

第三代半导体信息简报

2018年12月（总第27期）

中国科学院文献情报中心

2018年制

本期目录

政策计划

欧盟批准法国、德国、意大利和英国为微电子联合研究和创新项目投资 17.5 亿欧元的资助.....1

美国空军授予美国 Qorvo 公司研究合同，以加速 GaN 设计、性能和可靠性 2

DARPA 授予 HRL 资助计划，旨在实现氮化镓集成电路技术的成熟.....3

Yole 预测：2017-2023 年 GaN 在电源和充电器市场发力，智能手机的充电器是杀手级应用.....4

比亚迪欲以第三代半导体掀电动车变革.....7

北京顺义打造第三代半导体创新型产业集聚区.....9

共论第三代半导体发展新动力--2018 中国新材料产业发展大会碳化硅技术及应用分会成功召开.....10

前沿研究

多晶型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 在生长、加工和器件性能方面的最新进展综述.....13

2018 年氮化镓电力电子路线图.....15

超宽带隙半导体的研究机会与挑战.....17

AlGaN 光子学:材料和紫外器件的最新进展.....18

应用实施

聚能晶源成功研制“8 英寸硅基氮化镓外延晶圆”.....20

Sanan IC 公布商业版本的 6 英寸碳化硅晶圆制造流程.....21

英飞凌推出可量产的氮化镓解决方案.....22

贸泽开售 TI LMG3410R070 GaN 功率级产品.....24

比亚迪发布 IGBT 4.0, 将推搭载 SiC 电控电动车25

INSTEL

政策计划

欧盟批准法国、德国、意大利和英国为微电子联合研究和创新项目投资 17.5 亿欧元的资助

2018 年 12 月 18 日，欧盟委员会通过了法、德、意、英四国共同提出的“微电子联合研究创新项目”，并将在 2024 年前向该项目投资 17.5 亿欧元，预计会带动 60 亿欧元的私有投资。

该项目的总体目标是研发芯片、集成电路、传感器等创新性技术与元器件，可被应用于家电、自动驾驶汽车等消费类设备，以及电池管理系统等产业设备。值得注意一提的是，该项目有望刺激额外的下游研究与创新，特别是与物联网和互联网无人驾驶车辆相关的广大领域。

具体而言，法国将提供最高达 3.55 亿欧元的资助，德国、意大利、英国将分别提供最高达 8.2 亿、5.24 亿和 4800 万欧元的资助。四个国家的 29 家机构将直接参与该项目的建设，主要是企业，另有两家科研机构，他们将承担 40 项相互关联的子项目。这些项目将集中于以下 5 个彼此相关和互补的技术领域：

(1) 高效芯片：开发能提高芯片能效的新解决方案，例如，降低电子设备包括车载电子设备的整体能耗；

(2) 功率半导体：面向智能家电及电动汽车与混合动力汽车开发新的元器件技术，提高最终半导体设备的可靠性；

(3) 智能传感器：开发具备更高性能和精确度的新的光学、运动或磁场传感器。智能传感器将通过更可靠、更及时的响应提高车辆安全性，帮助车辆变道或避开障碍物；

(4) 先进的光学设备：针对未来高端芯片开发更有效的技术；

(5) 复合材料：开发适用于更先进芯片的新型复合材料（替代硅）和设备。

欧委会特别指出，此等规模的微电子研究与创新投资是一项重大的跨国创新项目，隐含着相当大的风险因素，因此公众的支持对激励企业开展研发与创

新活动是恰当和必要的。由参与成员国、企业和欧委会代表组成的治理结构将负责监督该项目，特别是监控个体参与者及其合作伙伴的进展，以及项目参与者之外的研究成果共享。

于杰平摘译自

<https://mp.weixin.qq.com/s/gz9068WlAr5ZI4N3GehYw>

http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-6862_en.htm

美国空军授予美国 Qorvo 公司研究合同，以加速 GaN 设计、性能和可靠性

2018 年 11 月 6 日宣布，美国的 Qorvo 公司（为手机、基础设施和国防应用提供核心技术和射频解决方案）已获得美国空军研究实验室（AFRL）授予的为期四年的合同，以开发和实施基于物理的、统一的氮化镓（GaN）建模框架，以加速 GaN 器件的设计。

项目内容：

Qorvo 公司为美国国防部（DoD）提供 GaN 器件，将领导一组行业和大学组织创建一个统一物理建模和器件建模的工具，以提供强大的预测功能。该工具将允许电路设计人员在设计阶段进行性能和可靠性权衡。

项目团队：Qorvo 作为项目的主承包商，团队将包括 Modelithics 公司、帕多瓦大学、NIAWR、HRL 和科罗拉多大学博尔德分校。

项目目标：新功能应显着减少设计 - 构建 - 测试迭代的次数，提高可靠性，并降低对空军、国防部和商业行业至关重要的能力的成本和交付时间。

项目意义：Qorvo 基础设施和国防产品业务总裁 James Klein 说，“该项目使空军能够利用 Qorvo 近 20 年的专业知识，开发业界最可靠、性能最高的 GaN 工艺。新的建模和仿真工具将加速先进的 GaN 设计，并降低成本”。

时间节点：预计在 2022 年期间交付最终的统一建模框架。

于杰平选摘自

<https://mp.weixin.qq.com/s/q9hWZezMuaI0wkEriQml5Q>

<https://www.qorvo.com/newsroom/news/2018/qorvo-awarded-air-force-contract-to-accelerate-gan-design-performance-and-reliability>

DARPA 授予 HRL 资助计划，旨在实现氮化镓集成电路技术的成熟

2018 年 11 月 27 日上午 HRL 新闻报道，HRL Laboratories, LLC 已获得国防高级研究计划局（DARPA）颁发的奖项，以显著提高其尖端毫米波（毫米波）T3 氮化镓（GaN）电子器件的技术和制造准备水平。通过将 GaN 层叠到碳化硅衬底晶片上而制成的集成电路提供射频（RF）和毫米波半导体技术之间的效率、输出功率和生存能力的最佳组合。这使得这些 GaN 器件和单片微波集成电路（MMIC）成为下一代雷达、电子战系统和通信系统的关键部件。

HRL 实验室是波音公司和通用汽车旗下的研发实验室，专门负责传感器和研究材料、信息和系统科学应用电磁学、集成电路和微电子方面的研究工作。实验室的工程师表示，将 GaN 应用于碳化硅衬底晶圆后研制的集成电路能够满足最佳的组合效率、输出功率，而此类 IC 在无线电频率和毫米波半导体技术同样适用；这类 GaN 器件和单片微波集成电路将成为促进下一代雷达、电子战系统和通信系统发展的关键。

应 HRL 实验室与 DARPA 二者要求，HRL 传感器和电子实验室的工程师于 2018 年 10 月 29 日举办了研讨会，诚邀各学术机构和政府实验室的电路设计师，共同研讨 HRL 的 T3 GaN 技术流程设计组件的优劣。该研讨会的发起者、HRL 公司的 Dan Denninghoff 博士说：“为了促进 T3 GaN 技术走向成熟，DARPA 为我们提供了资金保障，如今我们只需要充分利用技术研发优势。同时我们非常高兴 GaN 技术能够引起各界伙伴的兴趣，并热情地加入进来。作为我们项目团队的一份子，设计师们将参与到基于多项目晶片的单片微波集成电路各类设

计工作中。”

HRL mm-wave GaN 研发项目负责人赫罗特博士说：“到目前为止，阻碍 GaN 电子产品进入军工市场的因素有两个，生产周期长和技术发展不成熟。该项目将缩短实际设计的产品与预想的世界最快的 GaN 产品之间的差距。在 DARPA 的支持下，我们完全有能力缩短生产周期，促成流水线生产，并满足国防性能标准。简而言之，政府需要的是一个拥有成熟和先进的 GaN 技术的工业供应商，而我们的微加工技术实验室有优秀的生产环境，我们将致力于成为高性能毫米波 GaN 器件的主要供应商之一。”

2018 年 11 月，HRL 获得 DARPA 的毫米波 GaN 成熟项目的 916 万美元成本加固定费用完工合同。工作将在加利福尼亚州马里布（97%）和加利福尼亚州亨廷顿海滩（3%）进行，预计完成日期为 2020 年 4 月。

于杰平选摘自

<http://www.hrl.com/news/2018/11/27/highest-speed-gan-electronics-racing-to-the-finish-line>

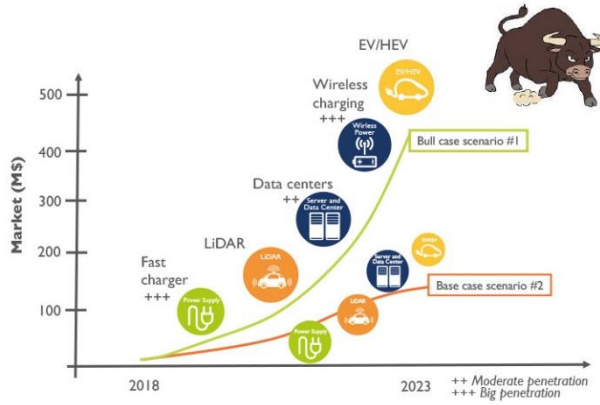
<https://mp.weixin.qq.com/s/y52xvK0y8wtLeFS9qPU2PQ>

Yole 预测：2017-2023 年 GaN 在电源和充电器市场发力，智能手机的充电器是杀手级应用

2018 年 11 月法国悠乐（Yole）公司发布《电力 GaN：外延、器件、应用和技术趋势》报告，表示许多电力电子和化合物半导体公司，包括英飞凌、意法半导体等领先企业等，深入参与到发展项目。其中一些企业已经推出了 GaN 产品线，但并未占主流。

GaN for power electronics application: evolution of the market with two scenarios

(Source: Power GaN 2018: Epitaxy, Devices, Applications and Technology Trends, Yole Développement, November 2018)

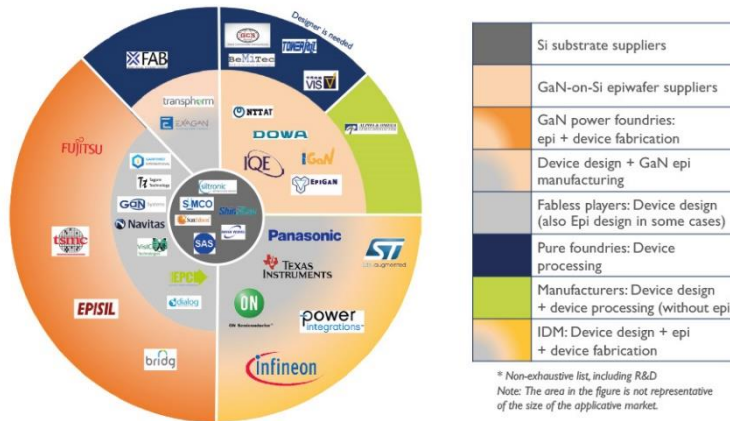


从理论的角度来看，GaN 提供了超越传统 Si MOSFET 的出色技术优势，这一点非常清楚。该技术非常吸引人，越来越多的企业正在进入该领域；而且，降低价格可能使 GaN 器件成为目前使用的 Si 基功率开关晶体管的有力竞争者。

System Plus 咨询公司半导体设备部门负责人 Elena Barbarini 博士说：“然而，技术全景还不清楚；每个制造商都提供芯片设计和封装集成解决方案。这带来了激烈的竞争，将加速在集成和更优性能方面的技术创新。”

Power GaN industry overview* 2018

(Source: Power GaN 2018: Epitaxy, Devices, Applications and Technology Trends, Yole Développement, November 2018)



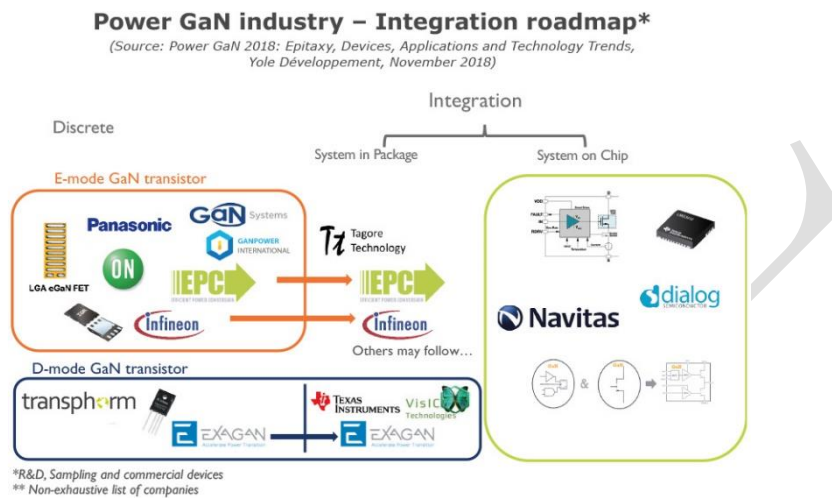
场景一-电源

尽管目前 GaN 电源市场与 328 亿美元的硅电源市场相比仍然很小，但 GaN 器件正自信地渗透到不同的应用中。

功率 GaN 市场中的最大份额仍然是电源应用，即手机的快速充电。今年，

Navitas 和 Exagan 推出了带有集成 GaN 解决方案的 45W 快速充电电源适配器。LiDAR 应用是高端解决方案，可充分利用 GaN 功率器件中的高频开关。

Yole 技术与市场分析师 Ana Villamor 博士评论道：“在各种应用市场中，市场增长的积累，特别是在这种情况下最重要的电源市场，确认了我们的第一个场景。在该基础场景下，预计 GaN 市场将稳步增长。Yole 预计 GaN 市场将在 2017 年至 2023 年之间以 55% 的复合年增长率增长。”



场景二-充电

然而，这种分析并不是看未来产业的唯一途径。Yole 的 Power & Wireless 团队进一步表示。一些业内人士证实，领先的智能手机制造商 Apple 考虑将 GaN 技术作为其无线充电解决方案，这些有可能带来 GaN 功率器件市场爆炸的杀手级应用。

Yole 的功率 & 无线部门及技术 & 市场分析师 Ezgi Dogmus 博士评论道：“毫无疑问，苹果或其他智能手机巨头对 GaN 的预期应用将彻底改变市场的动态，并最终为 GaN 功率器件行业提供生机。事实上，我们可以想象，在像苹果这样的公司采用氮化镓之后，许多其他公司将继续关注商业电子市场。”

更多领域

多个企业，如 EPC 和 Transphorm，已经获得汽车认证，为 GaN 的潜在增长做准备。此外，BMW i Ventures 对 GaN 系统的投资清楚地表明了汽车行业对

基于的 GaN 的 EV/HEV 技术解决方案也感兴趣.....在全球范围内，Yole 的第二个场景，名为 Bull Case Scenario，更具发展性，条件是有领先的商业制造商采取 GaN 无线充电解决方案。

在该场景下，到 2023 年，GaN 功率业务可能达到约 4.23 亿美元，2017 年至 2023 年的复合年增长率为 93%。

于杰平选摘自

<https://www.i-micronews.com/report/product/power-gan-2018-epitaxy-devices-applications-and-technology-trends.html>

<https://mp.weixin.qq.com/s/mmEnQcLrBBtYtTcfa2BHBw>

比亚迪欲以第三代半导体掀电动车变革

2018 年 12 月 10 日，比亚迪在宁波发布了在车规级领域具有非常意义的 IGBT4.0 技术，再一次展示出其在电动车领域的前端地位。这一晚，比亚迪将 IGBT 这个长期游离于人们视野、但又堪称电动车 CPU 的核心技术带到了“聚光灯”下。

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 全称“绝缘栅双极型晶体管”，其芯片与动力电池电芯并称为电动车的“双芯”，是影响电动车性能的关键技术，其成本占整车成本的 5% 左右。对于电动车而言，IGBT 直接控制驱动系统直、交流电的转换，决定了车辆的扭矩和最大输出功率等。得益于在 IGBT 等核心技术领域的强大实力，比亚迪电动车的超凡性能得以落地并具备持续迭代升级的能力。

此次发布会上，比亚迪还释放了另一重磅消息：比亚迪已投入巨资布局性能更加优异的第三代半导体材料 SiC（碳化硅），有望于 2019 年推出搭载 SiC 电控的电动车。预计到 2023 年，比亚迪旗下的电动车将全面搭载 SiC 电控。

比亚迪推出 IGBT4.0，引领车规级功率半导体发展

IGBT 属于汽车功率半导体的一种，因设计门槛高、制造技术难、投资大，

被业内称为电动车核心技术的“珠穆拉玛峰”。此前，该技术主要掌握在国际巨头手中。

“比亚迪依靠自身强大的研发实力、人才的聚集、产业链的配套，在汽车功率半导体领域有了非常核心的突破，这个突破不是今天想，明天投入就能实现的，是积累了十多年的技术、人才和产业链才能实现的。”中国半导体行业协会 IC 设计分会副理事长周生明在活动现场如此表示。

制造 IGBT 难度极大，在大规模应用的 1200V 车规级 IGBT 芯片的晶圆厚度上，比亚迪处于全球突破水平，可将晶圆厚度减薄到 120um（约两根头发丝直径）。

经过 10 余年的技术积累，比亚迪 IGBT 不断迭代更新。活动现场，中国电器工业协会电力电子分会秘书长蔚红旗表示：“比亚迪在电动车功率半导体领域布局较早，而且真抓实干，中国的电动车发展不用担心被‘卡脖子’了。”

此次推出的比亚迪 IGBT4.0，在诸多关键技术指标上都优于当前市场主流产品，例如：

1. 电流输出能力较当前市场主流的 IGBT 高 15%，支持整车具有更强的加速能力和更大的功率输出能力。

2. 同等工况下，综合损耗较当前市场主流的 IGBT 降低了约 20%。这意味着电流通过 IGBT 器件时，受到的损耗降低，使得整车电耗显著降低。以比亚迪全新一代唐为例，在其他条件不变的情况下，仅此一项技术，就成功将百公里电耗降低约 3%。

3. 温度循环寿命可以做到当前市场主流 IGBT 的 10 倍以上。这意味着比亚迪电动车在应对各种极端气候、路况时，能有更高的可靠性和更长的使用寿命。此前，比亚迪电动车就以其优异的性能与稳定的可靠性，完成了从新疆吐鲁番的高温，到北欧的高寒、再到西藏高原的高海拔等全球严苛自然环境的测试，并在全球 300 多个市场成功经历了各种气候、路况、驾驶习惯的考验，得到广泛认可。具有自主知识产权的核心技术，为第三代半导体材料和器件的持续发展奠定基础。

厚积薄发，打造电动车性能的一杆秤

在刚刚结束的 2018 广州车展上，比亚迪全新一代唐 EV 正式对外预售。其百公里加速 4.4 秒、续航里程 600 公里（60km/小时等速续航下）的超强性能再度确立了行业地位，并获得消费者的高度认可，预售当天的订单便突破 2000 辆。

中国科学院院士、国家 863 “节能与新能源汽车”重大项目专家组组长欧阳明高曾评价，比亚迪全新一代唐“已经可以与世界上电动汽车技术相较量，代表了当前电动汽车制造的高水准”。

市场和行业的认可，离不开比亚迪 IGBT 等核心技术的加持。得益于比亚迪 IGBT 在芯片损耗、电流输出能力等方面的优异性能，比亚迪插电式混合动力汽车，率先搭载了“542”黑科技——“百公里加速 5 秒以内、全时电四驱、百公里油耗 2 升以内”。

于杰平选摘自

<https://mp.weixin.qq.com/s/FfZP-dlhuTkeDDH1jG3b2w>

北京顺义打造第三代半导体创新型产业集聚区

2018 年 12 月 20 日至 22 日，中国创新创业大赛国际第三代半导体专业赛全球总决赛在顺义举办。记者从会上获悉，作为为全区重点发展的三大千亿产业集群之一，顺义正在打造北京第三代半导体创新型产业集聚区。其中，第三代半导体材料及应用联合创新基地已于本月竣工，总面积 7.1 万平方米。

作为半导体领域中级别最高、规模最大、参与项目最多的双创赛事，大赛历经半年的征集、选拔，集合了 570 余个优质项目和优秀团队报名参赛，涉及 5G 通讯、能源互联网与新能源并网、新能源汽车与轨道交通、消费类电子与机器人、智慧照明与显示技术、军民融合等多个领域。

据了解，作为为全区重点发展的三大千亿产业集群之一，顺义正在打造北

京第三代半导体创新型产业集聚区。

目前，国际第三代半导体众联空间被科技部评为国家级众联空间，入孵企业已达 50 多家。同时，第三代半导体材料及应用联合创新基地已于本月竣工，总面积 7.1 万平方米，联盟成员单位已达 105 家。此外，中电科集团十三所、中电科集团光电总部、平湖波科半导体芯片、汉能移动能源中心等一批重点项目相继落地，将形成千亿级产业规模。

同时，顺义区已经启动了第三代半导体创新型产业集聚区前期研究和规划建设，编制了第三代半导体产业发展规划，预留了充足的发展空间，制定了第三代半导体产业专项政策，成立了专门机构加强组织领导，统筹了财政资金加大支持力度，吸引了社会资本深化产融合作等。

中关村科技园区顺义园管理委员会借此契机，与北京莱泽光电技术有限公司、光子算数（北京）科技有限责任公司、苏州菲达旭微电子有限公司等 5 个优秀项目现场签约，促进大赛优秀项目落地，并建立长期目标在半年之内促进 15 家优秀企业落地签约。

于杰平选摘自

<http://interview.qianlong.com/2018/1223/3019396.shtml>

共论第三代半导体发展新动力--2018 中国新材料产业发展大会碳化硅技术及应用分会成功召开

2018 年 12 月 20-22 日，由中国材料研究学会发起，联合国家新材料产业发展专家咨询委员会，共同主办的“2018 中国新材料产业发展大会”在南京召开。会议旨在服务国家新材料发展战略，服务新材料特色产业，服务新材料创新创业。除开幕式及大会报告外，大会共设立了半导体材料、生物医用材料、汽车新材料、纳米材料、绿色建材、高温合金等 17 个分会。

第三代半导体产业技术创新战略联盟、国家半导体照明工程研发及产业联

盟 (CSA) 受大会组委会委托承办了半导体材料分会。深圳第三代半导体研究院、北京国联万众半导体科技有限公司作为协办单位共同组织了此次分会。分论坛的主席是中国工程院屠海令院士、第三代半导体产业技术创新战略联盟理事长、国家半导体照明工程研发及产业联盟秘书长吴玲。分论坛秘书长由第三代半导体产业技术创新战略联盟秘书长于坤山担任。半导体材料分会分碳化硅技术及应用、氮化镓技术与应用两个分部。众多知名专家学者介绍了第三代半导体技术与产业的新进展,就第三代半导体发展的新动力共同进行了讨论。

12 月 20 日下午召开了碳化硅技术及应用分会,山东大学徐现刚教授和浙江大学盛况教授共同主持了会议。

山东大学陈秀芳教授做了“SiC 单晶研究进展”报告,主要将讲述课题组近期在大尺寸 SiC 单晶生长及应用方面的成果。

西安电子科技大学汤晓燕教授做了“SiC 功率 MOSFET 技术发展趋势分析”报告,汤教授针对 SiC 功率 MOSFET 的应用前景,目前国内外的发展现状,国内面临的主要技术瓶颈,国内外的技术发展趋势以及主要的技术问题进行分析。相关的技术问题包括:阈值电压的稳定性问题,高电流密度高阈值器件的折中困难,高温高压工作的可靠性问题等。

中国科学院半导体研究所张峰研究员做了“宽禁带半导体 SiC 器件研究进展”的报告,报告围绕第三代半导体 SiC 功率器件的研究,依次介绍 SiC 衬底和外延的研究历程和进展,然后着重介绍 SiC 电力电子器件,主要包括肖特基二极管, MOSFET 和 IGBT。针对目前 SiC 功率器件的研究热点和最新进展,重点介绍 SiC 基 MOSFET 器件的发展过程,及其在 SiC 功率器件中起到的承上启下作用。最后给出 SiC 材料与器件发展的总结和展望。

中物院微系统与太赫兹研究中心固态高压微系统技术研究室牵头副主任李俊焘做了“SiCGTO 脉冲功率开关研究进展”的报告,报告介绍了 SiC 门极关断晶闸管(GTO)器件的器件设计及脉冲电流表征。通过实验完成基于新型结终端扩展结构的 GTO 器件其击穿电压大于 8kV,器件在 25℃室温条件下测试在 100A/cm² 时正向压降为 3.7V。通过在低电感的电容放电回路中进行脉冲放电实

验获得其脉冲放电能力，在 1000V 条件下脉冲放电半正弦周期为 1 μ s，峰值电流可达到 5kA，电流上升率为 15kA/ μ s。

浙江大学郭清副教授做了“新型碳化硅电力电子器件探索研究”的报告。报告讨论了。国内外 SiC MOSFET 技术的发展状况进行介绍，并重点讨论 SiC 超级结器件技术的发展现状和趋势。

上海巴玛克电气技术有限公司副总经理李南坤做了“SiC-Mosfet 功率模块在感应加热电源上的应用技术”报告，报告着重介绍了应用碳化硅(SiC)功率器件应用频率 580kHz (100-1100kHz)，采用全数字式 DSP+CPLD 控制，逆变采用风冷结构，效率、功率因素、可靠性均超过现有 IGBT 和 MOSFET 技术。

国家电网公司全球能源互联网研究院功率半导体所副总工程师兼工艺开发室主任杨霏做了“电网用高压大功率 SiC 器件研究进展”报告。报告针对未来电网中能源互联网急需的 3.3kV 及以上电压等级碳化硅电力电子器件（包括二极管、MOSFET、IGBT 等）目标，提出对碳化硅衬底、外延、芯片性能、大功率封装等方面的技术需求，分析国内外在高性能单晶衬底、厚外延、芯片结构和高电压大电流封装等方面的研究进展，提出国内的研究思路和取得的成果。

大会同期还举办了“国家优势新材料产业展”、师昌绪诞辰 100 周年纪念活动、颁发“第一届师昌绪新材料技术奖”。国家半导体照明工程研发及产业联盟喜获第一届“师昌绪新材料技术奖”。联盟吴玲秘书长受邀出席了大会开幕式，并在大会上做了“半导体照明新材料产业协同创新的探索与实践”的主题报告。

在“国家优势新材料产业展”上，第三代半导体产业技术创新战略联盟、国家半导体照明工程研发及产业联盟、深圳第三代半导体研究院、北京国联万众半导体科技有限公司等单位集中展示了第三代半导体材料方面的组织、研发进展，引起了众多参会材料专家们的关注与好评。

于杰平选摘自

<https://mp.weixin.qq.com/s/-sjdzS9p8zbF-AmMvgg05g>

前沿研究

多晶型 β - Ga_2O_3 在生长、加工和器件性能方面的最新进展

综述

氧化镓 (Ga_2O_3) 由于其巨大的带隙, 正成为某些电力电子、太阳能盲紫外光电探测器、太阳能电池和传感器的可行性候选材料, 其表现出的杰出性能已超出现有技术。人们通常认为, Ga_2O_3 有五种不同的多晶型, 即单斜 (β - Ga_2O_3)、菱形 (α)、缺陷尖晶石 (γ)、立方 (δ) 或正交 (ϵ) 结构。其中, β -多晶型是正常条件下的稳定形态, 已被广泛研究和应用。由于熔融生长技术可用于生长 β - Ga_2O_3 的大块晶体, 与用于制造 GaN 和 SiC 大块晶体的蒸汽生长技术相比, 生产更大面积、均匀基板的成本可能更低。技术上重要的高压整流器和增强型金属氧化物场效应晶体管的性能得益于 β - Ga_2O_3 相对于 SiC 或 GaN 的较大临界电场。然而, 由于 Ga Ga_2O_3 中 p 型掺杂缺乏清晰的演示, 这可能是由带结构引起的一个基本问题, 因此很难同时实现低通电电压和超高击穿。

美国佛罗里达大学材料科学与工程学系、化学工程系以及韩国大学化学与生物工程系的研究人员合作, 综述总结了近年来研究最广泛的多晶型 β - Ga_2O_3 在生长、加工和器件性能方面的最新进展, 讨论了缺陷和杂质对块状、外延和纳米结构材料的输运和光学性能的影响、p 型掺杂的困难以及蚀刻、接触形成、栅极形成用电介质和钝化等工艺技术的发展, 并确定了需要继续开发以充分利用 Ga Ga_2O_3 特性的区域。

相关综述发表在《Applied Physics Reviews》, 2018, 5: 011301, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.09.027>, 题目: “A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices”。

近期, 河北省半导体研究所和中国微电子研究所合作报道, 在 (010) 掺铁半绝缘 β - Ga_2O_3 基片上制备了源场镀 β - Ga_2O_3 MOSFET。金属与离子注入源漏

层之间的欧姆接触电阻 (RC) 为 $1.0 \Omega \cdot \text{mm}$ 。制备的源场镀 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET 的源漏距离 (LSD) 分别为 $11 \mu\text{m}$ 和 $18 \mu\text{m}$ ，其高饱和漏电流 ($I_{\text{D,SAT}}$) 分别为 267 mA/mm 和 222 mA/mm ，低 R_{ON} 、SP 分别为 $4.57 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $11.7 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。源极板中的漏极扩展有效地抑制了峰值电场，大大提高了击穿电压。对于 LSD 分别为 $11 \mu\text{m}$ 和 $18 \mu\text{m}$ 的器件，其破坏性击穿电压 (V_{br}) 分别为 480 V 和 680 V 。最重要的是，功率因数 ($v_{\text{br}}/r_{\text{on, sp}}$) 高达 50.4 mw/cm^2 ，这是有史以来报道的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET 中的最高值。

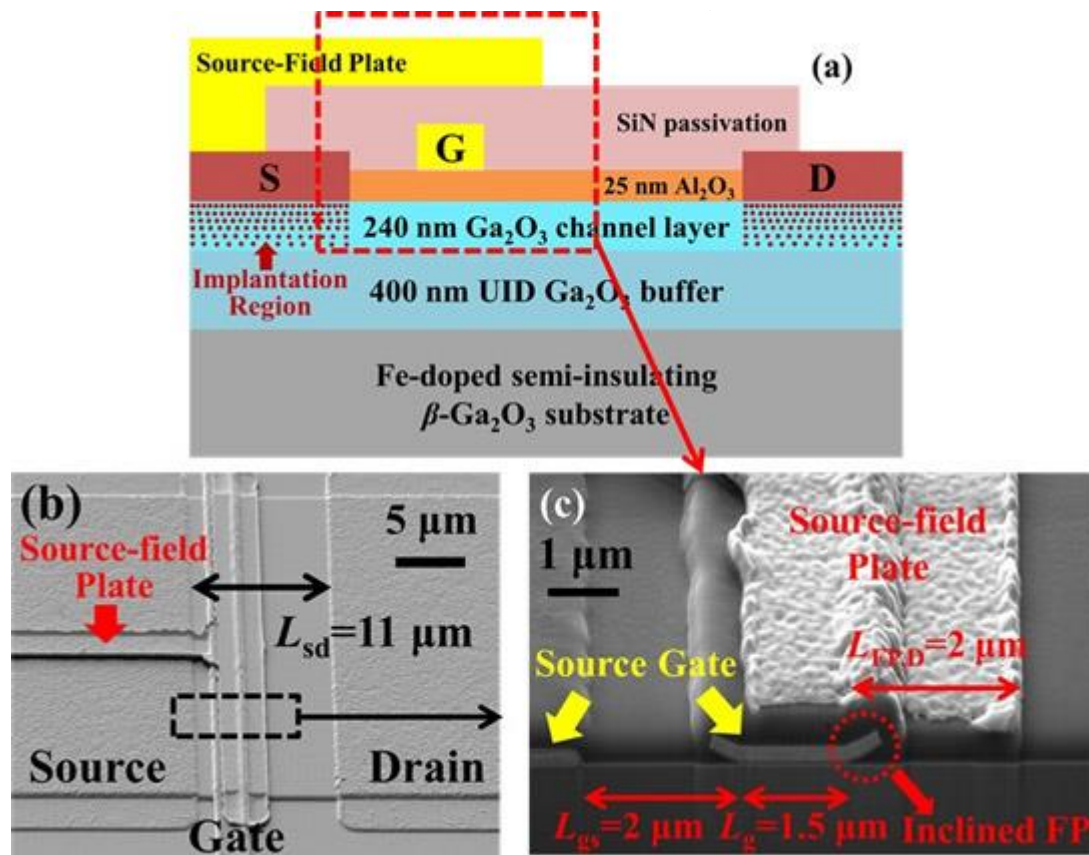


图 1 (a) 源场镀 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET 的截面示意图，以及 (b) 器件表面和 (c) 器件截面的扫描电镜图像。

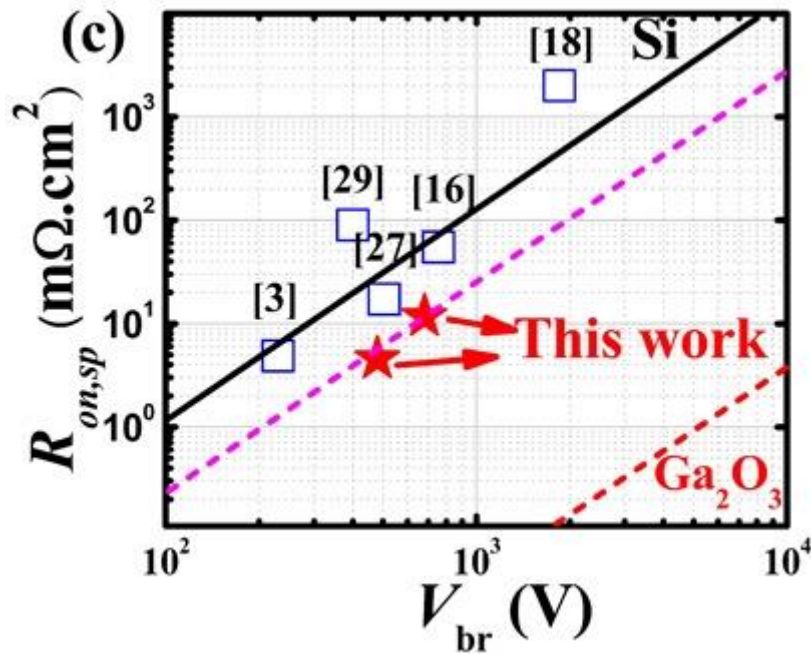


图 2 (a) 11 微米和 (b) 18 微米源漏距离器件的 β -Ga₂O₃ MOSFET 的三端关断状态击穿特性。(c) 河北/微电子设备研究所和其他报告的横向 Ga₂O₃ MOSFET 的 R_{on,sp} 与 V_{br} 图。

该研究成果发表在《IEEE Electron Device Letters》，Publication: 14 November 2018, DOI: 10.1109/LED.2018.2881274，题目：“A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices”。

沈湘摘译自

<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5006941>

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8534376>

2018 年氮化镓电力电子路线图

氮化镓 (GaN) 在硅基半导体行业具有巨大的促进经济增长的潜力，目前面临着性能回报与投资成本的下降。在物质层面上，其高电场强度和电子迁移率已经显示出在高频通信和光子应用方面的巨大潜力。目前，商业上可行的大

面积基板的发展正处于氮化镓的功率转换应用正处于商业化的尖端。

来自英国谢菲尔德大学与美国、日本和德国等多家一流研究机构的研究人员合作，以全新市场和应用程序中出现的特定挑战为驱动力，综述探讨了氮化镓在目前工作基础上构建的电力电子路线图，针对包括 GaN-on-Si HEMTs 在 200mm CMOS fab 中的制造挑战、用于动力装置的氮化镓及其相关材料的外延发射、用于功率器件的 GaN-on-Si 200mm、GaN-on-Si 功率器件的缓冲设计和氮化镓功率电子面临的增长挑战等 17 组氮化镓技术进行了总结和发展前景讨论。这组氮化镓技术发展本身并不是路线图，而是全球最先进的氮化镓研究的宝贵集合，随着市场驱动需求的发展，这些研究将为下一阶段的技术提供信息。第一代生产设备正在点燃巨大的新市场和应用，只有利用高速、低电阻率和低饱和开关晶体管的优势才能实现。工业公司正在广泛的市场上进行重大投资，探索在新电路拓扑、封装解决方案和系统架构中使用该技术，以实现和优化氮化镓晶体管提供的系统优势。

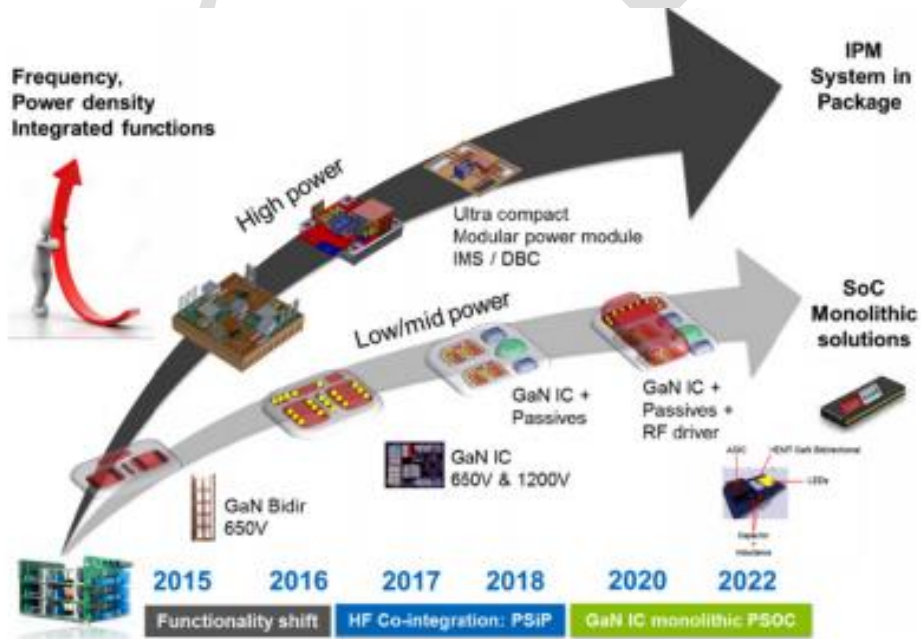


图 1 GaN-on-Si HEMTs LETI 电力系统路线图

相关研究发表在《Journal Of Physics D-Applied Physics》，2018, 51: 163001, DOI: 10.1088/1361-6463/aaaf9d, 题目：“The 2018 GaN power electronics roadmap”。

沈湘摘译自

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aaaf9d/pdf>

超宽带隙半导体的研究机会与挑战

超宽带隙 (Ultrawide-bandgap, UWBG) 半导体的带隙比氮化镓的 3.4eV 要宽得多, 是半导体材料、物理、器件和应用领域一个令人兴奋和具有挑战性的新领域。由于许多器件性能指标与带隙呈非线性关系, 这些半导体在高功率和射频电子以及深紫外光电、量子信息和极端环境应用中, 长期以来都被认为比窄带隙半导体有着引人注目的潜在优势。然而, 直到最近, UWBG 半导体材料, 如高铝含量的 AlGa_N、Diamond 和 Ga₂O₃, 才在成熟度上取得进展, 从而实现其诱人的优势。

来自美国桑迪亚国家实验室、麻省理工大学、美国康奈尔大学等众多一流研究机构以及日本国家信息与通信技术研究所的研究人员合作, 综述了材料、物理、器件和应用研究的机遇和挑战, 以促进它们的发展。

表 1 UWBG 半导体的约翰逊价值指数 (JFOMS), 根据 UWBG 材料/设备属性计算

Material	v_{sat} (10^7 cm s ⁻¹)	E_C at $N_D = 10^{16}$ cm ⁻³ (MV cm ⁻¹)	Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	JFOM (10^{12} V s ⁻¹)
Si	1.0	0.3	145	0.48
GaN	1.4	4.9	253	11.0
AlN	1.3	15.4	319	31.9
β -Ga ₂ O ₃	1.1	10.3	27	18.0
c-BN	unknown	17.5	940/2145 Natural/Isotop. pure	-
Diamond	2.3 (e ⁻) 1.4 (h ⁺)	13.0	2290/3450 Natural/Isotop. pure	47.6 (e ⁻) 29.0 (h ⁺)

图 1 微米级退火示意图

相关研究发表在《Advanced Electronic Materials》, 2018, 4 (1): 1600501-1600501, DOI: 10.1002/aelm.201600501, 题目: “Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges”。

沈湘摘译自

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aelm.201600501>

AlGaIn 光子学:材料和紫外器件的最新进展

基于 AlGaIn 的材料具有直接的跃迁能带和宽的带隙, 因此可用于高效紫外 (UV) 发射器和探测器。在过去的二十年里, 基于 AlGaIn 的材料和设备经历了快速发展。深紫外 AlGaIn 发光二极管 (LED) 的效率提高了 20.3% (275 nm)。制备出了 238 nm、输出功率 100 毫瓦、功率转换效率 40% 的电子束抽运 AlGaIn 紫外光源。利用室温下的电抽运, 从 AlGaIn 多量子阱激光二极管 (LD) 中获得了 336 纳米波长的紫外受激辐射。与基于 GaN 的蓝、绿发光二极管和发光二极管相比, 基于 AlGaIn 的紫外发光二极管和发光二极管的效率较低。为了实现高性能器件, 需要在结构和制造方面进行进一步的优化和改进。在基于 AlGaIn 的紫外光电探测器 (PDS) 中, 利用分离的吸收和倍增区雪崩光电二极管结构已经报道了高达 10⁴ 个数量级的增益, 但仍距离探测到微弱信号很远, 因此具有高探测能力的紫外单光子探测器具有挑战性。近年来, 在基于 AlGaIn 和 AlGaIn 的无源器件 (如波导和谐振器) 的非线性光学特性方面有着广泛的研究。然而, 如何将散射和缺陷相关的吸收降到最低还需要进一步研究。

中国科学院长春光机所和美国罗切斯特大学的研究人员合作, 综述报道了 AlGaIn 光子学材料和紫外器件的最新进展。文中首先介绍了 AlGaIn 外延层的生长方法和 p 型掺杂方法。其次, 介绍了基于 AlGaIn 的紫外发光二极管、电子束泵浦光源、发光二极管、光密度传感器、无源器件以及非线性光学特性的研究

进展。最后，概述了基于 AlGa_N 材料和紫外线器件的未来发展趋势。

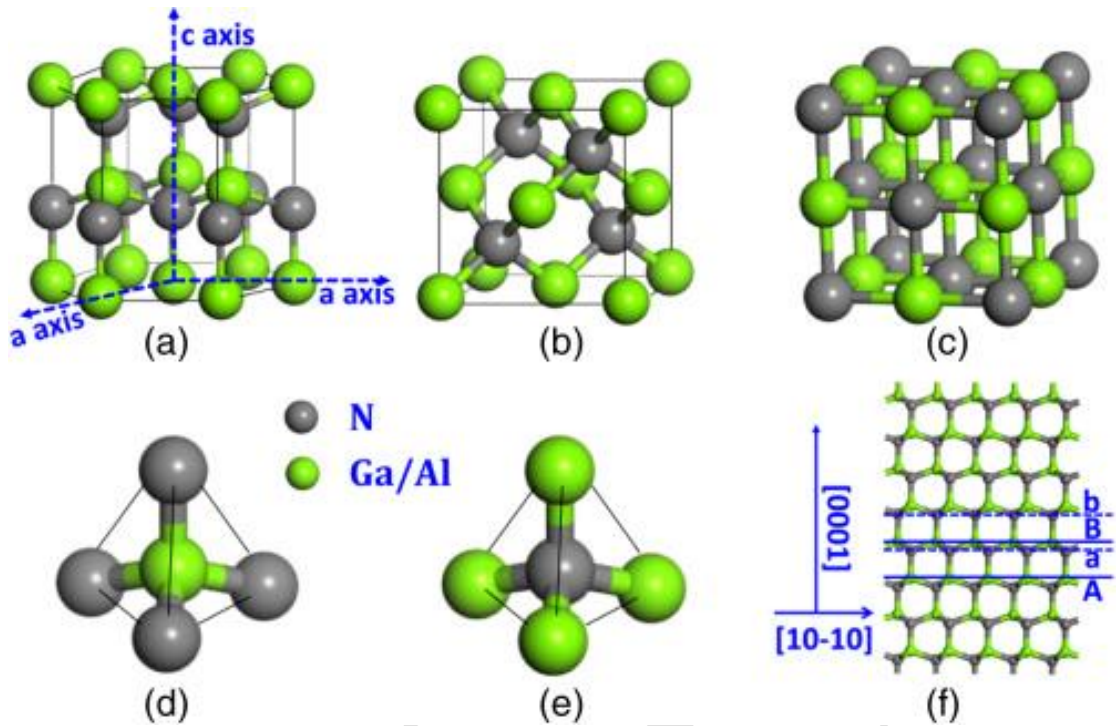


图 1 (a) 纤锌矿结构, (b) 闪锌矿结构, (c) 阿尔冈岩盐结构。(d) 金属原子位于规则四面体的中心, 四个氮原子位于相应的顶点。(e) 氮原子位于规则四面体的中心, 四个金属原子位于相应的顶点。(f) 沿[0001]方向的原子排列。

相关研究发表在《Advances In Optics And Photonics》, 2018, 10 (1): 43-110, DOI: 10.1364/AOP.10.000043, 题目: “AlGa_N photonics: recent advances in materials and ultraviolet devices”。

沈湘摘译自

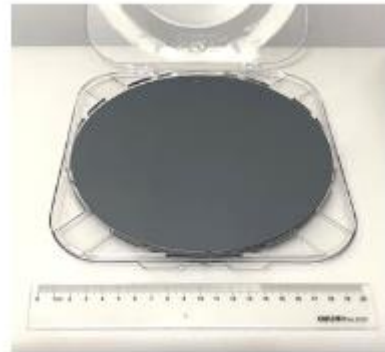
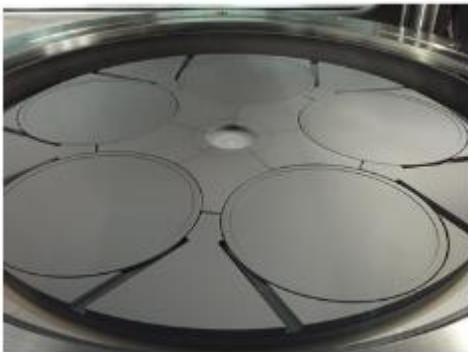
<https://www.osapublishing.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-10-1-43&id=380798>

应用实施

聚能晶源成功研制“8 英寸硅基氮化镓外延晶圆”

近日，耐威科技控股子公司聚能晶源(青岛)半导体材料有限公司(以下简称“聚能晶源”)成功研制“8 英寸硅基氮化镓(GaN-on-Si)外延晶圆”。

聚能晶源先后攻克了 GaN 与 Si 材料之间晶格失配、大尺寸外延应力控制、高耐压 GaN 外延生长等技术难关，成功研制了达到全球业界领先水平的 8 英寸硅基氮化镓(GaN-on-Si)外延晶圆。该型外延晶圆在实现了 650V/700V 高耐压能力的同时，保持了外延材料的高晶体质量、高均匀性与高可靠性，可以完全满足产业界中高压功率电子器件的应用需求。聚能晶源 8 英寸硅基氮化镓(GaN-on-Si)外延生长腔体及外延晶圆实物图如下：



“8 英寸硅基氮化镓(GaN-on-Si)外延晶圆”的研制成功，使得聚能晶源成为截至目前公司已知全球范围内领先的可提供具备长时可靠性的 8 英寸 GaN 外延晶圆的生产企业，且在采用国际业界严苛判据标准的情况下，聚能晶源研制的外延晶圆在材料、机械、电学、耐压、耐高温、寿命等方面具有性能优势，能够保障相关材料与技术在 5G 通讯、云计算、快充电源、无线充电等领域得到安全可靠的应用。

与第二代半导体硅(Si)、砷化镓(GaAs)等材料相比，第三代半导体材料氮化镓(GaN)具有更大的禁带宽度($> 3 \text{ eV}$)，一般也被称为宽禁带半导体材料。得益

于禁带宽度的优势，GaN 材料在击穿电场、本征载流子浓度、抗辐照能力方面都明显优于 Si、GaAs 等传统半导体材料。此外，GaN 材料在载流子迁移率、饱和载流子浓度等方面也较 Si 更为优异，因此适用于制作具有高功率密度、高速度、高效率的功率与微波电子器件，在 5G 通讯、云计算、快充电源、无线充电等领域具有广泛的应用前景。

与此同时，将 GaN 外延生长在硅衬底之上，可以有效地结合 GaN 材料的高性能以及成熟 Si 晶圆的大尺寸、低成本优势。基于先进的 GaN-on-Si 技术，可以在实现高性能 GaN 器件的同时将器件制造成本控制在与传统 Si 基器件相当的程度。因此，GaN-on-Si 技术也被业界认为是新型功率与微波电子器件的主流技术。

邹丽雪选摘自

http://www.navgnss.com/news_detail/newsId=138.html

Sanan IC 公布商业版本的 6 英寸碳化硅晶圆制造流程

桑尼维尔市，加利福尼亚州，SANAN INTEGRATED CIRCUIT CO., LTD. (Sanan IC)，是一家拥有先进化合物半导体技术平台的晶圆制造专营公司，近日宣布已完成了商业版本的 6 英寸碳化硅（SiC）晶圆制造技术的全部工艺鉴定试验，并将其加入到代工服务组合中。Sanan IC 致力于提供先进的材料制造能力，以服务全球市场，公司目前生产的碳化硅晶圆，是用于电力电子中电路设计的最成熟的宽禁带（WBG）半导体。利用其 III-V 族化合物半导体制造供应链保证能力，即砷化镓（GaAs）、氮化镓（GaN）和磷化铟（InP），公司为 6 英寸碳化硅晶圆加工服务提供了专用能力。

Sanan IC 的碳化硅工艺技术可以为 650V、1200V 和更高额定肖特基势垒二极管（SBD）提供器件结构，不久后会推出针对 900V、1200V 和更高额定肖特

基势垒二极管的碳化硅 MOS 场效应晶体管工艺 (SiC MOSFETs)。由于具有更高的性能, SiC SBDs 和 SiC MOSFETs 正在用于从 650V 开始的能量转换应用。考虑到相比于硅, 碳化硅拥有更高的效率、功率密度、开关频率、温度、击穿强度、以及更紧凑和更轻的系统设计的优良性能, 一些领域已经开始应用这项技术。

碳化硅技术的应用已加速进入商业和工业市场, 比如太阳能发电厂、工业马达驱动器、企业服务器和蜂窝基站电源的功率因数校正 (PFC)。在电动汽车 (EV) 和混合动力汽车 (HEV) 中, 碳化硅被广泛应用于车载充电器 (OBC)、动力传动系统逆变器和 DC/DC 变流器。根据 Yole 集团旗下在科技市场调研公司中处于领先地位的 Yole Développement (Yole) 的预测, 到 2023 年, 碳化硅电力半导体器件市场的价值将超过 15 亿美元, 其 2017 年到 2023 年的复合年增长率 (CAGR) 将达到 31%。Sanan IC 有望满足客户对质量, 体积, 坡道和可靠性的要求。

邹丽雪选摘自

<http://www.sanan-ic.com/management.php?t=10>

英飞凌推出可量产的氮化镓解决方案

近日, 英飞凌科技股份有限公司推出了氮化镓 (GaN) 解决方案 CoolGaN™ 600 V 增强型 HEMT 和氮化镓开关管专用驱动 IC (GaN EiceDRIVER™ IC)。据悉, 英飞凌产品的优越性包括: 它们具备更高功率密度, 可实现更加小巧、轻便的设计, 从而降低系统总成本和运行成本, 以及减少资本支出。

随着 CoolGaN 600 V 增强型 HEMT 和 GaN EiceDRIVER 栅极驱动 IC 的推出, 目前, 英飞凌是市场上唯一一家提供涵盖硅 (Si)、碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等材料的全系列功率产品的公司。最新发布的 CoolGaN 600 V 增强

型 HEMT 采用可靠的常闭概念，它经专门优化，可实现快速开通和关断。它们可在开关模式电源（SMPS）中实现高能效和高功率密度，其优值系数（FOM）在当前市场上的所有 600 V 器件中首屈一指。



CoolGaN 开关的栅极电荷极低，且具有极少输出电容，可在反向导通状态下提供优异的动态性能，进而大幅提高工作频率，从而通过缩小被动元器件的总体尺寸，提高功率密度。英飞凌 CoolGaN 600 V 增强型 HEMT 在功率因数校正（PFC）变流器里具有超高的能效（2.5 kW PFC 能效 > 99.3%）。相同能效下的功率密度可达到 160 W /in³（3.6 kW LLC 能效 > 98%）。在谐振拓扑中，CoolGaN 线性输出电容可将死区时间缩短至八分之一到十分之一。

CoolGaN 拥有行业领先的可靠性。在质量控制过程中，该公司对器件本身进行全面测试，而且对其在应用环境中的性能进行全面测试。这确保了 CoolGaN 开关满足甚至优于最高质量标准。CoolGaN 600 V 增强型 HEMT 可提供 70 m 和 190 m 的 SMD 封装，确保杰出的散热性能和低寄生效应。通过提供全系列 SMD 封装产品，英飞凌旨在支持高频运行的应用，如企业级超大规模数据中心服务器、通信整流器、适配器、充电器、SMPS 和无线充电设施等。氮化镓开关管专用驱动 IC（GaN EiceDRIVER IC）。

英飞凌新推出的氮化镓开关管 驱动芯片 EiceDRIVERIC——1EDF5673K、1EDF5673F 和 1EDS5663H——是 CoolGaN 增强型 HEMT 的完美搭档。它们经专门研发，以确保 CoolGaN 开关实现强健且高效的运行，同时最大限度地减少工程师研发工作量，加快将产品推向市场。不同于传统功率 MOSFET 的栅极驱动 IC，这个针对英飞凌 CoolGaN 量身定制的栅极驱动 IC 可提供负输出电压，以快速关断氮化镓开关。在开关应处于关闭状态的整个持续时间内，GaNEiceDRIVER IC 可以使栅极电压稳定保持为零。这可保护氮化镓开关不受噪音导致误接通的影响，哪怕是首脉冲，这对于 SMPS 实现强健运行至关重要。氮化镓栅极驱动 IC 可实现恒定的 GaNHEMT 开关转换速率，几乎不受工作循环或开关速度影响。这可确保运行稳健性和很高能效，大大缩短研发周期。它集成了电隔离，可在硬开关和软开关应用中实现强健运行，还可在 SMPS 一次侧和二次侧之间提供保护，并可根据需要在功率级与逻辑级之间提供保护。据了解，GaN EiceDRIVER 1EDF5673K 采用 13 引脚 LGA 5x5 mm 封装，1EDF5673F 采用 16 引脚 DSO 150 mil 封装，1EDS5663H 采用 16 引脚 DSO 300 mil 封装。供货全新 CoolGaN 600 V 增强型 HEMT 现已开始供货，硅基 GaN EiceDRIVER IC 可供预订。

邹丽雪选摘自

<https://www.infineon.com/cms/cn/about-infineon/press/market-news/2018/INFPMM201811-014.html>

贸泽开售 TI LMG3410R070 GaN 功率级产品

商贸泽电子 (Mouser Electronics) 即日起备货 Texas Instruments (TI) 的 LMG3410R070 600 V 70 mΩ 氮化镓 (GaN) 功率级产品。LMG3410R070 具有超低的输入和输出电容，支持高功率密度电动机应用的新要求，适合的应用包括

工业级和消费级电源。此款高性能 GaN 功率级产品支持的电流、温度、电压和开关频率比硅晶体管更高，同时还可减少高达 80% 的开关损耗。

贸泽电子供应的 TI LMG3410R070 GaN 功率级产品集成有栅极驱动器和稳定可靠的保护功能，可提供比硅 MOSFET 和绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 更出色的性能。该器件具有零共源极电感、25 至 100 V/ns 可由用户调整的压摆率以及适合兆赫级作业的 20 ns 传播延迟。这款稳定可靠的 IC 提供过电流保护，支持超过 150 V/ns 压摆率的抗扰性、过热保护以及瞬态过电压抗扰性，且所有供电轨皆具备过电压锁定保护功能。LMG3410R070 功率级产品采用尺寸小巧的 8 mm × 8 mm QFN 封装，无需外部保护元件，有助于简化设计和布局流程。功能强大的 LMG3410R070 很适合搭配 KEMET Electronics 的 KC-LINK 表面贴装电容器使用。KC-LINK 电容器经过特别设计，具有极低的有效串联电阻和热阻，可帮助装置承受高频率、高电压 DC 链路应用的应力，从而满足 TI LMG3410R070 IC 等快速开关半导体的需求。

TI LMG3410R070 功率级产品提供优异的功率密度，有助于实现 totem-pole PFC 之类的高效拓扑，帮助电源缩小高达 50% 的尺寸。LMG3410R070 IC 适合的应用包括多级转换器、太阳能逆变器、高电压电池充电器和不间断电源。

邹丽雪选摘自

http://www.mouser.cn/publicrelations_ti_lmg3410r070_2018final-sc/

比亚迪发布 IGBT 4.0，将推搭载 SiC 电控电动车

12 月 10 日，比亚迪在宁波发布了在车规级领域具有标杆性意义的 IGBT4.0 技术，再一次展示出其在电动车领域的领先地位。

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 全称“绝缘栅双极型晶体管”，其芯片与动力电池电芯并称为电动车的“双芯”，是影响电动车性能的关键技术，

其成本占整车成本的 5%左右。对于电动车而言，IGBT 直接控制驱动系统直、交流电的转换，决定了车辆的扭矩和最大输出功率等。得益于在 IGBT 等核心技术领域的强大实力，比亚迪电动车的超凡性能得以落地并具备持续迭代升级的能力。

作为中国第一家实现车规级 IGBT 大规模量产、也是唯一一家拥有 IGBT 完整产业链的车企，此次发布会上，比亚迪还释放了另一重磅消息：比亚迪已投入巨资布局性能更加优异的第三代半导体材料 SiC（碳化硅），有望于 2019 年推出搭载 SiC 电控的电动车。预计到 2023 年，比亚迪旗下的电动车将全面搭载 SiC 电控。

IGBT 属于汽车功率半导体的一种，因设计门槛高、制造技术难、投资大，被业内称为电动车核心技术的“珠穆拉玛峰”。此前，该技术主要掌握在国际巨头手中。制造 IGBT 难度极大，在大规模应用的 1200V 车规级 IGBT 芯片的晶圆厚度上，比亚迪处于全球先进水平，可将晶圆厚度减薄到 120um（约两根头发丝直径）。虽然在未来较长一段时间内，IGBT 仍将供不应求。但比亚迪也已预见，随着电动车性能不断地提升，对功率半导体组件提出了更高的要求，当下的 IGBT 也将逼近硅材料的性能极限。寻求更低芯片损耗、更强电流输出能力、更耐高温的全新半导体材料，已成为学界和业界的普遍共识。

据悉，比亚迪已投入巨资布局第三代半导体材料 SiC，并将整合材料（高纯碳化硅粉）、单晶、外延、芯片、封装等 SiC 基半导体全产业链，致力于降低 SiC 器件的制造成本，加快其在电动车领域的应用。此次发布会上，比亚迪宣布，已经成功研发了 SiC MOSFET（汽车功率半导体包括基于硅或碳化硅等材料打造的 IGBT 或 MOSFET 等），有望于 2019 年推出搭载 SiC 电控的电动车。预计到 2023 年，比亚迪将在旗下的电动车中，实现 SiC 基车用功率半导体对硅基 IGBT 的全面替代，将整车性能在现有基础上再提升 10%。

邹丽雪选摘自

<http://www.bydauto.com.cn/news-id-2927.html>

《第三代半导体技术信息简报》是由中国科学院文献情报中心情报分析与知识产品研发中心承担编辑的集成电路、微电子相关领域科技信息综合报道及专题分析简报（双月报），于2014年3月正式启动，2014年为季度发行的《光刻技术信息简报》，2015年3月改版为《集微技术信息简报》双月发行（2015年12月起改为双月月月底发布），2017年起卷名为《第三代半导体技术信息简报》。按照“统筹规划、系统布局、分工负责、整体集成、长期积累、深度分析、协同服务、支撑科研”的发展思路，规划和部署《第三代半导体技术信息简报》。

《第三代半导体技术信息简报》服务对象是集成电路、微电子领域的相关领导、科技战略研究专家和科研一线工作者。《第三代半导体技术信息简报》内容力图兼顾科技决策和管理者、科技战略专家和领域科学家的信息需求，报道集成电路、微电子领域（目前卷期聚焦第三代半导体领域）的国际科技战略与规划、科技计划与预算、科技进展与动态、科技前沿与热点、重大科技研发与应用、重要科技政策与管理等方面的最新进展与发展动态，不定期提供集成电路、微电子领域热点方向的专题分析。

《第三代半导体技术信息简报》是内部资料，不公开出版发行；除了其所报道的专题分析报告代表相应作者的观点外，其所刊载报道的中文翻译信息、汇编信息等并不代表编译者及其所在单位的观点。

NSTL 第三代半导体材料专项情报服务团队

执笔人：王丽 沈湘 邹丽雪 于杰平

联系人：王丽

电话：010-82626611-6649

电子邮件：wangli@mail.las.ac.cn

