸿沟 (green-gap)”，即随着 InGa_N 量子阱中镓浓度的增加，会使 LED 的外量子效率随之降低，从而导致 LED 由发蓝光变成了发绿光。

这个计算团队的发言人，来自美国加州大学 Santa Barbara 分校 (UCSB) 的 Chris Van de Walle 对这种“核心缺陷”进行了解释：“镓中的空位造成了



模拟计算结果发现了 III 族氮化物 SRH 复合的微观起因：镓空位与氧和/或氢原子形成了络合物。

SRH 复合，但是镓空位有非常高的形成能，而这不太可能是由它自身因素所造成”。

然而，镓空位可以与氧原子结合会产生一种具有较低形成能的络合物。所以要降低当前淀积技术中的氧原子参与水平，这对制备高效率的 LED 来说是非常重要的。

为了计算有着不同形式镓空位 InGa_N 合金的非辐射效率，采用了该团队成员 Audrius Alkauskas 开发的公式和数值代码。Audrius Alkauskas 曾经在 UCSB 工作，但是他现在加入了位于立陶宛 Vilnius 物理科学技术中心 (CPS) 和 Kaunas 技术大学 (KUT)。

能否提供描述能带结构形成能和缺陷浓度的精确数值代码，对于是否能获得一个可靠的模拟结果来说是非常重要的。对于缺陷问题，该团队采用了 Vienna Ab initio 数值模拟软件包，该软件包已广泛地应用于密度泛函代码的计算中。

计算结果表明，根据 InGa_N 中组分不同，镓空位与沉积反应器中存在着两种常见的、但又不希望见到的杂质——即氧和氢原子——所形成的络合

物，使得 SRH 复合率将会有 6 个数量级上的波动 (详见图 1)。

Van de Walle 说道：“我们确实考虑了镓空位可能会与其它杂质比如硅原子形成络合物”，但是，它们不可能对复合率产生这么大的影响，因为它们有着更高的形成能，而且硅杂质浓度也不可能有这么高”。

不是基于镓空位的缺陷类型也有可能对 SRH 复合率产生影响，但是这一猜想是否正确需要花费很大的额外精力和计算时间才能给予证实。

Van de Walle 说道：“我们不能说我们已经把所有具有潜在性危害的缺陷都已研究透彻”，“但是我们认为，对那些现今已确认会产生主要影响的缺陷进行研究，其成果是有必要给予发表的”。

该团队的下一个工作目标就是调研是否还有其它类型的缺陷和杂质会对氮化物 LED 的 SRH 复合率产生大的影响。

C. Dreyer et. al. Appl. Phys. Lett. 108 141101 (2016)

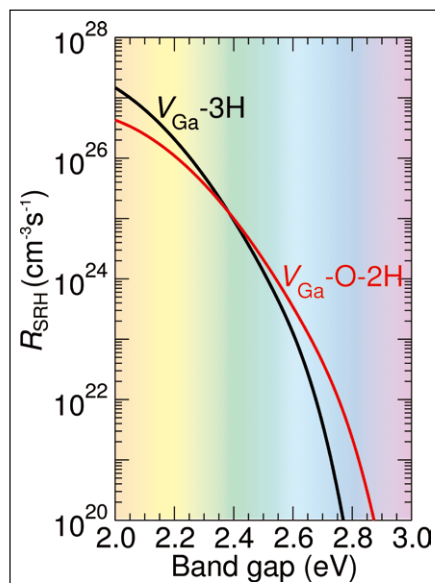


图1. 镓含量的增加会使SRH复合率急剧上升，称之为InGa_N LED中的“绿色鸿沟”效应。



Messe München

Connecting Global Competence

智领未来世界

点胶注胶
元器件制造

电子制造
自动化
运动控制

印刷电路板
电子制造服务

线束加工
连接器制造

焊接设备
及材料

SMT表面
贴装技术

官方微信



慕尼黑上海电子生产设备展

 **electronica China** 2017

同期举办

慕尼黑上海电子展

electronicachina.com.cn

2017年3月14-16日

上海新国际博览中心 E1、E2、E3馆

productronicachina.com.cn



productronica China 2017

慕尼黑上海电子生产设备展

参展联系 · 陈铭 先生 · 电话 +86-21-2020-5553 · 传真 +86-21-2020-5699 · Email: larry.chen@mm-sh.com

提高蓝宝石上 AlN 膜的质量

用一个高质量的缓冲层来增加深紫外 LED 的发光效率

日本和马来西亚的合作研究声称，他们已经为蓝宝石上生长 AlN 薄膜在退火后的质量建立了一个新的基准。

相关论文的通讯作者，日本 Mie 大学的 Hideto Miyake 说道：“最佳的退火温度和 AlN 薄膜厚度分别是 1650℃ -1700℃ 和 300 nm 左右”。

而其中缓冲层的优势之一是它具有较低的线位错密度 ($4.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$)。

它的位错密度要低于典型蓝宝石上 AlN 薄膜一个数量级以上，这对深紫外 LED 的开发者来说有着很大的吸引力，因为缺陷密度越高，则器件的发光效率就会越低。

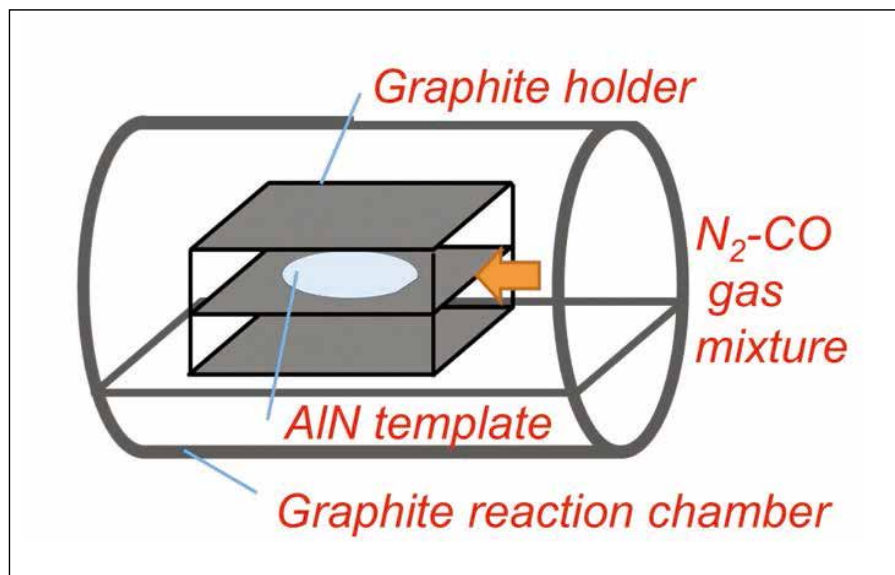
该团队所制作的 AlN 缓冲层具有另一个优点，即它具有很高的晶体质量。X 线摇摆曲线测量得到它 (0002) 面的半峰宽 (FWHM) 为 16 弧秒、(1012) 面的半峰宽 (FWHM) 为 154 弧秒。与此相比，一个典型的蓝宝石上 AlN 薄膜在 (1012) 面上的半峰宽 (FWHM) 在 1000-2000 弧秒之间。

用退火来提高蓝宝石上 AlN 薄膜质量的想法并不新鲜。然而，它更为常见的是用于 AlN 或 GaN 成核层而不是用于缓冲层的退火，而后者就是日本团队的做法。

研究人员在考虑了一系列温度与薄膜厚度等因素后，最终确定了进行缓冲层退火的最佳条件。

在进行退火之前，先将蓝宝石衬底加载到 MOCVD 的反应室中，在 1100℃ 温度的氢气中清洗 10 分钟，再在 1150℃ -1200℃ 温度下淀积 100 到 1000nm 厚度的 AlN 缓冲层。

然后对蓝宝石上 AlN 缓冲层样品在一氧化碳和氮气混合的碳饱和气氛



退火可以降低蓝宝石上 AlN 薄膜中的缺陷密度，并且还能明显改善膜层的晶体质量。

中，在 1500℃ -1750℃ 温度下进行 2 个小时的退火。

虽然这种长时间的高温退火对大批量制造而言并不是很理想，但还是可以接受的，Miyake 坚持说道：“要在 1500℃ 高温下在 100 片晶圆上进行 AlN 薄膜的生长是件困难的事情，成本将会十分昂贵。然而，要退火 100 片晶圆却十分容易，你只要把这 100 片晶圆放进退火炉中就可以了”。

在 1450℃ 温度下以 1μm/ 小时的生长速率在 AlN 缓冲层上生长 2 μm 厚度的 AlN 薄膜。

研究团队使用了原子力显微镜来仔细检查几个已经退火和未经退火样品的表面质量，他们发现，较厚的 AlN 缓冲层将导致其产生较粗糙的表面，而退火能大幅度提高它的表面质量。

例如，在经过 1650℃ 退火后，300 nm 厚 AlN 缓冲层的方均根 (RMS) 表面粗糙度从原来的 3.1 nm 骤降到只有 0.49 nm 对不同温度下退火样品的 X

线衍射峰的半峰宽 (FWHM) 数值进行分析后发现，退火温度的最佳点是在 1650℃ -1700℃ 之间。在较高温度下，其表面粗糙度会增加，这是由于 AlN 缓冲层的热分解所引起的。

为了揭示由退火驱动薄膜质量改进的内部机制，研究团队采用了透射电子显微镜 (TEM) 来进行截面分析。

透射电子显微镜分析表明，所生长的薄膜是以倒圆锥形结构为主，而经退火后它会转变为双层结构。

研究人员先将 300 nm 厚 AlN 缓冲层在 1700℃ 经过 1 小时退火，然后再在其上以 1450℃ 温度生长 2μm 厚的 AlN 薄膜，并研究了它的缺陷情况。

透射电子显微镜进行的分析估算还得到：其边缘型的线位错密度为 $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，螺旋型和混合型的线位错密度均低于 $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。

H. Miyake et. al. Appl. Phys. Express 9 025501 (2016)

简化混合信号电路中 GaN 器件的制造工艺

采用选择性等离子刻蚀工艺制作的增强型 / 耗尽型 HEMT 可应用于混合信号电子领域。

对于增强型和耗尽型 GaN HEMT 而言，欧洲研究人员已经发现了一种相对简单的工艺来制造逻辑倒向器中的增强型和耗尽型 GaN HEMT 器件。

斯洛伐克科学院电子工程研究所由 Jan Kuzmik 领导的研究团队，利用了增强型和耗尽型这两种器件具有相同的外延结构这一特征来制作倒向器器件，然后对增强型 HEMT 栅沟槽中的重掺杂的 n 型 GaN 帽层的加工采用了选择性刻蚀工艺。

研究人员的这一努力是开发 GaN 电子器件的重要环节，它将应用于高性能的数字和模拟电路中。由于增强型 HEMT 在设计方面的进步以及自对准工艺对晶体管运行速度的提升，使得这一领域具备了很好的发展潜力。

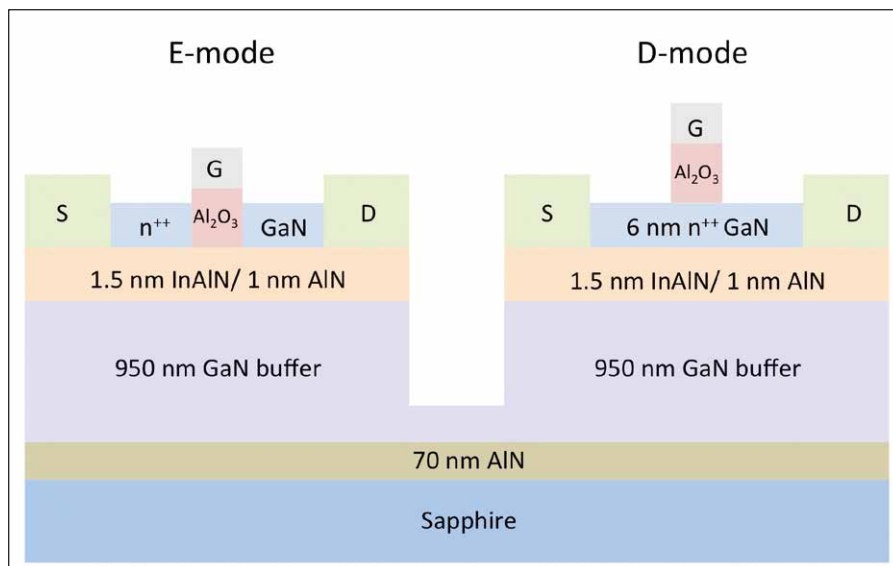
然而，要将 GaN 基器件应用于快速混合信号电路中是比较困难的，其他研究团队的解决方案是对增强型器件和耗尽型器件采用不同的外延结构，并结合使用了栅极沟槽和额外的欧姆接触生长工艺。

Kuzmik 及其合作者所发明的这种方法，其最大特点就是使用了单一的外延结构，只通过一次光刻工艺步骤就可以加工形成栅极沟槽、氧化层沉积和金属化。

此外，自对准工艺消除了栅极空间电荷向漏区延伸的问题，通过减小会影响漏区延迟的因素使得器件的运行速度得以提高。

而且，与两步法对准工艺不同，这种自对准工艺不会增加额外的 MOS 栅极电容。

由 Kuzmik 及其同事发明的这种新技术所面临的最大的挑战，就是增强型 HEMT 的阈值电压将取决于栅极沟槽结



增强型 HEMT 和耗尽型 HEMT 的结合

构，而且确定合适的刻蚀工艺条件也不如预想中那么容易，这是因为存在于表面的天然氧化层会阻碍上述工艺的进程。

因此，为了确定覆盖帽层和天然氧化阻挡层之间的刻蚀选择性，必须要考虑天然氧化阻挡层和覆盖帽层间在刻蚀速率上的差异性。

为了确定合适的刻蚀工艺条件，研究人员对增强型 HEMT 中不同区域进行等离子刻蚀工艺的影响因素进行了研究。

栅极沟槽的形成工艺涉及到电感耦合等离子刻蚀，以及用 SiCl₄ 和 SiF₆ 混合气体在 2.7Pa 的压强下进行 2-5 分钟的反应离子刻蚀。在所加工的器件材料上进行的实验表明，GaN 刻蚀速率是 6nm/min，这意味刻蚀栅极沟槽的最佳时间为 150-210 秒，而且显示出对于 InAlN 有着很好的刻蚀选择性。

在 2 英寸晶圆上进行的电学测量结果显示，增强型 HEMT 的平均阈值电压是 0.8V，而耗尽型器件的平均阈值电压是 -2.6V，在整个 2 英寸晶圆片

上两种器件之间阈值电压的差值分布在 ± 0.5 V 之间。

两种类型晶体管的漏电流峰值都是 0.35 A mm^{-1} ，这种相似性是十分振奋人心的，这说明刻蚀工艺并没有影响到它们的电流性能。

Kuzmik 团队还测量了这两种器件的跨导。增强型 HEMT 跨导的峰值为 110 mS/mm ，而耗尽型器件的跨导相对较低，但不多。这种跨导上的差别是由于在耗尽型 HEMT 中沟道和栅极之间有着较大的距离，以及其重掺 n 型 GaN 层具有额外的传导能力所致。

通过对直接耦合 HEMT 的逻辑倒向器上施加 2.5V 的外接电压进行测量，得到了逻辑“0”和逻辑“1”的噪声容限分别为 137 mV 和 812 mV。

研究人员认为，通过对工艺的调节以及对晶体管尺寸进行适当缩小，将能进一步有效地改进这种倒向器器件的性能。

M. Blahoet. al. Semicond., Sci. Tech. 31 065011 (2016)

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
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	10
productronica China 2017	慕尼黑上海电子生产设备展	www.productronica.china.com.cn	25
SEMICON China 2017		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、封装技术, 及其发展趋势和相关厂务设施。与读者一起紧跟行业发展, 共同面对在研发、制造过程中遇到的问题及挑战。

本刊的读者是活跃在化合物半导体及光电行业的技术管理人员、项目经理、科研人员、工程师以及从事开发、制造、工艺的专业人士。

本刊文章精选自英国物理协会著名杂志《Compound Semiconductor》, 翻译并编辑成形; 我们也报道全球平面显示制造商和研究机构的最新技术与资讯, 以及撰写其他与本地市场息息相关的新闻和文章; 并选编专业投稿。

本刊欢迎读者和供应商投稿, 文章一经采纳, 将在印刷版本和网上刊登。CSC 将为设计者和管理人员, 提供一个展现国内外厂商的最新成果的平台。

文章投稿指南

1. 文章主题突出、结构严谨、短小精悍, 中文字数不超过 3,000 字;
2. 文章最好配有两幅至四幅与内容相关的插图或表格; 插图与表格分别用图 1、图 2 或表 1、表 2 的次序编号, 编号与文中的

图表编号一致;

3. 请注明作者姓名、职务及所在公司或机构的名称。作者人数以四人为限;
4. 请勿一稿多投;
5. 请随稿件注明联系方式(邮编、地址、电话、电子邮件)。

新产品投稿指南

1. 新产品必须是中国市场新上市、可以在中国市场上买到;
2. 有关新产品来稿的内容应包含产品的名称、型号、功能、主要性能和特点、用途;
3. 短小精悍, 中文字数不超过 300 字;
4. 来稿请附产品照片。最好是在单色背景下简单的产品实物照片, 照片的分辨率不低于 300dpi;
5. 注明能提供进一步信息的人员姓名、电话、电子邮件。

优先刊登中文来稿(翻译稿请附英文原稿)。来稿请用电子邮件寄到: sunniez@actintl.com.hk。

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。



www.compoundsemiconductorchina.net

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)
sunnies@actintl.com.hk

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

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

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

销售人员 Sales Offices

Asia (亚洲)
Mark Mak (麦协林)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852-28386298

China (中国)

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

Shanghai (上海)
Hatter Yao (姚丽莹)
hatter@actintl.com.hk
Tel: 86-21-62511200

Beijing (北京)
Cecily Bian (边团芳)
cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86-13552621310
86-10-67484833

Wuhan (武汉)
Sky Chen (陈燕)
skyc@actintl.com.hk
Tel: 86-13723739991
86-27-5923 3884/1564

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

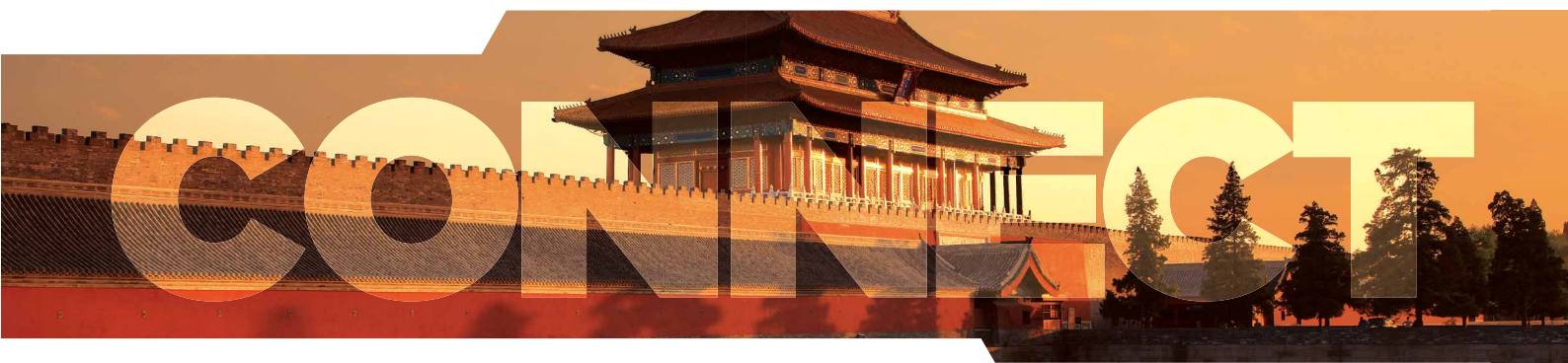
Singapore (新加坡)
Joanna Wong
triplesinternational@gmail.com
Tel: 65-63395596
65-90626227

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



SEMICON China 2017: Access the Growing Buying Power in China

The China market continues to generate excitement in the microelectronics industry. Market forecasts project that demand for fab equipment in China will approach US\$5 billion in 2016, and demand for materials will exceed US\$6 billion. With a combined value of more than US\$10 billion, China retains its position as one of the world's leading microelectronics manufacturing regions.

The growth of China's domestic semiconductor manufacturing capabilities has brought increased investment and further expansion beyond semiconductors, including LEDs and solid state lighting, displays, and MEMS. Each of these markets—and the buyers from China's leading technology companies—are represented at SEMICON China. SEMICON China attracts more participating companies, more buyers, and more key decision-makers than any other industry event in the region.

Theme Pavilions: Highlighting Growing and Emerging Technology Markets

The Theme Pavilions at SEMICON China 2017 are a great way to stand out from the crowd and showcase your unique manufacturing products and solutions in critical markets including: LED and Sapphire; MEMS; Semiconductor Material; and IC Manufacturing. In addition, many organizations and regions will also host special exhibit pavilions including: CEPEA, Shenyang AMT, Germany, Korea, and Taiwan.

SEMICON China Technology Conferences

SEMICON China features a wide of industry-leading technical conferences, providing critical content that attracts the right audience and stimulates innovation and industry growth.

Six major themes for 2017 programs

- INVESTMENT
- CHINA IC INDUSTRY
- IOT
- POWER & COMPOUND
- EMERGING DISPLAY
- AUTOMOTIVE

Co-located with

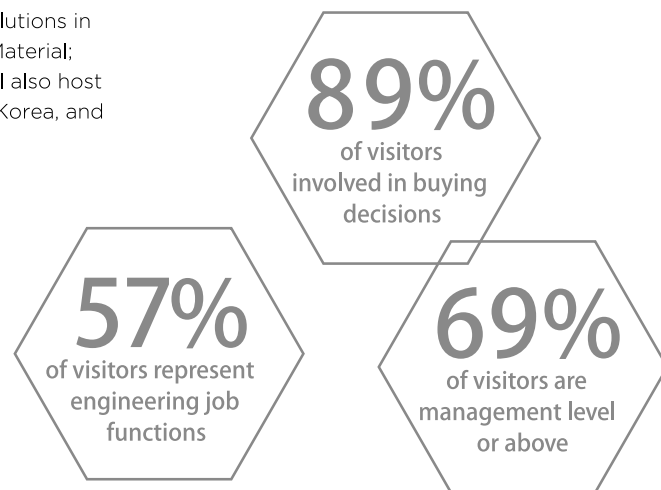
FPDCHINA

SEMICON China and FPD China attract a highly influential audience from every segment and sector of the global microelectronics industries, including semiconductors, LEDs, OLEDs, MEMS, printed/flexible electronics, and other adjacent markets.

SEMICON China/FPD China 2016 Post-show Data

Total Attendance *	64,169
Total Verified Visitors *	49,026
Net Exhibit Area (sqm.)	27,009

* Includes SEMICON China, FPD China, and co-located SIEF Events



Contact

Customer Service
SEMI China
Tel: +86.21.6027.8500
semichina@semi.org

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

化合物半导体

季刊 2016年 第3期

