

化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR

• CHINA

季刊 2014年 第2期

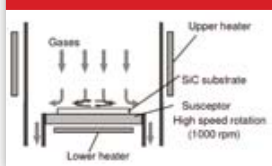
三层喷口的 MOCVD



四结太阳能电池



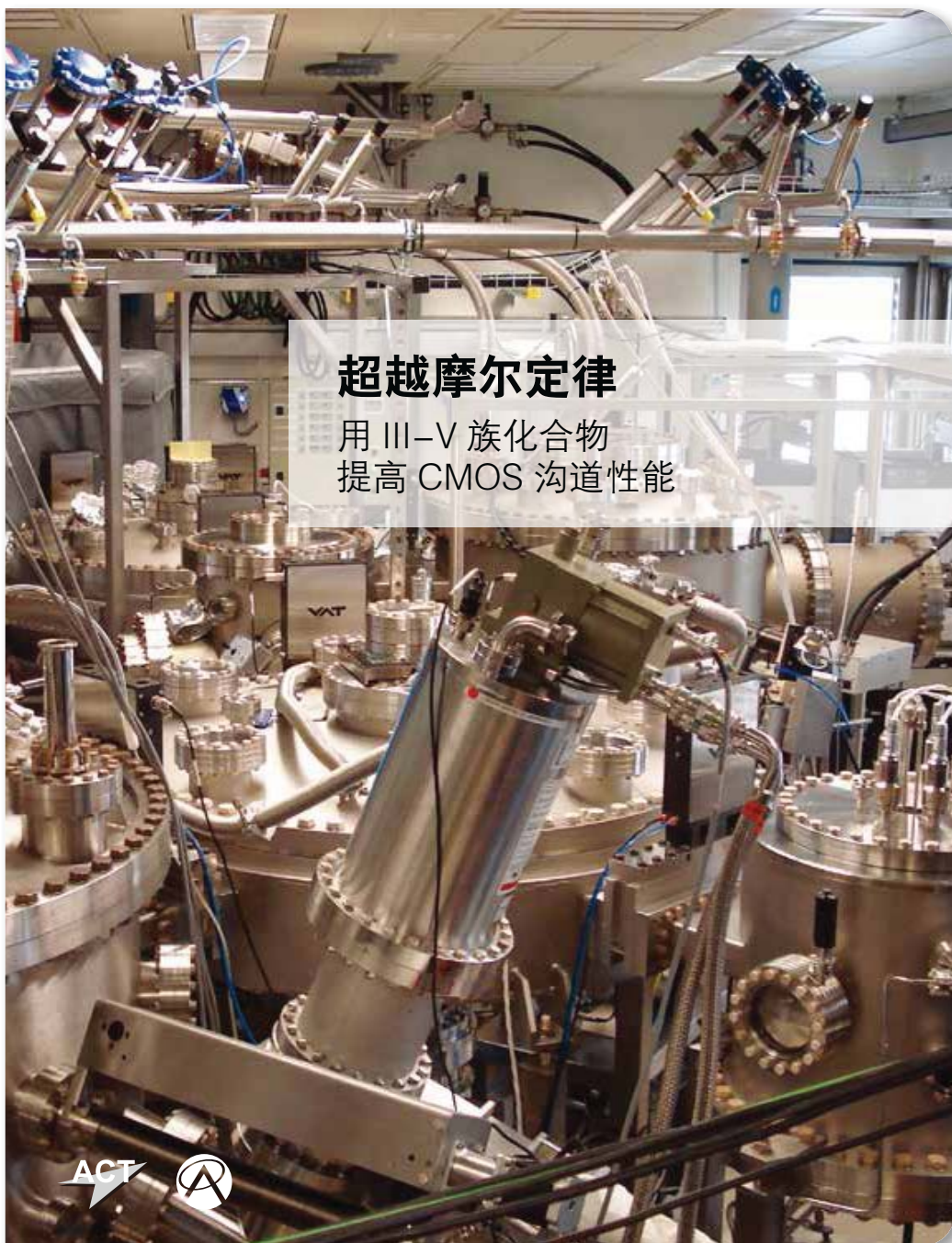
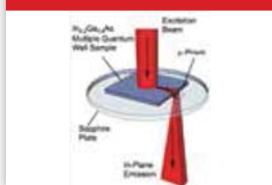
SiC 外延生长



双量子阱 TFET



III-V 族化合物



超越摩尔定律

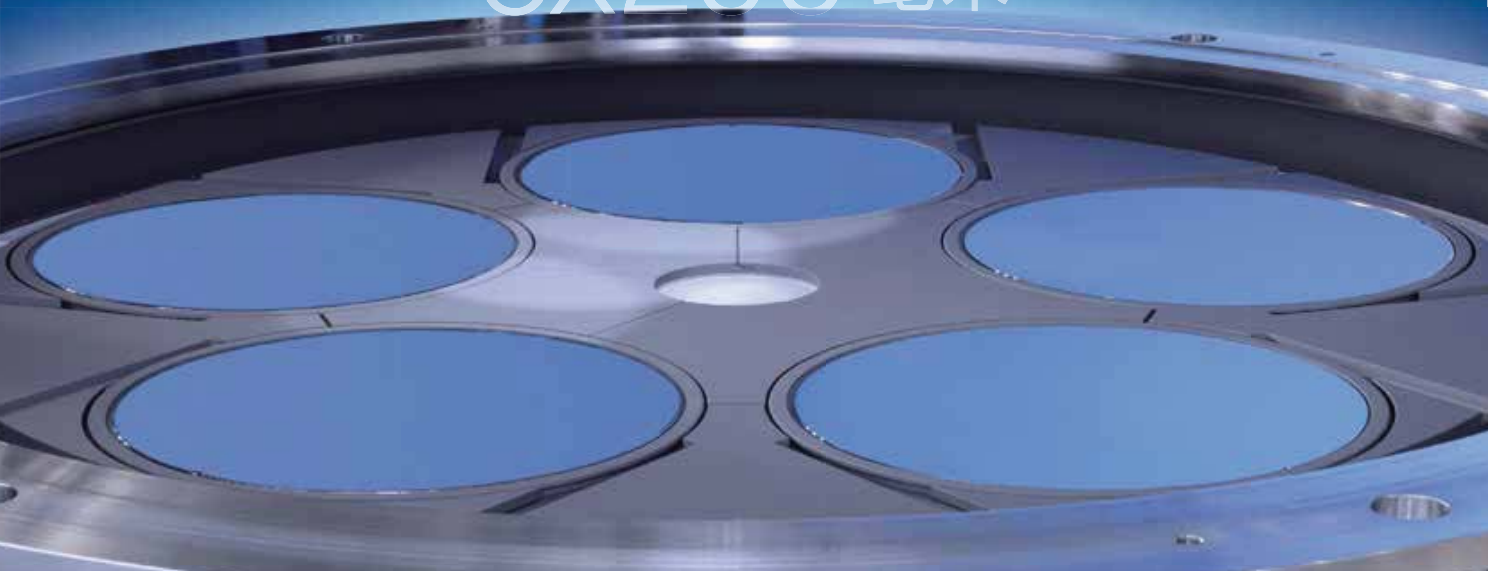
用 III-V 族化合物
提高 CMOS 沟道性能

www.compoundsemiconductorchina.net

AIXTRON

200 毫米批处理式硅基氮化镓反应器

5x200 毫米



AIX G5+



硅基氮化镓设备 AIX G5+

- 硅基氮化镓生长专用设备
- 与 AIX G5 HT 平台兼容
- 实现硅基产品的规模化生产
- 行星转盘式技术：
卓越的对称均匀性，
晶圆弯曲度精准可控，
采用标准的硅基材。

AIXTRON China Ltd.: 艾强（上海）贸易有限公司
chinainfo@aixtron.com · www.aixtron.com

ALWAYS ONE STEP AHEAD

第十三届 洁净室研讨会暨产品展示

2014
**CleanRooms
China**
Conference & Products Display
洁净室研讨会暨产品展示

The 13th CleanRooms China Conference & Products Display

www.crcevent.com.cn

2014年9月17-18
上海·浦东龙东商务酒店

洁净技术是一门高科技、高投入、高产出，而又高能耗和高耗材的行业。行业同仁致力于在建筑的规划、设计、施工、运营、回收等全寿命周期内，通过多种手段，最大限度地节约资源(节能、节地、节水、节材)、提高产能，保护环境和减少污染，力争为社会提供健康、适用和高效的“绿色”空间。

为期两天的会议，演讲人和展商将与洁净室技术及污染控制领域的专业人士分享半导体、LED和FPD及生物制药行业的新技术和前沿信息；分析目前技术和行业现状及未来趋势。给洁净室行业的相关人员提供一个深入交流与探讨的平台。

创发商机

参与这个年度盛会，届时您将可：

- 与各家公司的决策者直接会面
- 与生物医药及半导体、平板显示、LED等光电高科技制造行业的使用者零距离接触
- 直接向使用者展示、介绍你的技术和产品
- 与使用者共同探讨你的产品在污染控制中的应用
- 培养与客户的良好关系，拓展销售渠道
- 搭建与行业专业人员沟通的稳固桥梁

主办单位



大会媒体



2013 赞助

INTERSSC
三威 三和 世纪

Johnson
Controls

PHILIPS

KEYENCE 基恩士

VAISALA

testo

IonPhasE IPE
The Static Dispersive Polymer

ASYS 苏州耀群净化科技有限公司

KANOMAX
The Ultimate Measurement

E+E
ELEKTRONIK

KL 新莱
KING LAI

T-TUBES[®]
a GFP Technologies brand

KIMO[®]
INSTRUMENTS

Dwell

ZOGLAB

CAMPBILL

rotronic
MEASUREMENT SOLUTIONS

B₃

KESD[®]

言兴

SPI

G

Swegon[®]

S

A

赞助咨询 上海 86-21-62511200 北京 86-10-64187252 深圳 86-755-25988571 香港/国际 852-28386298

化合物半导体

COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

目录

季刊 2014年第2期 2014年05月2日出版
Quarterly 2014 - Issue 2 2 May 2014

Contents



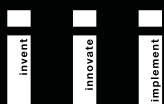
应用于化合物半导体工业生产的解决方案

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

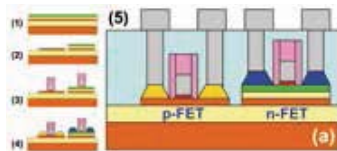


www.EVGroup.com

封面故事 Cover Story

9 用化合物半导体来提高CMOS沟道的性能 Turbocharging channels with compounds

在过去的几十年中，CMOS的按比例缩小技术已经使我们的社会发生了革命性的变化。工程师们通过将晶体管制造得尺寸更小、速度更快、功耗更小和成本更低，将数十亿个晶体管集成在单一芯片上，从而使智能手机已经成为普通的日用品。为了使晶体管的性能得以不断的提高，晶圆厂即将需要采用具有更高迁移率的半导体材料替换硅来作为沟道材料。这一技术可以称之为是硅半导体工业中具有里程碑式的进步，其最容易实现的方法是采用具有隔离层的p型和n型晶体管层来进行晶圆制造。



- L. Czornomaz, IBM公司先进功能材料集团 (AFMG)

技术 Technology

15 以更高速率生长质量更好的III-N氮化物薄膜 Faster, better III-N film growth

采用III-N氮化物材料的半导体芯片每年已经能创造几十亿美元的销售额，并且还在持续增长。这一市场领域的销售现今逐渐已被InGaN基LED所主导，它正在用于液晶屏的背光光源，并正在推动LED照明的革命。其他技术的巨大市场也正在逐渐形成：由于紫外LED具有卓越的使用可靠性、长寿命和便携性，使得它成为了传统紫外汞灯的一种十分吸引人的替代品；相对于硅基器件而言，GaN基功率器件将能把它的效率提升一个台阶。

具有三层喷口设计的MOCVD反应器能够在大气压强下实现GaN功率器件和紫外LED制造所需的薄膜生长速率和掺杂范围。



- KOH MATSUMOTO, 太阳日酸株式会社

20 用晶圆键合技术制造创记录的四结太阳能电池 Wafer bonding creates record-breaking four-junction cell

为了防止会出现降低发光效率的缺陷，传统的多结太阳能电池通常都是采用晶格匹配的材料来进行构建。但是这种限制可以通过晶圆键合技术而得以突破，利用此种技术可以制造出转换效率创记录的四结太阳能电池。

位于法国Bernin的Soitec公司在此类聚光型太阳能系统领域是世界领先的生产商之一，生产的聚光型电池组件利用菲涅尔透镜来将太阳光聚焦在电池单元上，可以达到超过500倍太阳光强度的增强效果。Soitec现在正在研究更为先进的聚光器，使其能在保持现有可靠性的基础上进一步提升其聚光水平。



- R. Krause, B. Ghyselen, Soitec公司
F. Dimroth, Fraunhofer太阳能系统研究所

化合物半导体



目录

季刊 2014年第2期 2014年05月2日出版
Quarterly 2014 - Issue 2 2 May 2014

Contents

科技前沿 Research Review

- 24 提升SiC外延生长的速率及其产量
Accelerating SiC growth and throughput
- 25 双量子阱隧道场效应晶体管首次亮相
Debut for double-quantum-well tunnel FET
- 26 减小紫外LED发光效率的下降问题
Combating droop in ultraviolet LEDs
- 27 III-V 族化合物可激发明亮的闪光
III-Vs inspire flashes of brilliance

新闻分析 News Analysis

- 5 CMOS 挑战 SiGe 雷达芯片
CMOS challenges SiGe radar chips
- 6 GaN 筑起了一道新防线
GaN takes a new line of defence
- 7 让 GaAs 退出市场?
Move over GaAs?
- 4 编者话 Editorial
- 28 广告索引 Advertisement Index

关于雅时国际商讯
ACT国际成立于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、电子设计、电子制造、污染控制、激光/光子学、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。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, 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, electronic design, electronic manufacturing, contamination control, laser/photronics, optical communications, LED technology and RF/microwave. 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

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.

www.compoundsemiconductorchina.net



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

北京 Beijing
Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai
Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen
Tel: 86 755 25988571
Fax: 86 755 25988567

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



© 2014 版权所有 翻印必究

编者话 | Editor's Note

GaN 市场将超过 150 亿美元

氮化镓（GaN）市场过去大部分收入来自通信基础设施部门，但是未来将会由功率器件占据主导地位。

Markets and Markets 近日在《GaN 半导体器件和衬底晶圆市场研究报告》中预测：到 2022 年，GaN 分立器件、IC 和衬底的市场规模将达到 156 亿美元。

GaN 市场的主要厂商包括：富士通、东芝、飞利浦、德州仪器、三菱化工、爱思强 Aixtron SE 等。在功率半导体、电力电子，以及一些终端用户应用产品方面，GaN 半导体产品和晶圆的应用已经超过相应的硅产品。而接下来工业、能源和通信基础设施部门，将会对 GaN 半导体器件产生巨大的需求。通信基础设施部门已经在使用 GaN 功率分立器件，特别是在功率放大、整流和高频开关方面。

与硅相比，GaN 材料有更宽的禁带、高击穿电压、更大的临界电场、更高的导热系数，这使得 GaN 器件可以在高压、高频和高功率密度下运行，并且比纯硅器件具有更好的功率效率。比如 GaN 肖特基二极管、场效应管、高电子迁移率晶体管，以及其他先进的 GaN 晶体管，可以在极高压下高效运行，超越同类硅产品。

GaN 功率半导体产品还能帮助减少传导损耗和开关损耗，因此使电子系统具有更高效率。目前，GaN 功率半导体产品主要应用在逆变器和变换器、RF 器件、电源模块、马达驱动器（用在各种终端用户产品里面）之中。

GaN 功率半导体器件市场的增长主要是由于其中压电力电子市场和各种主要终端用户产品中的应用。很明显，市场的大部分收入来自于不断增长的功率方面的先进应用，包括工业、电力、太阳能和风能行业等。而过去几年，GaN 功率器件主要应用在通信基础设施中，专门用来代替硅产品，特别是在 RF 通信应用中。

GaN 器件和晶圆对于电离辐射不太敏感，在辐射环境中稳定性更好，在太阳能电池、卫星和高端军事功率应用方面有很好的应用前景，在汽车和交通运输领域也有巨大的潜力，主要是电动汽车和混合动力电动汽车。

GaN 功率半导体产品在高温、更高功率和电压，以及高频率（微波范围）应用方面拥有潜力，应用日益增加，包括电信、消费电子、汽车、工业、能源和清洁技术等各种工业领域。当今世界还有众多功率应用适合 GaN 半导体产品，如配电系统、重型电气系统、发电机、重型机械、先进工业控制系统、机电计算系统，等等。

GaN 器件更小、更轻、更坚固，比硅器件更加高效，是已经成熟的硅器件的理想替代品。GaN 市场开始的前十年，只有少数几个竞争厂商，但很快会有更多的厂商加入竞争，包括一些能源和光电半导体的厂商。目前 GaN 功率半导体产品的市场规模还不小，仅占全部功率半导体市场（大约 340 亿美元）的 1%，但随着其应用增加，到 2022 年可能增长到 156 亿美元规模，占比也会增长。

赵雪芹

www.compoundsemiconductorchina.net

CMOS 挑战 SiGe 雷达芯片

imec 采用 28nm CMOS 工艺实现连续波雷达发送器，Compound Semiconductor 杂志提出这样一个问题：imec 的 CMOS 车载雷达芯片是否有可能促使业界转向采用纯硅芯片车载雷达系统呢？

前不久，imec 发布了号称世界上首款采用 28nm CMOS 工艺实现的专为汽车雷达系统而设计的 79GHz 雷达发送器。尽管如今的高端汽车可能采用的是一种两芯片或三芯片的单一 SiGe 雷达系统（通常应用于自适应巡航控制），但业界权威人士却预计此类系统具备很强的市场增长潜力，imec 也希望跻身这个市场之中。

imec 的研究人员 Wim Van Thillo 说：“诸如宝马和梅塞德斯奔驰等高端系列汽车目前都配备了单一雷达系统，但未来我们会看到在一辆汽车中将安放多部雷达。我们有可能发现在前后保险杠上各装有 4 部雷达，而且这样的配置将会出现在所有的车辆当中，并非仅限于高端汽车。”

不过，使 imec 的芯片有别于其他雷达芯片制造商（Infineon 和 Freescale）开发的毫米波传感器的是这样一个事实：前者系采用普通和简单的 CMOS 工艺制作的。这有没有可能把雷达系统供应商从 SiGe 芯片那里吸引过来呢？

上世纪 90 年代后期的首批商用雷达系统是基于 GaAs 芯片。但是，Infineon 随后改弦易辙，开始开发基于双极型工艺 SiGe 芯片的系统。

这些 SiGe 芯片不仅满足了 77GHz 汽车雷达的高速要求，而且还实现了比采用 GaAs 器件版本时尺寸更小、更加经济划算的雷达系统。Freescale 自那之后推出了采用 0.18 μm BICMOS 工艺制造的 77GHz SiGe 芯片组（用

于雷达防撞报警系统），汽车雷达开发人员一直热衷于从 GaAs 转变到 SiGe。不过，CMOS 如今正在迎头赶上。

Van Thillo 解释说：“在相同的工艺节点上，SiGe 晶体管的速度比



imec 的连续波雷达发送器采用 28nm CMOS 工艺实现，具有 0.9V 的电源电压，其功耗仅为 121mW 且完全符合 ETSI 强制的频谱掩模标准。（照片由 imec 提供）

CMOS 晶体管的速度要快得多，但是由于运用了更加先进的制作工艺，CMOS 晶体管的速度如今也能达到很高的水平。我们的 CMOS 工艺尺寸低至 28nm，而最先进的 SiGe 节点则为 130nm。我们一直专注于依靠普通的数字 CMOS 来实现模拟功能，并且我们相信自己是世界上首家推出此种先进芯片的厂商。”

显然，imec 径直开发 CMOS 芯片的动机是集成。由于研究人员已经证明能够在 CMOS 芯片上实现模拟发送器功能（模拟和毫米波），因此目前的竞争围绕着开发单芯片解决方案而展开。

Van Thillo 承认他和同事们“尚未走到那一步”，他说：“目前我们也把接收器连接到收发器……我们正在焦急地等待测量结果，到今年年底之前我们将获得其可采用 28nm CMOS 制作

的证据。”

由于在 CMOS 芯片上实现用于单个天线的完整收发功能已在掌控之中，Van Thillo 接着开始憧憬在 2015 年之前进一步扩展到多个天线和更高的分辨率。“一旦我们完成了这一步，我们需要做的就是将模拟功能电路集成到数字转换器（诸如此类），以证明可实现单芯片的全面集成。”

很明显，单芯片 CMOS 解决方案的实现有望在产量较高时带来巨大的成本下降，不过，CMOS 真会变得那么便宜吗？28nm 节点工艺的 NRE 成本是非常高的——单个掩模组的造价就可能高达 200 万欧元，但是 Van Thillo

并不担忧。

他说：“我们有多种理由相信 CMOS 将是一种上佳的选择。工艺成本正在迅速走低，我们的目标是在 2 ~ 3 年时间里实现产品上市，这取决于合作伙伴的工作进度。当然，汽车雷达目前的发展速度很快。”

但是，imec 的 79GHz 雷达芯片组能够与 SiGe 77GHz 版本相抗衡吗？对于当今的汽车雷达开发人员来说，有两个主要的可用频段：77GHz 和 79GHz。前者被广泛接受并应用于高端汽车自动巡航控制系统中的远程雷达。这种雷达的作用距离达 200m，具有低至 30cm 的分辨率和窄的视野。

最近，79GHz 频段在欧洲进行了分配，但预计将在全球范围内进行协调。该频段适合于作用距离较短的高分辨率雷达系统，此类雷达系统将专

下转第8页

GaN 筑起了一道新防线

从雷达到干扰机，国防工业已经用了超过 10 年的时间为美国的军事应用开发 GaN。Compound Semiconductor 杂志向 Raytheon 公司请教了这样一个问题：此项技术下一步将走向何方呢？

前不久，由于将 GaN 的开发工作从基础材料的研究推进到了其 X 波段 GaN 发送/接收集成多通道模块的演示，Raytheon 公司进行了庆祝。在 GaN 开发的进程中，这家美国国防合同商制作成功了一系列日益复杂的基于 GaN 的器件，包括晶体管、单片式微波集成电路和发送/接收模块。

这些系统性的开发活动跨越了 10 多年的时间，造就了性能更好的雷达、电子战、导航及通信系统。按照 Raytheon 公司综合防御系统 (IDS) 先进技术项目微电子部主管 Joe Smolko 的话来说：“上世纪 90 年代末，Raytheon 公司启动了首批 GaN 晶体管的试验工作，我们当时随之做出决定：在 GaN 领域进行持续性的大规模投资。于是，我们和美国政府就此建立了合作关系。”

他补充说：“对于高性能系统而言，GaN 因其功率密度、效率和成本因素而拥有明显的优势。它确实成为了一项普适技术，我们已经注意到其被众多新兴应用所广泛接纳。”

的确，美国国防部正在抢购的该公司的防空与反导雷达 (AMDR) 及下一代干扰机已经应用了此项技术。

例如，Raytheon 公司近期击败老牌竞争对手洛克希德马丁 (Lockheed Martin) 和诺斯罗普格鲁曼 (Northrop Grumman) 公司赢得了美国海军一份价值 3.807 亿美元的合同，将为其 Flight

III 阿利·伯克级驱逐舰开发 S 波段 AMDR 和雷达套件控制器。该公司的 AMDR 采用了现有的 X 波段水平搜索雷达和最新的 S 波段综合 AMDR (其专为提供针对威胁的远程探测而设计)。这两部雷达通过雷达套件整合在一起，由该套件负责完成系统的协调

次 Raytheon 公司也是在击败了国防业巨头 BAE (英国航空航天公司)、诺斯罗普格鲁曼和 ITT Exelis 公司之后赢得了开发合同。

至关重要的是，上述的两种系统均依赖于 Raytheon 公司的 GaN 发送/接收模块，此类模块构成了有源电子

扫描阵列雷达的发送器，并且正在迅速接替老一代雷达中常用的基于 GaAs 的系统。由于接连与美国海军签订交易合同，加之战胜了市场地位稳固的竞争对手，因此 Raytheon 公司在其 GaN 研发项目的实施进程中显然是成功的。

验证可制造性

该开发合同包括一项关键内容，就是 Raytheon 公司与美国空军研究实验室 (AFRL) 通过合作将一项针对其 X 波段 GaN MMIC 的“低速率初始生产” (LRIP) 制造工艺部署到位。作为美国国防部“Title III”计划的一部分，这确保 IC 已实现了一种被定义为“8 级制造成熟度”的生产能力；换句话说，这些 IC 可以随时应用到防卫系统中。

同时，Title III 合同也授予了其他几家重要的 GaN 厂商，即 TriQuint、Cree 和诺斯罗普格鲁曼公司，他们都在针对国防和 GaN 集成电路开展提高良率、降低成本和改善上市时间周期的工作。

Raytheon 公司率先完成了其 Title III 计划的合同规定内容，它是最早启



由一艘装备了 Raytheon 公司防空与反导雷达的驱逐舰指挥一个战斗群。(照片由 Raytheon 公司提供)



Raytheon 公司的防空与反导雷达包括一个 GaN S 波段雷达、X 波段雷达和一个雷达套件控制器。(照片由 Raytheon 公司提供)

工作。

在赢得此合同之前，Raytheon 公司还曾获得美国海军一份价值 2.794 亿美元的相似合同，其中该公司负责设计用于先进电子设备的新型战术干扰机系统。这种干扰机将阻断敌方雷达、通信和其他的射频系统，同样，那一

下转第 8 页

让 GaAs 退出市场?

Peregrine Semiconductor 公司的 CMOS 功率放大器有望在 4G 手机中实现 GaAs 水平的性能。Compound Semiconductor 杂志由此提出疑问：手机制造商现在会转向使用硅芯片吗？

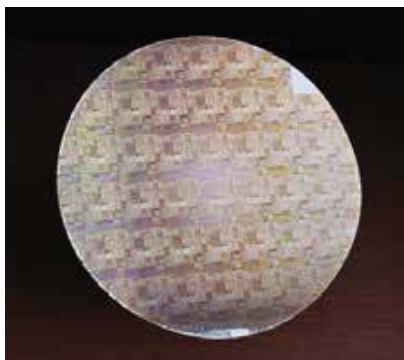
今年 2 月，Peregrine Semiconductor 公司发布了其 UltraCMOS Global 1，它被描述为业界首款可配置型 RF 前端系统。此系统除了包含该公司获奖的 RF 转换开关和调谐器之外，还内置了一个多模式、多频段功率放大器，Peregrine 公司称之为首个性能可媲美同类 GaAs 器件的 CMOS PA。

高通 (Qualcomm) 公司于 2013 年 2 月推出了 CMOS 前端模块 RF360，步其后尘，Peregrine 设计了该系统以挑战 4G 市场上既有的 GaAs 器件。不过，Peregrine 公司战略与技术市场部主管 Duncan Pilgrim 却声称该系统不同于 RF360，UltraCMOS Global 1 确实性能出众。

他说：“当 Qualcomm 发布 RF360 时，我们认为这太棒了，它证明我们在过去 15 年间所做的工作是有效的；那就是实现前端的集成。但对于我们来说最大的区别是在性能方面没有做任何的折衷。”

他补充说：“传统上，GaAs PA 的功率附加效率 (power added efficiency, PAE) 一直比 CMOS PA 高出至少 10 个百分点……但是对于 WCDMA 和 LTE 标准，我们的技术使得我们能够达到与 GaAs 相同的性能水平。在电池电量消耗和网络容量方面并未打任何折扣；我们的确认为自己的产品达到了与同类 GaAs 器件相同的性能。”

根据 Peregrine 公司提供的数据，当采用一个 WCDMA 波形且相邻通道泄漏率为 -38dBc 时，UltraCMOS Global 1 PA 的 PAE 接近 50%，与当今最先进的 GaAs PA 不相上下。除此之外，对于采用变动资源块分配的 LTE



CMOS 设计：Peregrine Semiconductor 公司坚信其 UltraCMOS 技术将在顶级智能手机中取代 GaAs 系统。

波形，据称该 PA 也能够保持与 GaAs 同等的 PAE。而且这是在未采用包络跟踪或数字预失真进行性能强化的情况下实现的，虽然该系统支持所有的包络跟踪调制器。

Pilgrim 说：“自 2006 年以来，我们就致力于利用一种 CMOS 工艺来设计最高效的放大器，我们一直与 Soitec 和 Global Foundries 公司保持着紧密的合作……我们拥有大约 73 项与 RF 前端有关的专利。此外，我们确实也一直在尝试运用设计技巧来实现全面的集成化，而这种努力促成了我们今天所获得的效率改善。”

该系统已经完成抽样检查，Peregrine 公司目前正在从事平台整合方面的工作。Pilgrim 估计这项工作将在 12 个月之内完成，因此投产时间将会在明年年初。不过，手机制造商们会购买吗？

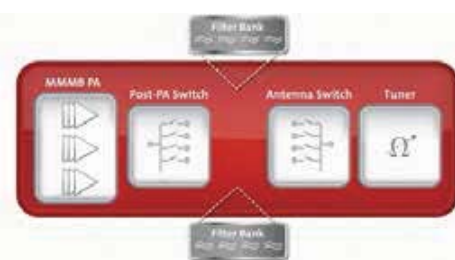
Pilgrim 认为会。除了性能之外，他着重强调了该可配置型系统将如何让那些忙于应付 LTE 手机的制造商能够支持 40 多种频段，从而通过创建可适应全球市场的单 SKU 设计达到省时省

钱的目的。他说：“以 iPhone 为例，中国移动首次公开展示推出了 6 款机型，这些手机之间的唯一区别就在于 RF 前端。如果可以提供一种能支持所有不同地区频段要求的前端……那么整个供应链将因此得到简化。”

不过，高通公司 CMOS RF360 的推出几乎未能在 RF 前端市场上取代 GaAs PA，而且，目前有些业界权威也在对是否有必要开发倍受推崇的通用 SKU 提出质疑。

策略分析 (Strategy Analytics) 公司 GaAs 与化合物半导体技术主管 Eric Higham 说：“这种由一款器件满足所有频段和所有地区之要求的想法也许并不像人们曾经认为的那样会被普遍地接受。频率分配是地区性的，并没有在全球范围内使用的单一频率。我们听说当只采用一种 PA 器件型号时，任何变更都需要在全球而不是地区范围内进行再鉴定，这将延缓产品上市速度并增加成本。”

尽管如此，Pilgrim 还是在密切地观察市场的发展。正如他突出强调的那样：CMOS PA 持续抢占低档终端的市场份额已经有一段时间了，但是 Qualcomm 和 Peregrine 公司将开发重点转移到 LTE 的举措还是令业界为之



Peregrine 公司的 UltraCMOS Global 1 是首款可配置型 RF 系统，它将一个多模式多频段功率放大器、PA 后置开关、天线开关和天线调谐器集成在单颗芯片之内。

新闻分析 | News Analysis

惊讶。

他说：“Qualcomm 公司 RF360 的集成度和 Peregrine 公司 UltraCMOS Global 1 解决方案的性能是令人赞叹的。对于 GaAs 行业的手机 PA 领域来说，这两家公司都是可怕的‘敌手’。”

实际上，Pilgrim 将 Global 1 系统描绘成了一个“游戏规则颠覆者”，其将加快市场从 GaAs PA 向硅 PA 的转变。

他说：“回到 2011 年，我们看到了开关器件工艺从 GaAs 到绝缘体上硅的真实转变点。如今，功率放大器让我们再次看到了这种转变点的临近。在

接下去的几年里，市场上的 CMOS 解决方案将会有大幅度的增加……假如业界出现一些兼并整合（在 GaAs 器件制造商之间），我是不会感到惊讶的。”

从现在开始，CMOS PA 制造商将从 GaAs 厂家那里攫取市场份额，其中 Qualcomm 和 Peregrine 公司更是蓄势待发，Higham 对此说法表示同意。不过他也强调指出：有很多 GaAs 器件制造商所专注的是手机领域以外的市场，在可以预见的未来这些市场很有可能仍将以 GaAs 器件为主导。

而且他还声称：Skyworks、

RFMD 和 Avago 公司近期都收购了 CMOS PA 设计能力，旨在为业界可能的 GaAs PA 至硅 PA 的转变做好准备。他补充道：“Peregrine 公司是促使手机开关从 GaAs 器件向硅器件转变的背后推手，因此是该领域中公认的领导者。但是该公司目前面临的一个挑战是，他们需要多久才会被市场认可为一家放大器制造商呢？” Global 1 的性能需要经历漫长的阶段来最大限度地减少人们的这种担心，但它将必需得到解决。☞

上接第5页

为那些要求较小深度分辨率和较宽视野的新型功能而设计，例如：走走停停、碰撞预报警和盲点探测等。

现有的 77GHz SiGe 解决方案可提供远程和短程功能（尽管需要借助多颗芯片），那为什么还要为 79GHz 雷达而操心呢？正如 Van Thillo 所说：“79GHz 频段可提供实现低至几厘米的分辨率所需的 4GHz 带宽。”

他补充道：“对于未来的系统，制造商将需要具有更加精细的角度分辨率的短程雷达，这转化为必需在汽车中安装多部雷达。为了实现这种扩展，系统将需要更大的芯片面积，而在大批量生产中 CMOS 器件是颇具吸引力的。”

显然，有关 SiGe 与 CMOS 孰优孰劣的争论还将持续一段时间。就像 Van Thillo 着重指出的那样：在汽车制造商获得从 SiGe 向 CMOS 转变的足够信心之前，CMOS 可以先行地在非关键型雷达应用中使用。不过制造商也有可能始终不变地将 SiGe 芯片用于远程雷达，而依靠 CMOS 来满足短程应用。

不过，他很清楚地认为最初的 GaAs 雷达芯片已经到了山穷水尽的地步。

他说：“在汽车雷达中停止使用 GaAs 的情况已经出现。对于可以采用 SiGe 来实现的功能，我看不到有一丁点使用 GaAs 的理由，GaAs 完全没有任何竞争优势可言。” ☞

上接第6页

动相关工作的公司，其间该公司通过实例证明：其 GaN MMIC 的制造良率与成熟的 GaAs 工艺达到了同等水平，同时还使成本锐减了 76%。

作为该初始行动计划的一名 AFRL 项目经理，Gene Himes 坚信这些规划将确保美国在被 GaAs 技术所垄断的国防应用领域保持竞争优势，并为该技术进入商业应用领域提供了便利。

他说：“我并不清楚 GaN 究竟是否会取代 GaAs，因为后者很好地满足了众多应用的要求。不过，可制造性的改进表明 Title III 合同最终将实现成本的大幅削减……而要通过渡到商业应用还有很长的路要走。”

然而对于 Raytheon 公司来说，项目实施的成功则为其带来了制造能力方面的声望。Smolko 说：“毫无疑问，MRL8 是一种符合我们将其应用到所有高性能军用系统之要求的成熟度级别。它表明 GaN 的制造成熟度达到或超过了可靠的 GaAs 器件，而且真正地让用户拥有了在严酷的军事应用中使用 GaN 器件的坚定信心。”

目前该项目已经实施完毕，Raytheon 公司的下一步 GaN 开发重点将是什么呢？眼下，洛克希德马丁、诺斯罗普格鲁曼和 Raytheon 公司等国防制造商都在急切地等待着美国空军针对其价值数百万美元之最新合同所做的最终决定，这份合同旨在开发 3D 扩展远程雷达（3DELRR）。

这种地面雷达专为取代服役数十年之久的 TPS-75 雷达系统而设计，其将能够探测、识别和跟踪敌方的飞机、导弹和无人机。Raytheon 公司的系统是一款同样基于 GaN 器件的 C 波段雷达，而且正如 Smolko 指出的那样：“我们将继续开展 GaN 的研发工作……我们目前的微波工艺在许多系统仍在得到广泛的应用——有些我只是无法细述——但除此之外我们还在致力于提高其工作频率。”

他补充道：“我们将继续提升此项技术的成熟度并竭力挖掘其所有的性能成本优势。” ☞



封面故事 | Cover Story - 逻辑制造

用化合物半导体来提高 CMOS 沟道的性能

为了能使晶体管的性能得以不断的提高（传统上主要是通过按比例缩小晶体管的尺寸来获得），晶圆厂即将需要采用具有更高迁移率的半导体材料替换硅来作为沟道材料。位于瑞士苏黎世的 IBM 公司先进功能材料集团（AFMG）的 L. Czornomaz 宣称，这一技术可以称之为是硅半导体工业中具有里程碑式的进步，其最容易实现的方法是采用具有隔离层的 p 型和 n 型晶体管层来进行晶圆制造。



SMTChina

表面组装技术

电子书(eMagazine)
smtchinamag.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

SMTChina 表面组装技术

中国电子制造专业人士的刊物

2014年4/5月
ISSN: 1997-0870

www.smtchinamag.com

小型化的
第二十五页

的演变：是什
第三十三页

低熔点锡银与锡银
第三十九页

新型刮刀刀片改变
第五十五页

在过去的几十年中，CMOS 的按比例缩小技术已经使我们的社会发生了革命性的变化。工程师们通过将晶体管制造得尺寸更小、速度更快、功耗更小和成本更低，将数十亿个晶体管集成在单一芯片上，从而使智能手机已经成为普通的日用品。这种外观精美的便携设备已经从根本上改变了我们的生活方式：现在，无论我们在哪里，都可以连接社交网络和进行网络冲浪。

智能手机的性能将会得到进一步提高，不过对于作为这些电子设备“心脏”的芯片来说，要进一步提高它们的计算能力将会十分困难。这是因为在 14nm 工艺技术节点之后，微电子业界在进一步缩小尺寸上将会面临很多严峻的挑战。

能够获得今天的业绩已经是很不容易的事情，在过去的十年里，单纯在几何尺寸上的缩小已经很难来进一步提高芯片的性能、功耗等参数。业界已经逐渐开始转向采用创新驱动方式来进行尺寸缩小，面向市场已经推出了诸如绝缘体上应力硅（SOI）、高 k 介质 / 金属栅（HKMG）技术和三栅极器件（tri-gate devices）等新技术。业内的研究者现在都面临这样一个难题：在接下来的几年里，不论是何种形式的硅材料，可能都将无法满足“任意移动”这一爆发性应用所带来的对器件超低功耗的要求。

降低功耗水平的要素是芯片的工作电压，我们的目标是要将其从当前的 0.8-0.9 V 降低到 0.5 V。在工作电压降低的同时，为了保证器件的性能不受到影响，我们还要能使晶体管的驱动电流维持不变。但是要做到这点并不容易，因为这意味着在 MOS 晶体管沟道中的载流子——电子或空穴（取决于不同具体器件的设计）——在源极和漏极之间运动要更加迅速。现今，增加硅材料中载流子迁移率的方法主要是对其施加高水平的应力，但是这种方法已经接近了其性能极限，尤其是对 n 型 MOS 晶体管而言。

半导体产业的下一个技术革命将很可能是用化合物半导体来做为沟道材料，半导体硅材料中的电子和空穴迁移率分别仅为 $1400\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ 和 $450\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ ，而经过精心挑选的 III-V 和 IV-IV 化合物半导体材料中的载流子迁移率则要高得多。例

如，在 InGaAs 中的电子迁移率是 $10,000\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ ，而在 SiGe 中空穴迁移率则可达到 $1900\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ 。如果在 CMOS 芯片的 p 型和 n 型 MOS 晶体管沟道中使用这些化合物材料，将能够使沟道材料中的钢和镓元素浓度可以成为一个新的按比例缩小变量，即调节其浓度可以逐步增加在每一新技术节点中载流子的迁移率，从而在降低了晶体管功耗的同时又能提高其性能。

要在 CMOS 超大规模集成电路（VLSI）芯片中来构建混合型半导体材料的双沟道，研究者们还需要解决许多问题。这些问题包括有：怎样在硅衬底上生长具有优良晶体质量的高载流子迁移率的沟道？制备纳米尺度的 III-V 族和 SiGe 器件怎样来与 VLSI 相兼容？在它们具有完全不同热预算和化学性质的条件下，怎样来一起加工这两种完全不同类型的器件？

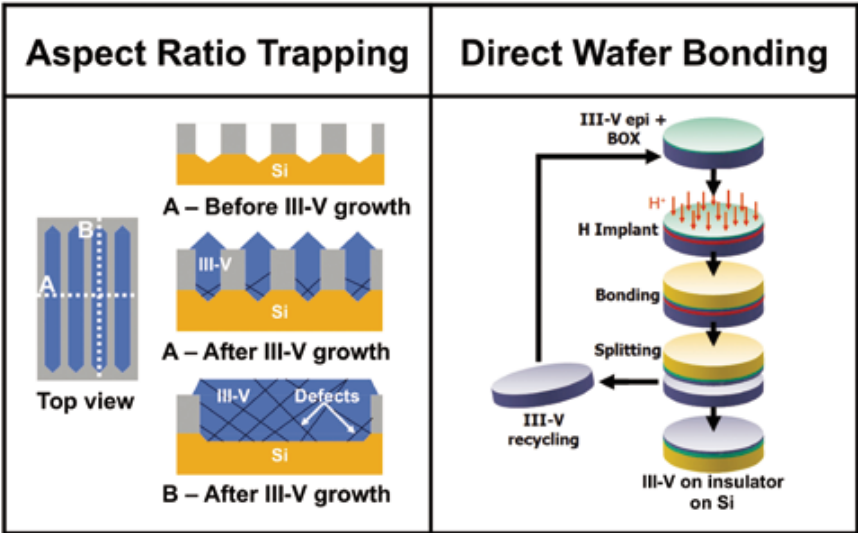
瑞士苏黎世的 IBM 研究所在过去八年以来一直在致力解决这些问题，这些努力现在已经获得了成果：他们已经研发出了先进的工程衬底和工艺技术，已经能在硅晶圆厂中大规模制造包含有 III-V 化合物半导体材料的 VLSI 电路。

硅衬底材料

尽管微电子业界在接下来的几年里将会在技术上面临一些重大的挑战，但还不需要改变目前所使用的 Si 衬底材料。所以，为了将 III-V 和 IV-IV 化合物半导体材料整合到 CMOS 生产中，就必须要在硅材料衬底上引入这些化合物材料。

这是一件相当不容易的事情，因为要将不

图1. 两种在硅衬底生长 III-V 化合物的主要方法对比：深宽比捕获方法（左图）和晶圆直接键合方法（右图）



封面故事 | Cover Story - 逻辑制造

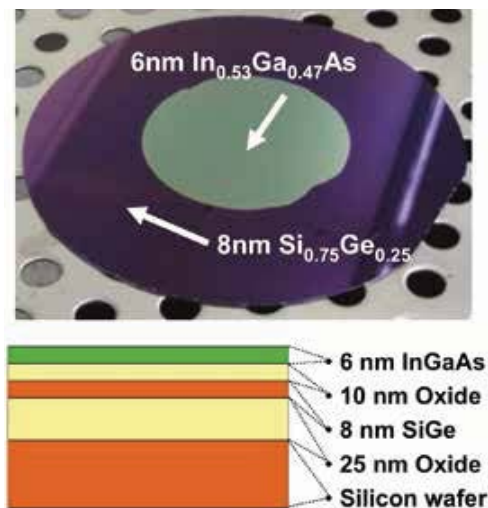


图2. 高迁移率双沟道衬底的照片及其截面示意图，它是在硅衬底上制作了6nm厚的InGaAs层和8nm厚的SiGe层。

同种类的高质量晶体材料进行工艺集成，就要求它们能在晶格类型和晶格常数上相互匹配。尽管InGaAs、锗和硅都具有相类同的晶格类型，但是它们的晶格常数却有着明显的不同：与硅相比，锗的平均原子间距要大4%，而InGaAs要大8%。通过一些工程手段能够对SiGe和锗在晶格上的失

配进行控制，而对InGaAs来说却不行，因为它与硅晶格的失配实在过大。如果勉强在硅衬底上直接生长InGaAs，在这种三元化合物中就会产生过高的应力，对这种应力的释放就会在其材料内部形成数量巨大的晶格缺陷，这将会明显地降低器件的性能。

为了克服这一与应力缺陷相关的问题，目前业界的研究者们正在寻求用两种方法来给以解决，一是称之为“深宽比捕获 (ART)”方法，另一是IBM正在领先开发的晶圆直接键合方法（详见图1的概况介绍）。

深宽比捕获 (ART) 方法利用了晶体缺陷所具有的特定角度，该方法是首先在硅衬底上刻蚀出一个具有一定深宽比的窄沟槽（沟槽的深度将数倍于其宽度）。当III-V化合物材料在这种沟槽中直接进行生长时，在其生长界面上将产生缺陷，它会沿着一个特定角度方向扩展，一直延伸到沟槽侧壁处终结。得益于这一缺陷控制工艺，最终可以在沟槽顶部生长出高质量的InGaAs晶体层。但是对整个沟槽来说还存在问题，虽然沟槽结构具有较高的深宽比，但是沿着沟槽纵向生长的缺陷还是能够延伸到沟槽顶部的沟道材料层中。这意味着处于沟槽顶部的高质量沟道材料层将是直接位于缺陷半导体材料的上方，就有可能产生源极到漏极之间的潜在漏电通路。

深宽比捕获 (ART) 方法还会对InGaAs材料的实用性产生限制，因为这种高质量三元化合物材料层仅存在于沟槽的顶部，使得电路设计中的晶体管的位置和尺寸都会受到限制。然而，如果沟槽能具有极小的节距，也即非常接近的话（就像当今的硅鳍结构那样），这一问题将不复存在。

尽管深宽比捕获 (ART) 法具有上述这些缺点，但依然十分令人注目。因为它与目前硅晶圆厂的300mm工艺有着很好的兼容性，并且可以直接升级到450mm工艺。然而，硅晶圆厂可能会发现：采用IBM正在开发的晶圆直接键合技术将会要容易很多。

利用IBM这一方法，可以像目前业界常用的绝缘层上硅 (SOI) 技术一样将III-V化合物半导体薄层转移到硅表面。工程师们首先是在供体晶圆上生长InGaAs薄层，然后通过一层氧化膜来将其键合到目标硅衬底晶圆上，再从供体晶圆上剥离释放这一III-V化合物 (InGaAs) 薄层，这

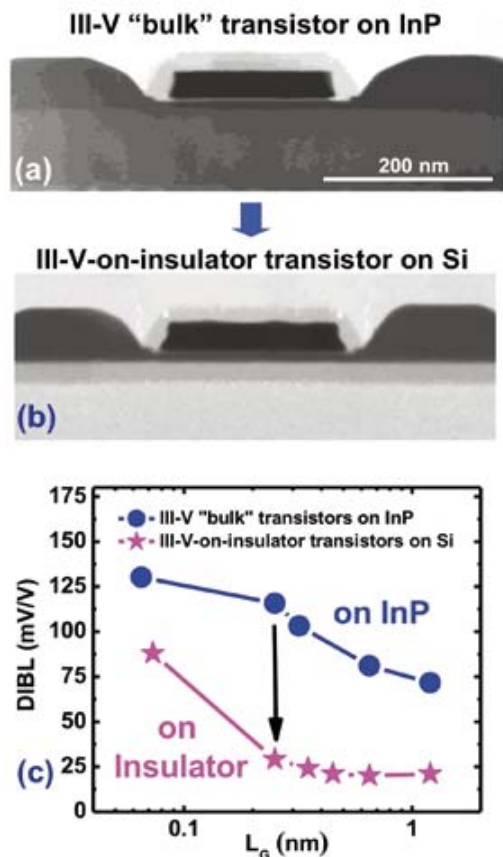


图3. (a) 制作在InP上的自对准InGaAs“体”晶体管器件的TEM截面观察，它具有高K介质/金属栅技术和隆起的源漏结构区。(b) 采用同样的工艺流程，但是在硅衬底—绝缘层—III-V层上制作InGaAs晶体管器件的截面TEM观察。(c) 在这两种类型的晶体管器件中其漏极感应势垒降低 (DIBL) 效应与栅极长度之间的关系，显示了在III-V薄层上制作晶体管器件的DIBL只有“体”晶体管器件的五分之一。

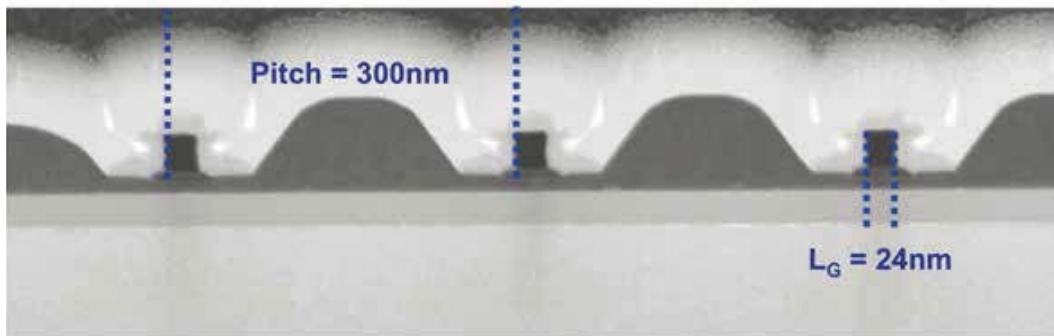


图4. 在硅衬底上制作栅极长度仅24nm的高密度InGaAs晶体管器件的TEM截面图像。

样就在目标硅衬底晶圆上形成了绝缘层上 III-V 化合物 (InGaAs) 的结构。在这一方法中, 供体晶圆可以被重复利用, 从而降低了这种工艺成本。

在绝缘层上形成很薄的 III-V 化合物材料沟道层具有许多吸引人的优点, 这种材料层组合可以称为是一种理想的结构。因为在很短的栅长下, 它既能使沟道上的栅极保持了优越的静电控制性能, 并且还能有效地降低源极到漏极之间的漏电流。此外, 该材料组合还可以引入背面电压偏置技术, 实现对晶体管工作进行动态调整, 从而可使晶体管的工作更为快速和功耗更低。所有这些优点充分说明绝缘层上 III-V 半导体层的这种材料组合能够成为低功耗应用中, 比如移动电子应用中的优选技术。

位于苏黎世的研究者们已经通过晶圆键合技术来制造一种混合型双沟道材料层的衬底, 它利用了一个极薄的绝缘层来将 6nm 厚的 InGaAs 层与与硅衬底上 8nm 厚的 SiGe 层实现电学隔离 (见图 2)。这一工艺技术平台首次将两种不同类型的沟道材料集成在同一种 (硅) 衬底上, 而且能够满足 14nm 技术节点对沟道层的厚度要求。这一技术是将 n 型晶体管制造在 InGaAs 层上, 而将 p 型晶体管制造在 SiGe 层上, 它将开辟双沟道材料层 CMOS 实现大规模生产的前进道路。

III-V 化合物材料面临的挑战

如读者所周知, 多年来 III-V 化合物材料已经广泛地用于制造射频 / 模拟芯片、发光二极管 (LED)、激光器、太阳能电池和高功率器件等领域。然而, 尽管几十年来我们已经开发和积累了大量该专业领域的制造技术, 但是在这些应用中还从来没有遇到需要将数十亿个晶体管器件整合集成到只有指甲盖大小面积上的情况, 而这正是

CMOS 芯片所提出的需求。因为它所需求的栅极长度必须要小于 20nm, 此外更为重要的是, 其接触 (孔) 的尺寸必须要小于 50nm, 这种额外的压力驱动着工程师和科学家来对 III-V 器件的制造方式实现彻底的变革,

由于这种晶体管的尺寸实在是太小了, 在这种尺寸要求下, 已无法用不同层面的光刻来加工不同器件单元的结构图形。取而代之的是需要开发一种称之为自对准的工艺, 这种工艺能够只采用单次光刻步骤就能实现不同结构层次上器件 (栅极) 单元图形的构建。通过采用这一方法, 器件尺寸及其节距可以大幅度地得到缩小, 以满足 VLSI 的集成需求。

在 2012 年, 苏黎世团队已经证明可以通过自对准工艺来制造 InGaAs 晶体管, 这种能与 VLSI 相兼容的 III-V 器件具有如下特征: 它采用了一个优先制作栅极的高 k 介质 / 金属栅工艺, 并具有一个隆起的源漏区, 它与当今 IC 业界所应用的最为先进的硅 CMOS 工艺节点制造技术十分相类似。

第一个“体” III-V 晶体管器件是制作在 InP 晶圆上 (如图 3a), 其栅极长度成功地缩小到了 60nm。该团队进而将上述制造工艺转移到了硅衬底 - 绝缘层 - III-V 层上, 制备了只有 10nm 厚度的 InGaAs 沟道 (见图 3b)。

在 SOI 业界, 大家都知道这种类型的工程化衬底能够极大地改善器件的性能, 这是因为载流子可以被限制在一个极薄的沟道层中, 具有更好的静电完整性。这能使晶体管的性能更为优越, 其漏极感应势垒降低 (DIBL) 效应可以降低 5 倍 (见图 3c) (DIBL 是静电性能的关键质量参数指标)。

IBM 苏黎世团队进一步成果还制备了 24nm



封面故事 | Cover Story - 逻辑制造

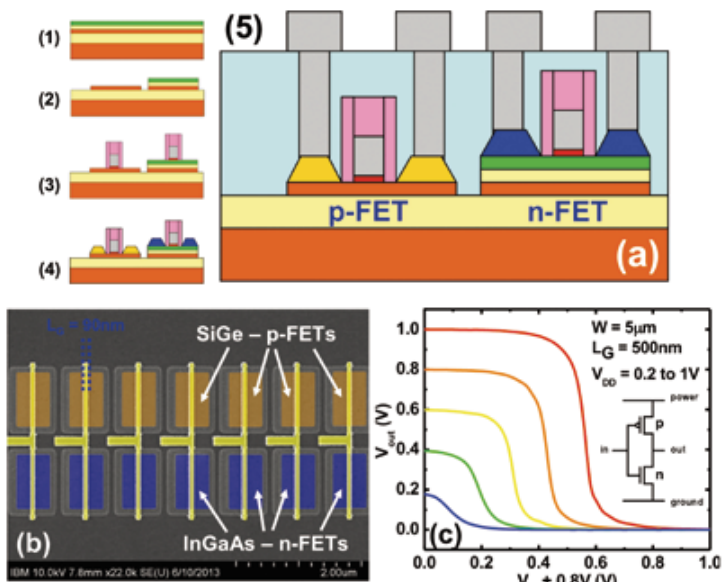


图5. (a) 基于高迁移率沟道衬底的InGaAs/SiGe混合型CMOS器件制造工艺流程图。(b) 采用90nm设计规范制作的高密度CMOS反相器串接环的SEM俯视图 (c) 混合型CMOS反相器的输出特性曲线表明了器件所处的工作状态。

栅长和300nm栅间距的InGaAs器件(如图4)。到目前为止的报道中,这是一种能在硅衬底上制备的最小、最为紧凑,且能与VLSI兼容的InGaAs晶体管。

双沟道技术的开发

相对于制造单一沟道类型的器件,先进的双沟道衬底技术能够成为一个用来制备具有更小尺寸CMOS电路的基础技术。这一方法的优点之一是两种类型的沟道材料层是彼此相互堆叠,分布在整个晶圆的表面。在对晶体管所处的岛状区域加工完成后,可以去除掉InGaAs沟道层而曝露出SiGe沟道层,就可以直接在其上制备p型器件(见图5a)。

虽然在同一晶圆上同时制备InGaAs和SiGe两种类型沟道是一个值得骄傲的研究进展,但它在材料加工工艺上也带来了一系列更具挑战性的问题。InGaAs和SiGe材料具有根本不同的化学性质,所以对某种材料工作良好的加工工艺却可能会对另一种材料产生腐蚀反应。为了解决这个问题,研究者们调整了制备绝缘层上InGaAs晶体管的生产工艺流程,引入了新的化学清洗方法,采用了新的钝化层和刻蚀终止层等措施。

得益于所有这些技术进步,该团队已经能够首次以90nm设计规范在硅衬底上制作具有高迁移率沟道的高密度CMOS反相器阵列(如图

5b所示)。反相器是最简单的逻辑构建模块,它是制造更为复杂CMOS电路的重要一步。这种InGaAs/SiGe反相器的工作电压可以降低到0.2V,这充分说明了采用高迁移率材料这一理念的有效性。此外,进一步发展该技术的大门已经打开,这将从根本上促进其大规模制造应用阶段的到来。

毫无疑问,接下来的工作是需要制备更为复杂的CMOS电路,例如环形振荡器和静态随机存储器(SRAM,这是一种很常见的由六个晶体管组成的存储单元)。一旦这些电路制作成功后,该团队就能够评价这种先进CMOS技术的速度、性能及其成熟性。然而,对这种混合型电路最具关键性的测试来说,还是要将它与具有相同尺寸级别的最先进硅芯片相比较,才能得到最终的定论。如果它的性能确实表现良好,那么其能否在晶圆厂中得到应用将取决于实施这一工艺过程是否会对整个器件制造产生严重的影响。如果这种新的沟道材料应用成功,它将为微电子工业开启一个新的发展时代,因为就可以在CMOS芯片上集成新的功能。也许这一天的到来并不久远,例如,多核CMOS芯片可以利用其集成的III-V激光器来进行核与核之间太赫兹频率的光通讯,所以这种混合型芯片的前景是非常诱人的。然而,路漫漫其修远兮,吾辈当上下求索,现在还无法确定这一切将会在何时、以何种方式能成为现实。CS

扩展阅读

1. C. Marchiori et. al. J. Phys. D: Appl. Phys. 47(2014) 055101 (2014)
2. L. Czornomaz et. al. IEDM Tech. Dig., 2.8, pp. 52-55 (2013)
3. L. Czornomaz, et. al. 43rd IEEE ESSDERC Proceedings, pp. 143-146 (2013)
4. N. Daix et. al. IEEE S3S Proceedings, in press (2013)
5. L. Czornomaz et. al. IEDM Tech. Dig., 24.3, pp. 517-520 (2012)
6. L. Czornomaz et. al. 70th IEEE DRC, 207-208 (2012)
7. M. El. Kazzi et. al. Appl. Phys. Lett. 100063505 (2012)
8. L. Czornomaz et. al. Solid-State Electronics 7471 (2012)

技术 | Technology – MOCVD

以更高速率生长 质量更好的 III-N 氮化物薄膜

具有三层喷口设计的 MOCVD 反应器能够在大气压强下实现 GaN 功率器件和紫外 LED 制造所需的薄膜生长速率和掺杂范围。

KOH MATSUMOTO, 太阳日酸株式会社

采用 III-N 氮化物材料的半导体芯片每年已经能创造几十亿美元的销售额，并且还在持续增长。这一市场领域的销售现今逐渐已被 InGaN 基 LED 所主导，它正在用于液晶屏的背光源，并正在推动 LED 照明的革命。其他技术的巨大市场也正在逐渐形成：由于紫外 LED 具有卓

越的使用可靠性、长寿命和便携性，使得它成为了传统紫外汞灯的一种十分吸引人的替代品；相对于硅基器件而言，GaN 基功率器件将能把它的效率提升一个台阶。

所有这些器件的开发商和制造商们正致力于研究各种不同类型衬底来用于这些芯片的制

技术 | Technology – MOCVD

造。蓝宝石是 LED 最为常见的衬底材料平台，但是如果采用大面积硅衬底工艺，就可以将 LED 芯片制造工艺转移到当今正在使用的、但已经折旧的硅晶圆工厂中，从而可大大地降低生产的成本。硅衬底在 III-N 氮化物功率器件领域也已经很流行，但不论是在功率器件领域还是在 LED 领域，如果低成本的天然衬底材料是可行的，它们就会被广泛地采用。实际上，目前市场上有少部分的 LED 已经是制作在 GaN 衬底上。与此同时，一些开发团队也正在将 AlN 衬底用于紫外 LED 的制造中。

然而，除了开发用于制造 III-N 氮化物衬底以外，工程师们也正致力从三个方面来提高 MOCVD 设备的性能：实现高铝浓度的气相控制和高的生长速率；对低浓度到高浓度的碳掺杂实现控制；在高的生长速率下沉积高质量的薄层。位于日本东京的太阳日酸株式会社（Taiyo Nippon Sanso 公司），在 MOCVD 反应器系列中对上述这三个方面都进行了优化，这种设备的特点是具有水平三层气体喷口的设计并能在大气压下进行膜层的生长。我们较为小型的研发设备对于 R&D 业界来说具有很大的吸引力，而我们的大型的生

产设备具有相同的设计原理，使得在各个类型设备之间的工艺菜单转换十分简单易行。

尽管很多人是通过我们所提供的工业气体开始了解我们公司的，这一气体业务可以回溯到我们公司创立的 1910 年，而从 1983 年开始我们已经在 MOCVD 领域保持了强大的商业发展轨迹。我们最初推出的 MOCVD 设备是用来生长 InP 和 GaAs 系列的材料。然而，从上世纪 80 年代后期开始，我们就开始开发可以生长 GaN 的 MOCVD 设备系统。现在这些设备已经能够满足每一位客户的需求，包括那些希望能进行单片 2 英寸晶圆生长研究的设备客户，一直到那些用于量产的可容纳 10 片六英寸晶圆或 6 片八英寸晶圆的大型设备客户（见表 1）。

大多数 GaN MOCVD 反应器要么是采用垂直向气流，要么是采用水平向气流。我们的反应器采用的是后者，反应前驱气体是从衬底承载盘（它是设备的一个组成部分，又称之为是衬底基座）中的喷嘴喷出。气态反应物质沿着气流方向会逐渐地被消耗掉，所以必须旋转晶圆来保证薄膜生长中的膜厚均匀性。在一个单晶圆的沉积设备中晶圆是绕着它本身圆心旋转，而在多晶圆反

表1. Taiyo Nippon Sanso生产的系列MOCVD设备能够满足对化合物半导体芯片研发和大规模量产的需求。

GaAs, InP			R&D
Model	Type	Wafer	
HR-3000	Horizontal / Face up	3" x 1	
HR-4000	Horizontal / Face up	2" x 3	
HR-6000	Horizontal / Face down	2" x 6 or 3" x 3	
HR-8000	Horizontal / Face down	3" x 6 or 2" x 18 or 4" x 4	
HR-10000	Horizontal / Face down	4" x 5 or 3" x 10	
GaN			Mass Production
Model	Type	Wafer	
SR2000	Horizontal / Face up	2" x 1	
SR4000	Horizontal / Face up	2" x 3 or 4" x 1	
SR6000	Horizontal / Face up	2" x 6 or 3" x 3 or 6" x 1	
UR25K	Planetary / Face up	4" x 11 or 6" x 7	
UR26K	Planetary / Face up	6" x 10 or 8" x 6	

反应器中，采用的行星式旋转运动方式。我们沉积设备的特点之一是具有三层气流喷嘴结构。反应气体以很高的速度从这种喷嘴中喷入到反应器中，能够实现对有机金属化合物气体和氨气进行良好的控制，能以很高的速率来生长高质量的 GaN、AlN 和 AlGaIn 薄膜。

在我们小型的 MOCVD 设备中，喷嘴是位于基座的上方部位，但是在大型量产的 MOCVD 设备中，它是位于基座的中心，使得反应气流能从该处向四周扩散。采用了电阻型加热器来提高生长所需要的衬底温度，加热器可以进行分区控制，以在基座上实现具有最佳的温度分布。加热分区的数目取决于反应器的尺寸，从最小型研发设备上的 1 个到我们大型量产设备上的 6 个不等。

我们设备的另一个特性是工作气压连续可调，能够从 10 kPa 调到 100 kPa。受益于控制良好的气相反应器，调整气压可以改变淀积材料的特性，因为它与工作气压有着密切的关系，工作气压对沉积材料性质能否保持一致具有很大影响。采用石英来作为气流管道部件材料，石英的优点之一是便于清洗，这对于在硅衬底上生长 GaN 是非常重要的，因为部件的清洁与否对于膜层生长质量的重现性将非常之重要。大型生产设备上配有自动更换管道部件的机械手，这使得设备得维护将会变得相对较为简单。

更高的生长速率

我们反应器在其能力上突出一点是它能高质量地生长不同材料的外延晶圆，用来制造基于 AlGaIn 和 GaN 材料的器件，它还可以高速度地生长这些外延层并能够实现很大浓度范围的碳掺杂。在 GaN-GaN 结构的高压二极管制造中，它能够对硅的浅层掺杂浓度实现很好的控制。AlGaIn 薄膜中具有高浓度的铝含量，可用来生产紫外 LED。

要在硅衬底上生长出高质量的宽禁带半导体材料，需要形成包括有 GaN、AlN 和 AlGaIn 等多种薄层形成的缓冲结构。并且，如果一个高迁移率晶体管（HEMT）是用于高压功率开关，为使其具有足够大的击穿电压，这些缓冲层就必须要有足够的厚度。但对于任何材料的厚膜来说，其问题之一就是需要增加其生长的时间，由此会减少单台 MOCVD 设备每天可以生产外延片的数量。对于传统的反应器来说，由于存在寄生的反应效应，它的缓冲层生长速率只有约为 1-3 $\mu\text{m/h}$ 。

然而，我们的设备可以获得更高的生长速率，这是因为我们采用了高流速气体层流和一个经特别设计的三层气体注入喷嘴。在这种设计配置下，工程师们用我们的设备就可以更好地控制整个气相反应，并可缩短生长工艺的处理时间。

III-N 氮化物材料的生长速率取决于其构成元素的组分，其最大值分别为 27 $\mu\text{m/h}$ (GaN)、3.8 $\mu\text{m/h}$ (AlN) 和 11.4 $\mu\text{m/h}$ (AlGaIn) (见图 2)。采用了一个非常高的生长速率，我们在 6 英寸的硅衬底晶圆上生长了 3 μm 厚度的 HEMT 测试结构层，其中 AlGaIn/AlN 超晶格应力层的生长速率为 8.5 $\mu\text{m/h}$ ，GaN 层的生长速率为 7.5 $\mu\text{m/h}$ 。薄膜生长的净消耗时间（除去升温时间和反应器的反应气体去除时间）仅为 41 分钟，相比之下我们的标准生长时间则要长达 88 分钟。

这种设计能使膜层的生长时间减少 50% 以上，同时没有发生明显的电性能上的退化。根据 Van der Pauw 测试，高速率生长外延层（其薄层载流子浓度为 $8.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ）的电子迁移率为 $1530 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。还可以通过进一步优化生长工艺来获得更短的生长时间，从而推动了 III-N 氮化物晶圆在电子器件生产中的应用。

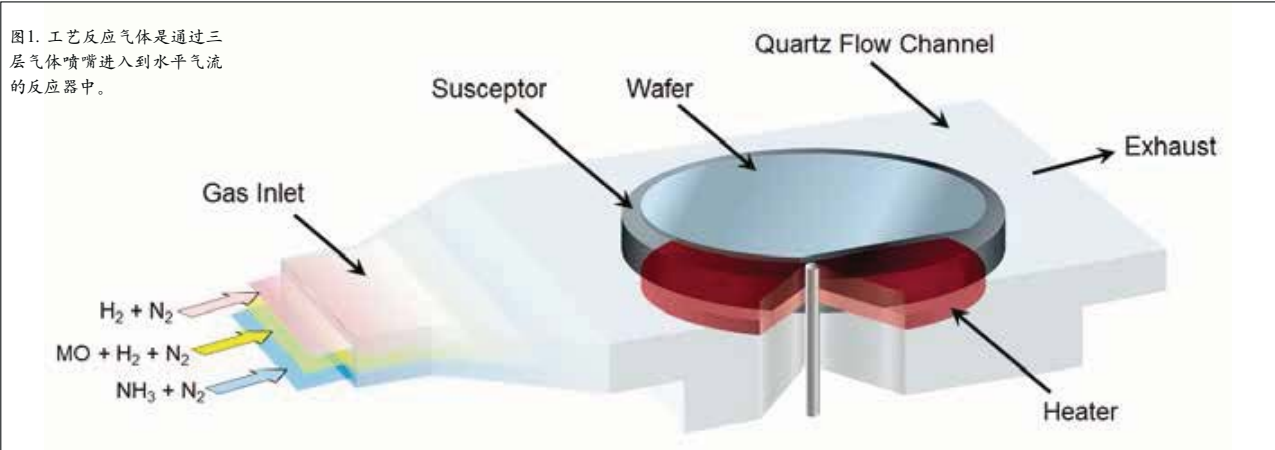
良好的掺杂浓度控制

对于功率开关器件而言，通常的做法是对 GaN 缓冲层进行高浓度的碳掺杂，以提高其电阻率，同时还需要采用未经掺杂的 GaN 层来作为其沟道层。研究结果表明，增加碳的浓度能大大提高器件的击穿电压，而生长气压的增加可以降低 GaN 中的黄光发射，还可以抑制电流崩溃（current



UR26K是Taiyo Nippon Sanso公司最大型的MOCVD反应器

图1. 工艺反应气体是通过三层气体喷嘴进入到水平气流的反应器中。



collapse) 现象的发生。

在传统的反应器中，在一个给定的生长速率下，碳浓度的范围受到 V/III 族材料成分比和生长气压的限制。只能在极低的生长速率下才能够进行很低碳掺杂浓度 GaN 层的沉积，这样就会增加膜层生长所需的时间。与此形成鲜明对比的是，使用我们的设备，V/III 族材料成分比例和生长气压的选择范围可以更加宽泛，允许工程师能够在较高生长速率下来获得他们所期望的碳掺杂浓度。例如，在 3 $\mu\text{m/h}$ 的生长速率下，GaN 中碳掺杂浓度范围可以从 10^{16}cm^{-3} 到 10^{20}cm^{-3} (见图 3)。另一方面，作为 GaN 基器件的一种具有吸引人的替代品是垂直二极管，这种器件的布线和封装都很简便，并具有很高的芯片面积使用效率。这种器件由生长在导电 GaN 衬底上的 n 型和 p 型 GaN 层构成。在这种器件制造上的挑战包括有：需要减少生长时间，因为 n 型和 p 型 GaN 层的厚度都需要达到几十微米；需要在 GaN 中具有均匀的硅掺杂浓度 (在 10^{15}cm^{-3} 到 10^{19}cm^{-3} 范围)。制备低掺杂浓度的薄膜并不是一件容易的事情，这需要控制好极其稀释的 SiH_4 气体源和极低浓度的碳杂质，只有这样才有可能制备出具有低补

偿的 n 型 GaN。

要实现这种 GaN 薄膜生长，需要一个合适的反应器设计和很好的生长工艺。如前所述，传统反应器中 GaN 的生长速率较低，其器件层的沉积时间常会长达 10 小时以上。但是在我们的系统中，由于可以通过在大气压下生长来降低碳的浓度，n 型 GaN 膜的生长速率可以非常之高，从而使得该外延晶圆的生长时间只需几个小时。

在 6 英寸蓝宝石衬底上生长 n 型 GaN 的载流子浓度取决于 SiH_4 相对于三甲基镓的浓度比 (见图 4)。在生长速率高达 3.6 $\mu\text{m/h}$ 的情况下能够实现 $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 的均匀掺杂，这表明我们的反应器非常适用于 III-N 氮化物基垂直二极管的薄层生长。

紫外 LED 可以应用于有机物的固化反应、伪币验钞、空气净化等，其结构的基本构成需要进行 AlN 和高 Al 含量的 AlGaIn 生长。这些薄层通常是沉积在蓝宝石衬底上，在使用传统设备时，过量的气相反应会影响晶圆内的沉积均匀性及其结晶质量，这将会影响器件的生产效率及其良率。

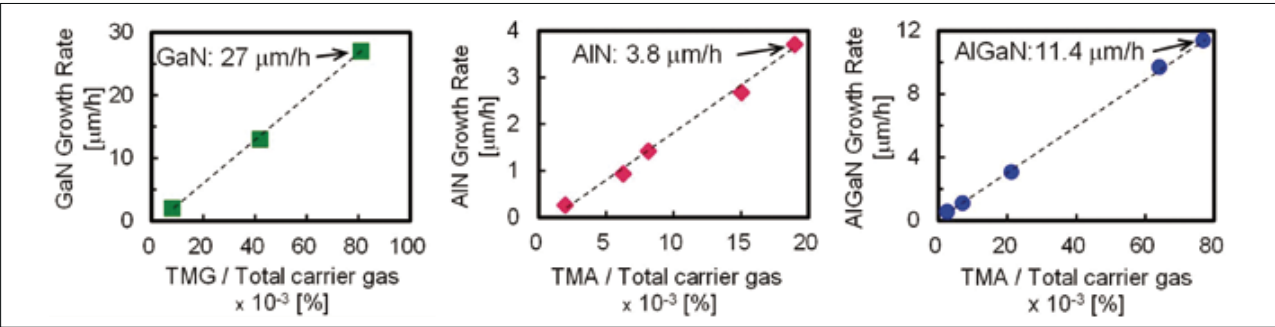


图2. 在Taiyo Nippon Sanso公司的反应器中二元和三元III-N 氮化物薄膜的生长速率。

然而，如果工程师们使用我们的设备，这种寄生反应能够获得很好的控制，能够在很高的生长速率下来制备高质量、均匀的 AlN 和 AlGaIn 薄膜。例如，可以在 4 英寸蓝宝石衬底上以 6.4 $\mu\text{m/h}$ 速率来沉积 AlGaIn 层，其中的 Al 含量浓度可以高达 60%。光致发光测量表明，InAlGaIn 多量子阱结构在 330nm 波长处具有很高的发光强度，在整个晶圆范围内发光峰值波

长分布具有很好的均匀性（见图 5）。这些结果表明，就像能够提升氮化物器件的制造能力一样，我们的反应器也能够提高紫外 LED 器件的生产能力。

扩展阅读

1. K. Matsumoto et. al. Proc. SPIE. 8262 826202 (2012)
2. H. Tokunaga et. al. Phys. Stat. Sol. 5 3017-3019 (2008)
3. Y. Yano et. al. Jpn. J. Appl. Phys. 52 08JB06 (2013)
4. Y. Yano et. al. Taiyo Nippon Sanso Technical Report, 32 27-28 (2013) (in Japanese).
5. S. Kato et. al. J. Cryst. Growth 298 831 (2007)
6. J. Selvaraj et. al. Jpn. J. Appl. Phys. 48 121002 (2009)
7. Fujioka et. al. Appl. Phys. Express 3 041001 (2010)

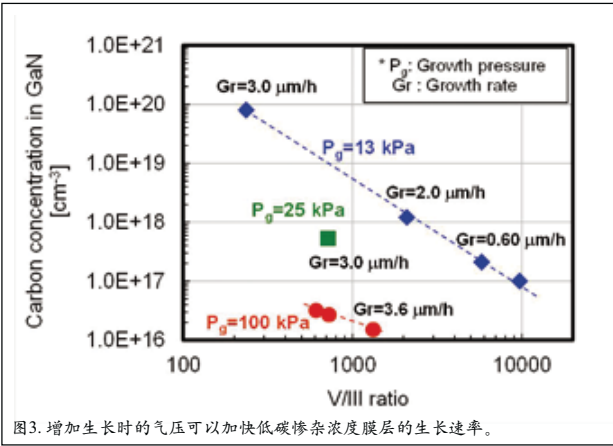


图3. 增加生长时的气压可以加快低碳掺杂浓度膜层的生长速率。

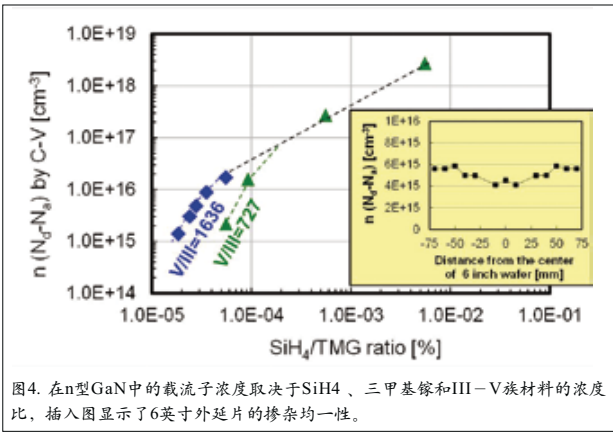


图4. 在n型GaN中的载流子浓度取决于SiH₄、三甲基铝和III-V族材料的浓度比，插图显示了6英寸外延片的掺杂均匀性。

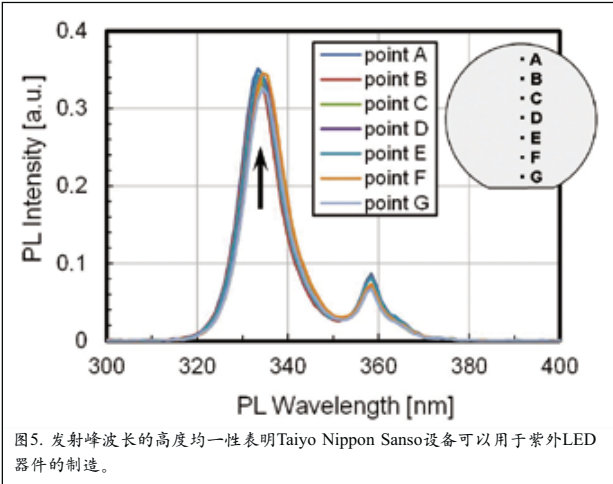


图5. 发射峰波长的高度均一性表明Taiyo Nippon Sanso设备可以用于紫外LED器件的制造。

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





用晶圆键合技术 制造创记录的四结太阳能电池

来自 Soitec 的 R. Krause 和 B. Ghyselen, 以及来自 Fraunhofer 太阳能系统研究所 (ISE) 的 F. Dimroth 表示: 为了防止出现会降低发光效率的缺陷, 传统的多结太阳能电池通常都是采用晶格匹配的材料来进行构建。但是这种限制可以通过晶圆键合技术而得以突破, 利用此种技术可以制造出转换效率创记录的四结太阳能电池。

位于法国 Bernin 的 Soitec 公司在此类聚光型太阳能系统领域是世界领先的生产商之一。我们生产的聚光型电池组件利用菲涅尔透镜来将太阳光聚焦在电池单元上, 可以达到超过 500 倍太阳光强度的增强效果。我们现在正在研究更为先进的聚光器, 使其能在保持现有可靠性的基础上进一步提升其聚光水平 (见图 1)。为了保证这些太阳能电池组件能够尽可能多地产出电能, 将它们安装在太阳光跟踪系统上, 它能够根据天空中太阳的位置从清晨到黄昏一直对其进行跟踪。在具有充足太阳光照的地区 (这些地区有着高强度的太阳光直接垂直入射值, 即 DNI 值) 部署这

种太阳能发电场站, 能够发挥其最大的效益。

我们目前正对电池系统的不同单元进行改进以提高这种太阳能电池系统的竞争力。在太阳能电池方面, 我们组织了 Fraunhofer ISE 和 CEA-Leti 的研究者共同进行了一项开发计划, 目标是要把太阳能电池的转换效率提高到的一个新的水平。我们的新电池器件使用了四个结 (比传统的多结电池多了一个结), 这使得其最大的转换效率可以达到接近 50%。为了实现如此高的转换效率水平, 在 2013 年, 我们将一个 GaInP 和 GaAs 顶部叠层电池与一个 GaInAsP 和 GaInAs 底部叠层电池进行组合, 这种电池组件创造了转换效率



达到 44.7% 的世界纪录。

在花大力气提升多结太阳能电池转换效率的众多制造者或研发者中，我们并不是唯一的一家，这是因为这种转换效率的提升可以极大地减少单位发电量所消耗的成本。

在披露我们开创性器件所创造的转换效率记录之前，转换效率的提高主要是靠对传统的三结电池进行改进而达到的，现今这一记录每年大约提升 1%。三结电池的标准结构（见图 2）包括有一个锗（0.7eV）的底部结，一个 GaAs（1.4 eV）的中部结和一个 GaInP（1.9eV）的顶部结。

德国 AZUR-Space、美国 Boeing-Spectrolab 和 Emcore 等几家公司都采用了成熟的、高良率的大生产工艺来制造这种三结电池设计结构，这种器件已经进入了商品化系统的应用中，它们可以达到 41% 的转换效率^[1,2]。

在这种标准的三结器件结构包括有两个端头（一个前接触端和一个背接触端），并且三个结是以串联形式连接，因此在电池层面只输出单一的电压。多结太阳能电池的外延结构通常是用 MOCVD 工艺进行生长，这种方法具有一些限制性因素，主要是外延和晶格的匹配问题，还有如果材料质量不高的话，荷电载流子的复合效应就可能影响到器件的性能。所以，为了能使电池转换效率最大化，精细地平衡好各个结的性能将是至关重要的工作，以使它们在工作时能保持相互的协调和一致性。

提升转换效率

为了提升多结太阳能电池的转换效率，现今有两种广泛采用的方法。一种是精细地调节它们的光吸收谱线，使得将每个结的贡献进行组合后能把电池的总体转换效率提升至一个新的高度。还有一种更具野心的方法：再增加一个结，将三结改为四结。我们并不是唯一致力于四结电池开发的研究团队，我们将这种电池中四个结的禁带宽度分别设定为 1.9 eV、1.4 eV、1.1 eV 和 0.7 eV。已经有研究证明通过在传统的 GaInP/GaAs/Ge 叠层中加入一个低浓度氮化物层 - 例如 GaInNAs，就可以达到上述的禁带宽度组合^[3]。与此同时，在 NREL 的研究者以及随后的其他业界团队也已经发表了一种具有反向变形结构的四结太阳能电池^[4]。

而我们采用了不同的方法。尽管在结的数

量和对它们禁带宽度的选择上基本上都是相同的，但我们有一个根本性的差别，就是在外延手段中加入了一个关键性的技术步骤：晶圆键合。在这个领域中应用晶圆键合这一技术概念并不是新闻^[5,6]，然而，我们是第一个利用此技术在整个晶圆层面上制造电池，其转换效率超过了所有其他的三结电池。利用晶圆键合可以将晶格不匹配的材料实现无位错的接合，因此就可以将 GaAs 和 InP 材料实现结合。

为了对两种材料进行这样的结合，它们的单晶体结构必须要结合为一体并在其界面要形成共价键。要精心制备好这些材料，并且保持好其表面的平整性是成功的必要条件。当这些条件都得到满足之后，就有可能制造出基于无缺陷材料的多结太阳能电池。

晶圆键合

为了将 InP 和 GaAs 材料结合在一起形成一个透明、导电的整体结构，我们开发了一种特殊的晶圆键合工艺。在我们的方案当中，并不只局限于本本体晶圆（bulk wafer）间进行键合，同时也可在三组分和四组分的外延薄层间进行键合，由此可以在材料的优化选择上带来极大的便利。

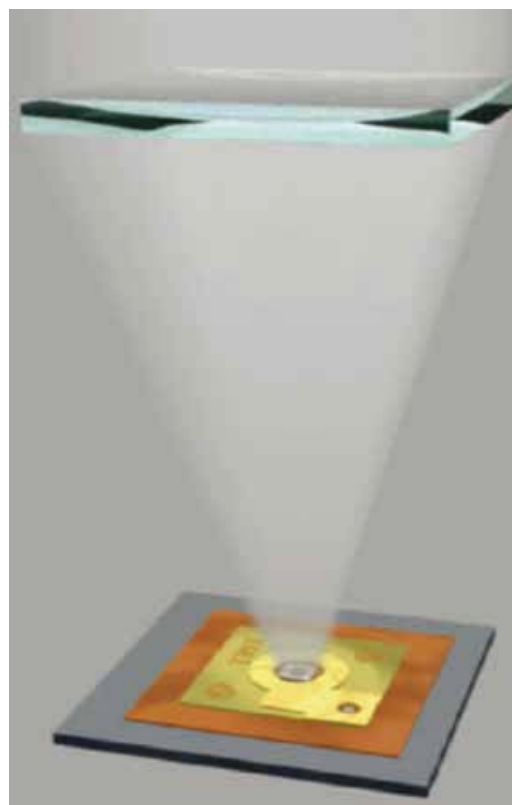
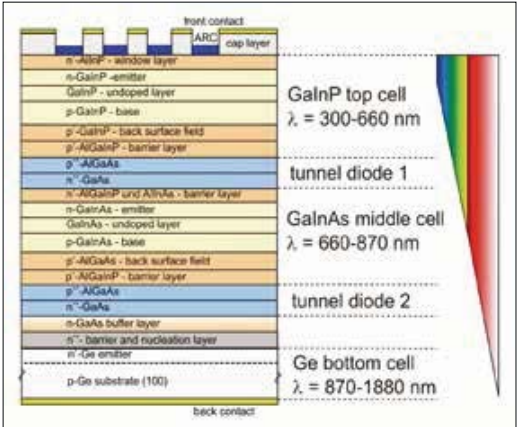


图1. Soitec聚光型光伏组件采用了高转换效率的III-V族多结太阳能电池，它包括一个具有较小孔径的菲涅尔透镜阵列以及玻璃前盖板和底板。



图2. 一个先进三结太阳能电池的结构，它包括有位于底部的锗结、中部的GaInAs结和顶部的GaInP结。



InP 的本体晶圆材料比 GaAs 和锗晶圆材料都要贵，但这对于我们来说并不是一个障碍，因为可以利用我们的智能切割（Smart Cut, SC）技术来降低成本，我们这种 SC 技术已经在大批量生产中使用有超过十年的时间。凭借这一技术手段，我们只需要耗用原材料本体晶圆上极薄的一层，由此对一个 InP 衬底来说可以重复使用多次。从衬底上将 InP 薄层剥离下来之后，可以将它转移到很多不同类型材料的载体上。我们采用“**InPOX**”来作为通常术语“**InP-on-X**”的缩写，这里 X 可以包括硅、GaAs、锗或蓝宝石等材料，其中的一个实例是将 0.5μm 厚的 InP 薄层转移到了 100mm 蓝宝石晶圆上。与 Fraunhofer ISE 和 CEA-Leti 的合作伙伴一道，我们使用了我们的智能切割技术并且与晶圆直接键合和 III-V 外延生长技术相结合，制造了创造转换效率记录的四结太阳能电池。我们的合作者提供了 III-V 族材料的外延生长、工程化衬底的制造、外延层的剥离及键合等技术。

最终形成的器件结构为：具有 0.7eV 禁带宽度 GaInAs 作为底部结，在其上覆盖了分别为 1.0

eV、1.4 eV 和 1.9 eV 禁带宽度的 GaInAsP、GaAs 和 GaInP 结单元（见图 3）。这个光伏器件还具有低的遮蔽阴影损失特征，这得益于它的正面金属接触叉指的宽度只有 5μm，以及采用了双层抗反射镀膜来保证它具有最小化的光反射。

采用了 100mm 衬底晶圆来加工面积为 5.2 mm² 的电池单元使其形成四个活性 PN 结。对这种制造工艺的研发显示，这是一种能显著提升太阳能电池生产良品率的方法，我们所制作晶圆上功能器件的良品率能达到 95% 以上（图 4 展示了最终制造完成的电池，在晶圆级上及其在经芯片切割之后）

我们在 Fraunhofer ISE CalLab 的合作伙伴对我们电池的量子效率和电流 - 电压特性进行了测试，采用了一台可调的特制太阳光模拟器，在一个太阳 AM1.5d（1000 W/m², 25℃）标准条件下进行测试。为了得到在聚光条件下电池的性能表现，采用了一个氙闪光灯模拟器，其闪光灯和测量平面之间距离可以进行调节，来对我们的电池进行照射。一台三维激光显微镜可以对器件台面边缘进行精确的测量，可以精确地获得这些小面积聚光太阳能电池的转换效率^[7]。

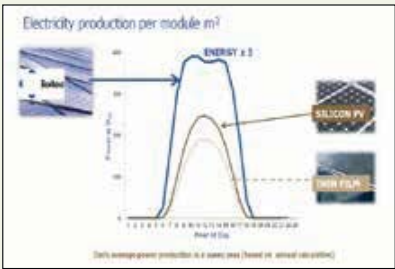
测量的结果显示，所有四个电池的量子效率峰值均远高于 85%，在 297 个等效太阳的光照强度下器件的转换效率达到了 44.7%。即使是 1000 个等效太阳的光照下，也没有因峰值隧道电流密度产生击穿迹象，同时在这个聚光强度条件下具有高达 86.5% 的填充因子，也表明键合界面电阻有着适中的数值，该界面在高达数 A cm⁻² 的电流密度下仍然能良好地工作。

我们知道我们的四结太阳能电池还能够达

聚光光伏（CPV）系统的优势

在光照充足的气候条件下，CPV 系统的成本已经具有相当的竞争力，并且在这些地区存在着多个原因来转为采用这种太阳能发电形式。例如，除去位于聚光透镜焦点处很小的太阳能电池芯片之外，这种 CPV 系统的制造只需要采用成本十分低廉的材料，例如玻璃或硅胶等，并且其制造过程已具备大批量、全自动的生产条件。

CPV 系统的另一个优点在于，创下转换效率记录的太阳能电池不仅仅在室温条件下工作表现出色，而且它对温度的效率衰减值要低很多，以及具有更低的因老化而产生的性能衰退效应。不仅如此，将这些电池安装在太阳光跟踪系统上可以在整个白天都能获得一个更为平稳的电功率输出曲线（见图），这不仅仅可以捕获更多的太阳光能，还可以在最需要电力的高峰时段产出更多的电能。所有上述这些论据都是从降低发电成本的角度来考虑的，然而更为重要的是 CPV 在环境保护方面的好处，比如它只需要较小的实体占地面积，不需要水的消耗，高的循环利用效率，还可以与农业或者养殖业相结合实现土地的双重利用。



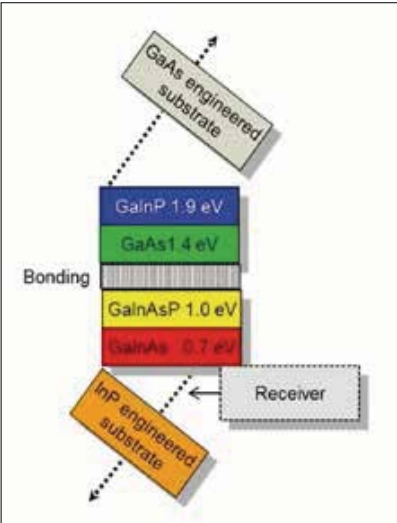


图3. 包括采用了晶圆键合和衬底剥离技术的Soitec四结电池的制造。

到更高的转换效率。我们的计划是进一步释放这种四结电池结构的潜力。对于器件结构的改进工作已经在进行当中，目标是对子电池的性能进行优化并对材料质量进一步改进。从长远来看，这将有助于降低因采用聚光伏而增加的成本，并且使这种技术能用于替代其他类型的太阳能电池。

扩展阅读

1. W. Guter et. al.Proceedings of the CPV-7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, 2011, pp. 5-8.
2. J. H. Ermer et. al.IEEE Journal of Photovoltaics 2209 (2012)
3. V. Sabnis et. al.8th International Conference on Concentrater Photovoltaic Systems, Toledo, Spain 14-19 2012
4. M. Stan et. al. Journal of Crystal Growth 3121370 (2010)
5. K. Tanabe et. al.Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, USA, 2006, pp. 768-71.
6. D. Bhusari et. al. “Direct semiconductor bonding technology (SBT) for high efficiency III-V multi-junction solar cells,” in Proceedings of

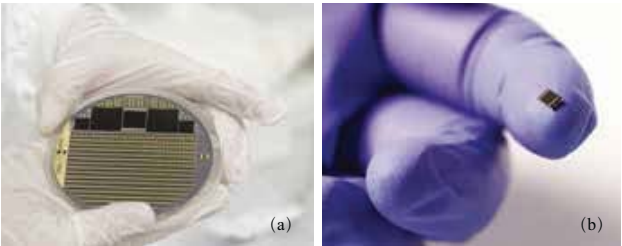


图4. Soitec的太阳能电池 (a) 在晶圆上，(b) 经芯片切割之后。

the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, Washington, USA, 2011, pp. 1-4.

7. M. Meusel et. al.Progress in Photovoltaics: Research and Applications 11499 (2003).

Reasons to sponsor CS International Conference 2015

- ✓ **Reach a global audience** - a great platform for your company and products
- ✓ **Increase your brand awareness** - 8 months of marketing to the global industry
- ✓ **Lead generation** - pre, during and post conference
- ✓ **Benefit from media exposure** - HTML, social media, direct mail
- ✓ **Form global partnerships** - extensive networking opportunities
- ✓ **Highly targeted marketing** - reach over 80,000 compound semiconductor professionals
- ✓ **Reach new contacts** - the only conference to cover the entire compound semiconductor industry



www.cs-international.net

Call now +44 (0)24 7671 8970 or email event@cs-international.net for sponsorship details

CS INTERNATIONAL
CONFERENCE

Connecting the leading compound semiconductor industry insiders

提升 SiC 外延生长的速率及其产量

新型的反应器能够在 150mm SiC 晶圆上实现高质量和快速的外延生长。

一个日本研究团队宣称他们已经开发了一种新型的 150mm SiC 外延反应器，能将高质量 SiC 外延晶圆的产量提高到一个新的水平。

这一高性能外延设备的特点是具有很高的晶圆转速，能够获得 40-50 $\mu\text{m}/\text{h}$ 的生长速率。这一设备是由以下五个机构合作完成：它们分别是功率电子工业中央研究所（CRIEPI），Denso, NuFlare Technology, 丰田汽车公司（TMC）和丰田中央研发实验室（TC R&D Labs）。据报告，该设备除了具有高的外延生长速率以外（传统反应器的生长速率一般不会超过 30 $\mu\text{m}/\text{h}$ ），日本团队所研发的这种新型反应器的优点还包括有：它生长的外延晶圆既具有低的缺陷密度，还在厚度和掺杂浓度方面具有卓越的均匀性。

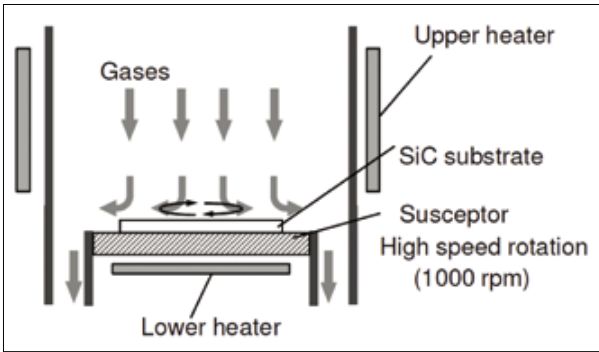
该日本研究团队的成员之一，就职于 CRIEPI and Denso 的 H. Fujibayashi 相信，为了成功地推动 SiC 器件市场的发展，就必须开发出低成本的 150mm 晶圆外延生长技术，该设备必须要具有高的外延晶圆产量、低的缺陷密度和高的生长均匀性。

H. Fujibayashi 说道：“所以，我认为高质量和高产量的 6 英寸 SiC 晶圆的外延生长工艺，比如我们的这一工艺技术，能够推动 SiC 功率器件市场的发展”。

虽然 SiC 外延反应器与 Si 外延反应器结构上相类似，但它的加热区具有更多的加热器单元：除了底部的双区加热器以外，它还加入了上部加热器，全部采用了电阻型加热器。由于它的底部加热器系统是由一个内侧加热器和外侧加热器组合而构成，能够

精确地控制整个晶圆温度及其径向均匀性。

这一工程团队将他们这种单晶圆外延设备称之为“双反应器系统”。由于采用了这种设计，假设每片晶圆的外延生长耗时为 15 分钟的话，此设备就能够达到每小时 4 片晶圆的生长速率度。据 Fujibayashi 所称，尽管多晶圆反应器具有更高的产能潜力，但是相比之下仍然存在一些采用单晶圆系



统的理由。他认为单晶圆系统的体积更为紧凑，从而具有更快的升温-冷却速率，并具有更低的设备维护成本。

此外，Fujibayashi 还指出，在单晶圆系统平台上可以更容易地开发出加工更大尺寸晶圆的反应器。利用这种类型的反应器，从 150mm 晶圆升级到 200mm 晶圆时，晶圆承载盘的直径只需要增加 50mm；但是如果采用的是多晶圆反应器，要实现晶圆尺寸的升级，则目标反应器中晶圆承载盘的直径至少要增加 100mm。

在 Si 和 III-V 族化合物半导体的外延工艺中通常采用了较高的晶圆旋转速度，因为这样能获得较高的生长速率并提高其均匀性。但是，迄今为止，这种晶圆高速旋转还没有应用到 SiC 外延中，这主要是因为 SiC 的生长温度太高——其典型值达到了 1600℃。

该日本团队已经确定了晶圆旋转

速度和气压与外延生长速率之间的关系。他们已经进行了一系列的实验，包括在 4° 斜切（off-cut）Si 晶面的 4H SiC 衬底上进行 SiC 外延生长。在 50 转/分（rpm）的转速下，气压对于生长速率的变化只有很小的影响。但是当转速增加到 1000 转/分（rpm）、气压从小于 100 mba 增加到接近 1000 mbar 时，生长速率将会翻番，将会增加到约 50 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

在较高的气压下，随着旋转速度的增加，膜层沉积厚度的均匀性有了明显的提高：在 500 mbar、1000rpm 转速下其厚度均匀性为 0.25%，而在 50rpm 时其厚度均匀性仅为 1.5%。此处的膜层厚度均匀性定义为厚度的标准差除以其平均值。

然而，我们并不推荐采用高的气压，因为根据模拟计算的结果，当气压达到 800 mbar 时，气体会在靠近反应室边缘区域产生气流涡旋，这将会导致在 SiC 晶圆上产生颗粒污染。

该团队的工程师采用了 267mbar 的系统气压，转速为 1000 rpm，以 37 $\mu\text{m}/\text{h}$ 的沉积速率在 3 英寸晶圆上生长出了 9.3 μm 厚的 4H SiC 外延膜层。这种外延晶圆的总体缺陷密度仅为 0.2 cm^{-2} ，同时其均方根粗糙度仅为 0.18 nm。

采用与上述相同的气压，在 150mm 晶圆衬底上沉积一层稍厚的外延薄膜，其膜层厚度和掺杂的均匀性分别为 2.8% 和 5.2%（均匀性的定义为去除 6mm 晶圆边缘环状区后，其膜层厚度和掺杂浓度值的均方根差除以其平均值）。

H. Fujibayashi et. al., Appl. Phys. Express 7 015502 (2014)

双量子阱隧道场效应晶体管首次亮相

新型隧道场效应晶体管 (TFET) 的目标是低功耗及射频应用。

美国麻省理工学院 (MIT) 的工程师们声称已经制造出了业界首个具有 InGaAs/GaAsSb 双量子阱结构的隧道场效应晶体管 (tunnel FET, TFET)。

在微系统技术实验室 (MTL) 工作的这个团队还取得了其他方面的成就, 他们首次论证了这类器件中与面积相关的驱动电流特性, 并实现了其反向二极管的工作特性 (当反向二极管处于反偏时, 由于载流子的隧道效应, 其输出电流将达到最大值)。

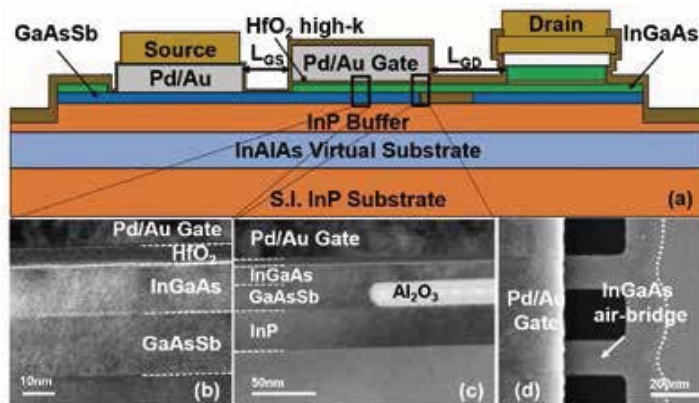
这种新型的隧道场效应管在以下两类应用中极具发展前景: 第一, 它的亚阈值电压变化摆幅非常之小, 即驱动电流增大一个数量级时只需有很小的电压变化量, 使得它在低功耗应用中更具吸引力; 第二, 作为一个反向二极管, 它可以应用于 RF 的混频和探测。

该团队研发双量子阱隧道场效应晶体管的动机之一就是实现一个小的亚阈值电压变化来提高其驱动电流的数值范围。先前制成的 TFET 结构已经具有小于 60 mV/dec 的亚阈值电压变化摆幅, 但只能在较低的驱动电流条件下才能实现。

在 2011 年, 美国加州大学伯克利分校 (UCB) 的 S. Agarwal 和 E. Yablonovitch 得到了一个理论研究结果, 认为可以在很宽数值范围的驱动电流条件下, 通过状态密度的切换来获得一个很陡峭的亚阈值电压的变化摆幅。为了产生这种形式的切换, TFET

结构在约束电场方向上必须要有两个量子阱, 并且相互重叠。

麻省理工学院 (MIT) 所研发的这种器件具有以下结构特征: 由一个 Be 掺杂浓度为 10^{19}cm^{-3} 、18nm 厚的 p 型 GaAs_{0.5}Sb_{0.5} 层和一个 Si 掺杂浓度为 10^{17}cm^{-3} 、15nm 厚的 n 型 In_{0.53}Ga_{0.47}As 层来形成量子阱, 在半绝缘的 InP 衬底上用 MBE 工艺来生长这些外延层 (见图)。



(a) MIT 的工程师已经制造出双量子阱隧道场效应晶体管。(b) 隧道电子显微镜的截面分析提供了栅极区域隧道结和栅叠层的照片。(c) InGaAs “气桥”的边缘。(d) 悬空 “气桥”的扫描隧道显微镜顶视照片。

器件的制作过程包括有: 电子束光刻形成图形; 用原子层沉积法 (ALD) 沉积一个厚度为 5.3nm 的 HfO₂ 栅介质层; 采用一个具有高选择性的湿法腐蚀方法来去除 GaAsSb 层, 以形成悬空的 InGaAs “气桥 (air bridge)” ; 最后沉积一层 Al₂O₃ 钝化层来保护器件。

该团队所获得的测量数据显示, 他们 TFET 器件的输出电流强度正比于其栅极面积。共计用了 4 个器件来确定这一实验结果, 其中 TFET 栅极的面积范围是在 $10\mu\text{m}^2$ 至 $90\mu\text{m}^2$ 之间。

这种 TFET 器件的缺点是它具有较大的亚阈值电压摆幅: 其最小值是 140mV/dec, 在 20nA 到 $2\mu\text{A}$ 的电流下它的有效值为 220mV/dec。

MIT 的工程师认为, 产生较大亚阈值电压摆幅的原因之一是高的关断电流, 这可能是来自于穿过 30nm 厚度 InP 缓冲层的漏电流, 这问题可以通过对漏极电流下方的 InP 层进行底切挖槽 (undercutting) 来给以解决。

产生较大亚阈值电压摆幅的另一个原因是在 HfO₂/InGaAs 界面的 InGaAs 导带上存在着高密度的界面陷阱。

据 C-V 法测量得到该界面陷阱密度的最小值是 $2 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 。

麻省理工学院的 T. Yu 解释说: “界面陷阱的产生主要由介质层沉积前 InGaAs 表面的悬空键所决定”, 他认为这些陷阱可以通过化学或等离子处理等钝化工艺来使其达到最小化。

对 TFET 栅极的二极管特性进行测量表明, 它具有可调的反向二极管特性, 其栅极偏置可以调节以降低器件的噪声或提高其灵敏度。

Yu 还说道: “虽然我们还没有完成对器件的实际 RF 性能更深入的研究, 但是根据以往对反向二极管的研究结果, 我们的器件在进过校准和优化以后, 它在 RF 的应用中应该是很有发展前途的”。

该项目的其它研发计划还包括有: 减少界面陷阱密度和降低漏电流, 并通过优化栅介质和器件结构来减小亚阈值电压的变化摆幅。

T. Yu et. al., IEEE Electron Dev. Lett. 341503 (2013)



减小紫外 LED 发光效率的下降问题

采用渐变组分的量子阱将有望遏制 AlN/GaN LED 中的俄歇复合率。

就像可见光 LED 一样，紫外 LED 也同样面临着发光效率的下降问题，这是一种随着驱动电流密度的增加而产生发光效率下降的现象。但是在普通的极性 LED 中采用将其有源区量子阱改为渐变组分的方法，则有可能来消除这种不希望产生的现象，这种在量子阱组分上的改变将能对作用于空穴的电场效应起到补偿作用。

这种能够提升 LED 发光性能的方法是一项国际合作理论研究的一项成果，此项研究揭示了在 AlN/GaN LED 中的极化电场是如何放大了俄歇复合率而抑制了辐射复合率。

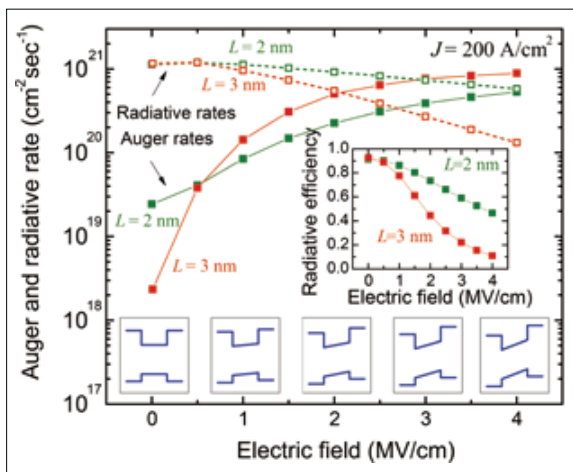
“我们直观地解释了为什么这种增强效应应该会发生，并且用理论计算来支持这一解释”，来自 Technion 的 R. Vaxenburg 如是说。他与他大学同事 E. Lifshitz 和来自 Ioffe 物理技术研究所 (IPTI) 的 A. Rodina 和来自 Naval 研究实验室 (NRL) 的 A. Efros 所组成研究团队共同完成了这项工作。

这个跨国合作团队同样也研究了非极性 LED：他们最新的理论计算指出，俄歇复合引起的光效下降问题应该是发生在 InGaN/GaN LED 中，但是不会发生在具有类似结构的 GaN/AlN LED 中。Vaxenburg 解释说：“这两种材料有着不同的禁带宽度，在非极性情况下这会对俄歇过程产生决定性的影响”。

他和他的合作者们强调，在所有 LED 器件中，非辐射性的俄歇复合是一种包括了荷电载流子激发到连续态的过程，它将会受到局域初态波函数和离域载流子波函数的交叠情况所

控制。

由于在量子阱中存在着强的极化电场，极性 LED 具有尖角形的结构和倾斜形的约束势场，这在局域载流子波函数中会产生高阶傅里叶谐波分量，



8-能带的理论计算结果揭示了俄歇复合率和辐射复合率与不同厚度量子阱中电场强度之间的关系。内插图详细显示了随着电场强度的增加其内量子效率急剧下降的现象。

它与激发载流子的动量相匹配，就能导致产生高的俄歇复合率。

Vaxenburg 透露，他们研究团队所进行的理论计算工作遇到了很大的困难：“所有的计算步骤，从理论构建到实际解析都非常之复杂。幸好我们利用了非常高效的解析方法才完成了这项工作，使得我们耗费数周时间所收集的数据能在数台高性能计算机上得以运行”。

即使是如此复杂的理论计算也难以精准地描述 LED 行为的方方面面。在该研究团队目前的 8-能带模型中，还是没有计入更高能量能带的贡献，并且还忽略了自由载流子的屏蔽效应，这些效应都有可能影响到 LED 结构中的电场分布。

Vaxenburg 强调说：“然而，由电场引起俄歇复合增强的总体效应必须要得到体现，因为在任何情况下电势

分布都具有在尖角处集中这一特征”。理论计算考虑了 2nm、2.5nm 和 3nm 宽度的量子阱、从 0 到 4 MV cm⁻¹ 的电场强度以及 200 A cm⁻² 的注入电流强度等条件，结果表明，由于电子-空穴波函数交叠的减少，在所有量子阱中高电场下的辐射复合率都发生了下降。

上述这种影响在最宽的量子阱中表现最为明显，因为该处载流子的分离现象更为明显（见图所示）。与此同时，俄歇复合率数值随着电场强度的增加将会增加一到三个数量级。

俄歇复合率和辐射复合率的变化所产生的一个结果就是，随着电场强度的增加其内量子效率会急剧地下降。然而，要注意当电场强度为零时（这是非极性 AlN/GaN LED 所处的状态），其辐射复合率就比俄歇复合率要高出很多。

随后的研究发现在极性 AlN/GaN LED 中，受到空穴-空穴-电子过程所支配的俄歇复合率可以通过恢复相对于空穴的矩形约束电势来加以抑制，利用渐变组分的量子阱可以产生一个逐渐增加的体禁带宽度就有可能来达到这一目的。

该研究团队的工作目标之一是在当今标准 8-能带模型的基础上进一步来改进计算方法，Vaxenburg 解释道：“我们将会增加一个更加贴近实际情况的自洽电势分布，它将与载流子浓度相关，并且能反映它们的屏蔽效应”。

R. Vaxenburg et. al., Appl. Phys. Lett. 103 221111 (2013)



III-V 族化合物可激发明亮的闪光

在没有磁场的情况下，由 InGaAs 量子阱的固态堆栈产生的超荧光突发脉冲有可能最终实现适合通信应用的超高速光电器件。

产生自一个固体方块的自发式光突发脉冲阐明了相互作用的量子粒子在被驱动至远离平衡状态时所呈现出的非同寻常的运行方式。

美国赖斯大学 (Rice University) 的科学家发现的一种触发这些闪光的方法有可能最终造就能以 ps 级的速度传输信号的新型电信设备和其他装置。

赖斯大学实验室的 Junichiro Kono 发现，这种持续时间为万亿分之一秒的闪光在从固态方块内部脉动的过程中会改变颜色。

研究人员说，这种现象可以理解为此前已知的两种多体概念的组合：超荧光（在原子和分子系统中可见）和费米边奇点（一种已知会出现在金属中的过程）。

该研究团队之前曾报告说，通过强烈激发强磁场中的半导体量子阱而首次观察到了固态系统中的超荧光。目前的这项新工艺（费米边超荧光）则不需要他们使用强磁铁。这就为制作紧凑型半导体器件以产生 ps 级的光脉冲提供了可能性。

作为实验的核心，半导体量子阱包含了粒子（在此场合中为电子与空穴的密集集合），并将它们限制在只可于纤巧的堆叠势阱所允许的二维空间之内摆动，它们在这里常遭受到强烈的库仑相互作用。

先前由赖斯大学和佛罗里达州立大学进行的实验显示：可以在极其寒冷的条件下和强磁场的作用下（这两种环境均进一步地减缓了电子的运动并构成了一种类原子系统）通过用激光来激发量子阱堆栈以产生超荧光突发脉冲。其基本特性与我们已知的原

子系统中的超荧光本质上是相同的。

但是此项成就依旧是个谜，尤其是在研究了在弱磁场或零磁场条件下获得的结果之后。Kono 说，研究团队当时并不明白为什么突发脉冲的波长在其 100 ps 的时间跨度里会发生改变。

不过他们现在搞清楚了。

这支弄清了其中原委的研究团队包括了主要的合著者 Timothy Noe（赖斯大学博士后研究员）和 Ji-Hee Kim（前赖斯大学博士后研究员，目前是韩国成均馆大学的一名研究教授）。

在新的实验结果中，研究人员不仅说明了光的波长在整个时间跨度内（作为一个费米边奇点）演变所基于的机理，同时还设法进行了记录（而不必兴师动众地前往位于佛罗里达州的国家高磁场实验室）。

Kono 说，超荧光是原子物理学中的一种众所周知的多体（或“协同”）现象。多体理论为物理学家提供了一种了解大量相互作用的粒子（比如分子、原子和电子）怎样集体行动的方法。

超荧光就是一个例子，它向人们展示了处于严格控制下的原子在受到一个外部能量源的触发时是如何“协作”的。然而，半导体中的电子和空

穴是带电粒子，所以它们之间的相互作用比原子或分子更强。

和以前一样，量子阱采用由 GaAs 势垒加以分离的 InGaAs 堆叠块组成。Kono 说：“它是一种独特的固态环境，多体效应在这里完全主宰着系统的动态特性。”

他接着说道：“当施加了一个强磁场时，电子和空穴将被完全量子化，也就是被限制在其运动范围之内，就像原子中的电子那样。于是，当存在强磁场时的基本物理性质与原子气体中的情形相当类似。但是，当我们减弱并最终取消磁场时，我们将进入一种原子物理学不能触及的体制，在这里存在着电子状态或能带的连续体。”

Kono 研究团队的目标是在液氮温度（约 - 450°F）下尽可能保持粒子的致密，使其量子状态显而易见，即“量子简并”。

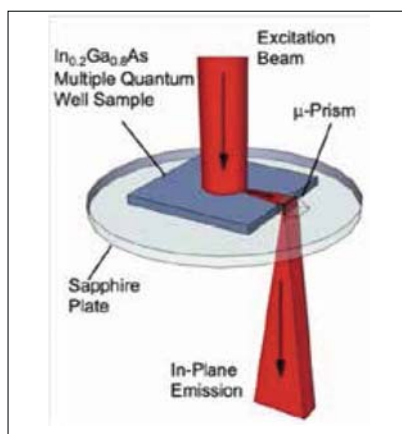
当费米能量远远大于热能时会发生这种情况。当被强激光泵激时，这些量子简并粒子将聚集能量并在费米边将其作为光线释放；系统中最具活力的粒子的能级。当电子和空穴组合起来释放光子时，该费米边将移动至能量较低的粒子并触发更多的反应，直到该序列结束为止。

研究人员发现，随着突发脉冲的行进，辐射光转向更高的红光波长。

Kono 指出：“这项发现中很棒的一点是我们有了一种材料，我们利用一个 150 飞秒脉冲对其实施激发，并等待 100 ps，然后突然出现一个 ps 级脉冲。这是一个很长的延迟。”

“这有可能最终造就一种利用固体产生 ps 级脉冲的新方法。虽然以前我们曾见到过某种基本相同的现象，但那需要强磁场，因此没有实际的应用。然而现在，最新的工作成果证明我们不再需要使用磁铁了。”

由 Ji-Hee Kim 等人撰写的论文发表在 Scientific Reports, 3, 3283. doi:10.1038/srep03283 上面。美国国家科学基金会和佛罗里达州政府对该研究项目提供了支持。



在没有磁场作用的情况下产生自固态量子阱堆栈的超荧光突发脉冲。这项发现有可能最终实现适合电信应用的超高速光电子器件（照片来源：Kono 实验室 / 赖斯大学）

广告索引 Advertisers & Web Index

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Aixtron SE	德国爱思强股份有限公司	www.aixtron.com	IFC
COMPUTEX TAIPEI		www.ComputexTaipei.com.tw	IBC
CS International Conference		www.cs-international.net	23
EV Group		www.EVGroup.com	2
The 13th CleanRooms China Conference & Products Display	洁净室研讨会暨产品展示	www.crcevent.com.cn	1








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 (雅时国际通讯)
Unit B, 13/F, Por Yen Buiding,
No. 478 Castle Peak Road,
Cheung Sha Wan,
Kowloon, Hong Kong
Tel: 852-28386298

Publisher (社长) - China
Adonis Mak (麦协林)
Adonis@actintl.com.hk

Editor in China(中国版编辑)
Sunnies Zhao (赵雪芹)
sunniesz@actintl.com.hk

Sales Director (销售总监)
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)
Michael Tsui (徐旭升)
michaelt@actintl.com.hk
Tel: 86-755-25988571

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: 86-10-64187252

Taiwan (台湾地区)
Monica Liu (刘方美)
monica@arco.com.tw
Tel: 886-223965128 x 204

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



COMPUTEX TAIPEI

Shaping the Future!

Taiwan
The Global Stage for ICT

2014
JUNE 3 - 7

Venues:

TWTC Nangang Exhibition Hall
TWTC Exhibition Halls 1 & 3
Taipei Int'l Convention Center

Organizers:



www.ComputexTaipei.com.tw

洁净室 CleanRooms CHINA

污染控制的实施、工艺和技术

半导体、制药、医疗设备、食品等行业污染控制专业人士的刊物

电子书(eMagazine)
cleanrooms-china.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](#)

