

三代半导体机遇挑战并存，东风渐起

研究要点

- 和第一代、第二代半导体材料相比，第三代半导体材料具有高热导率、高击穿场强、高饱和电子漂移速率和高键合能等优点，可以满足现代电子技术对高温、高功率、高压、高频以及抗辐射等恶劣条件的要求，是半导体材料领域有前景的材料。
- 三代半导体产业链与传统半导体的产业链环节基本类同，包括上游的材料（衬底和外延）、中游的器件和模组、下游的系统和应用。化合物半导体与硅半导体制程最大差别在于外延生长过程比较复杂，需要经过基板厂商和外延厂商两道环节。

目前氮化铝产品主要以粉体及陶瓷为主；氮化铝晶体由于制备难度较大，尚未达到工业生产的成熟度，可见的晶圆尺寸尚不到 2 英寸，且以薄膜产品为主。AlN 陶瓷片主要用于大功率半导体集成电路和大功率的厚膜电路，AlN 薄膜主要用于薄膜器件的介质和耐磨、耐热、散热好的材料表面镀层。

- 参照 Yole 和 HIS MarKit 的数据，2018 年 SiC 电力电子器件市场规模约 3.9 亿美元，GaN 电力电子器件市场约 0.5 亿美元，合计 4.4 亿美元，占整体电力电子器件市场规模的比例达到 3.4%。据 Yole 统计，2018 年全球 3W 以上 GaN 射频器件市场规模达到 4.57 亿美元，在射频器件市场（包含 Si LDMOS，GaAs 和 GaN）的渗透率超过 25%。预计到 2023 年市场规模达到 13.24 亿美元，年复合增长率超过 23%。
- 根据 CASA 统计，2018 年中国市场 SiC、GaN 电力电子器件的市场规模约为 28 亿元，同比增长 56%，预计未来五年复合增速 38%，到 2023 年 SiC、GaN 电力电子器件的市场规模将达到 148 亿元。2018 年，中国三代半导体微波射频电子市场规模约 24.5 亿元，较 2017 年同比增长 103%。国内应用中，进口产品的占有率仍然超过 90%，市场继续被国际电力电子器件巨头公司 Cree、Rohm、Infeneon、Macom 等产品占有，进口替代问题仍急需突破。
- 三代半导体领域的创业企业必然较少，少数创业企业能坚持下来得益于地方政府的长期支持和背书。对于股权投资机构而言，尤其是追求短期财务回报的机构，三代半导体产业现阶段仍不适宜介入；具备深厚产业背景的产业投资更适宜三代半导体领域相关投资。



基石基金投资部

苗旺春

电话：010-60190398-885

电子邮件：mwc@bjjsfund.com.cn

相关研究

1. 第三代半导体产业技术创新战略联盟
2. 半导体行业观察
3. 深圳第三代半导体研究院
4. 《太平洋证券-专题：进击的 SiC：宽禁带半导体研究之一》
5. 《安信证券-下一代半导体材料，5G 助力市场成长》

目录

一、三代半导体材料简介	4
二、三代半导体发展历程及属性介绍	4
2.1 半导体材料发展历程	4
2.2 半导体材料性能比较	6
三、三代半导体相关产业链及市场状况	7
3.1 三代半导体产业链	7
3.1.1 衬底	8
3.1.2 外延	9
3.1.3 器件及模组应用	11
3.1.4 氮化镓、碳化硅产业链国内外现状	12
3.2 氮化铝 (AlN) 产业链	15
3.2.1 氮化铝粉末制备	15
3.2.2 氮化铝坯体成型主要工艺	16
3.2.3 氮化铝陶瓷的烧结工艺	17
3.2.4 氮化铝国内发展现状	17
3.3 三代半导体国内外主要厂商及最新动态	18
3.3.1 氮化镓领域	18
3.3.2 碳化硅领域	20
3.4 三代半导体市场规模及增速	22
3.4.1 三代半导体电力电子市场规模	22
3.4.2 氮化镓的射频器件市场状况	23
3.4.3 三代半导体国内市场状况	23
四、三代半导体国内相关政策梳理	24
五、国内三代半导体产业发展机遇与挑战	25
5.1 机遇	25
5.2 挑战	26
六、三代半导体投资建议	27

图表 2-1	一、二、三代半导体概览	4
图表 2-2	单晶硅片（左）与单晶锗片（右）	5
图表 2-3	砷化镓晶片	5
图表 2-4	半导体产业发展断代图	6
图表 2-5	碳化硅晶圆（左）、氮化镓晶圆（中）及氮化铝陶瓷（右）	6
图表 2-6	不同半导体材料性能比较	7
图表 2-7	碳化硅、氮化镓的性能优势	7
图表 2-8	化合物半导体产业链	8
图表 2-9	三代半导体衬底制备流程	8
图表 2-10	HVPE 系统示意图	9
图表 2-11	MBE 系统示意图	10
图表 2-12	MOCVD 系统示意图	10
图表 2-13	GaN 外延生长常用方法示意图	11
图表 2-14	GaN 半导体器件类别及应用	11
图表 2-15	碳化硅电力电子器件分类	12
图表 2-16	国内氮化镓产业链主要企业	14
图表 2-17	氮化铝晶体结构及晶须形态	15
图表 2-18	氮化铝陶瓷基板性能优势	15

一、三代半导体材料简介

所谓三代半导体，主要指以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）等宽禁带化合物（禁带宽度在 2.2eV 以上）为代表的半导体材料。第二代半导体与第三代半导体的主要区别在于禁带宽度带来的电学性能的不同，都属于化合物半导体，而第一代半导体主要是以硅（Si）、锗（Ge）为代表的元素半导体。

本文将主要对三代半导体中的碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）及氮化铝（AlN）为代表进行介绍。

半导体材料		带隙 (eV)	熔点 (K)	主要应用
第一代半导体材料	锗 Ge	1.1	1221	低压、低频、中功率晶体管、光电探测器
	硅 Si	0.7	1687	
第二代半导体材料	砷化镓 GaAs	1.4	1511	微波、毫米波器件、发光器件
第三代半导体材料	碳化硅 SiC	3.05	2826	1. 高温、高频、抗辐射、大功率器件； 2. 蓝、绿、紫发光二极管、半导体激光器
	氮化镓 GaN	3.4	1973	
	氮化铝 AlN	6.2	2470	
	金刚石 C	5.5	大于 3800	
	氧化锌 ZnO	3.37	2248	

图表 2-1 一、二、三代半导体概览

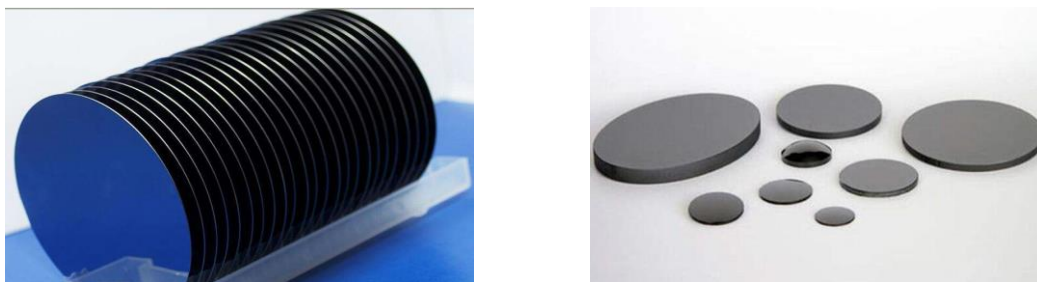
二、三代半导体发展历程及属性介绍

2.1 半导体材料发展历程

第一代半导体是“元素半导体”，典型如硅基和锗基半导体。其中以硅基半导体技术较成熟，应用也较广，一般用硅基半导体来代替元素半导体的名称。甚至于目前，全球 95% 以上的半导体芯片和器件是用硅片作为基础功能材料而生产出来的。

以硅材料为代表的第三代半导体材料，它取代了笨重的电子管，导致了以集成电路为核心的微电子工业的发展和整个 IT 产业的飞跃，广泛应用于信息处理和自动控制等领域。

但是在 20 世纪 50 年代，半导体中占主导地位是锗，主要应用于低压、低频、中功率晶体管以及光电探测器中，但是锗基半导体器件的耐高温和抗辐射性能较差，到 60 年代后期逐渐被硅基器件取代。用硅材料制造的半导体器件，耐高温和抗辐射性能较好。



图表 2-2 单晶硅片（左）与单晶锗片（右）

20 世纪 90 年代以来，随着移动通信的飞速发展、以光纤通信为基础的信息高速公路和互联网的兴起，以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)为代表的第二代半导体材料开始崭露头脚。

第二代半导体材料是化合物半导体。化合物半导体是以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)和氮化镓(GaN)等为代表，包括许多其它 III-V 族化合物半导体。这些化合物中，商业半导体器件中用得最多的是砷化镓(GaAs)和磷砷化镓(GaAsP)，磷化铟(InP)，砷铝化镓(GaAlAs)和磷镓化铟(InGaP)。其中以砷化镓技术较成熟，应用也较广。

GaAs、InP 等材料适用于制作高速、高频、大功率以及发光电子器件，是制作高性能微波、毫米波器件及发光器件的优良材料，广泛应用于卫星通讯、移动通讯、光通信、GPS 导航等领域。但是 GaAs、InP 材料资源稀缺，价格昂贵，并且还有毒性，能污染环境，InP 甚至被认为是可疑致癌物质，这些缺点使得第二代半导体材料的应用具有很大的局限性。



图表 2-3 砷化镓晶片

近年来，电子器件的使用条件越来越恶劣，要适应高频、大功率、耐高温、抗辐照等特殊环境。为了满足未来电子器件需求，必须采用新的材料，以便最大限度地提高电子元器件的内在性能，第三代半导体材料凭借其优越的性能，成为全球半导体产业界的焦点。

和第一代、第二代半导体材料相比，第三代半导体材料具有高热导率、高击穿场强、高饱和电子漂移速率和高键合能等优点，可以满足现代电子技术对高温、高功率、高压、高频以及抗辐射等恶劣条件的新要求，是半导体材料领域有前景的材料。

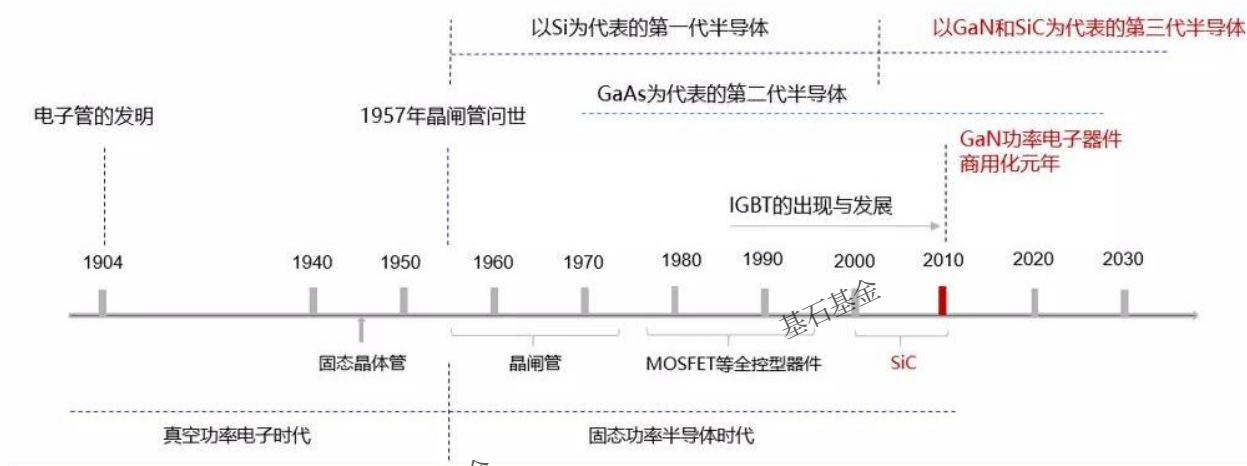


图 表 2-4 半导体产业发展断代图

从目前宽禁带半导体材料和器件的研究情况来看，研究重点多集中于碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)技术，其中 SiC 技术最为成熟，研究进展也较快；而 GaN 技术应用广泛，尤其在光电器件应用方面研究比较深入。氮化铝、金刚石、氧化锌等宽禁带半导体技术研究报告较少，但从其材料优越性来看，颇具发展潜力。

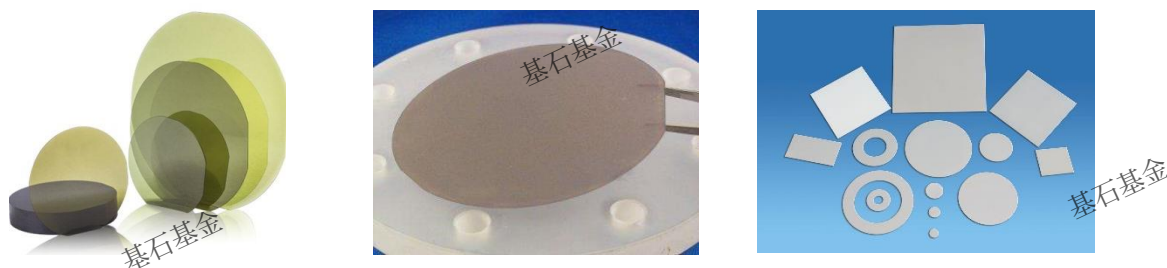


图 表 2-5 碳化硅晶圆（左）、氮化镓晶圆（中）及氮化铝陶瓷（右）

2.2 半导体材料性能比较

化合物半导体不同于硅半导体的性质主要有二：

一是化合物半导体的电子迁移率较硅半导体快许多，因此适用于高频传输，在无线电通讯如手机、基地台、无线区域网络、卫星通讯、卫星定位等皆有应用；

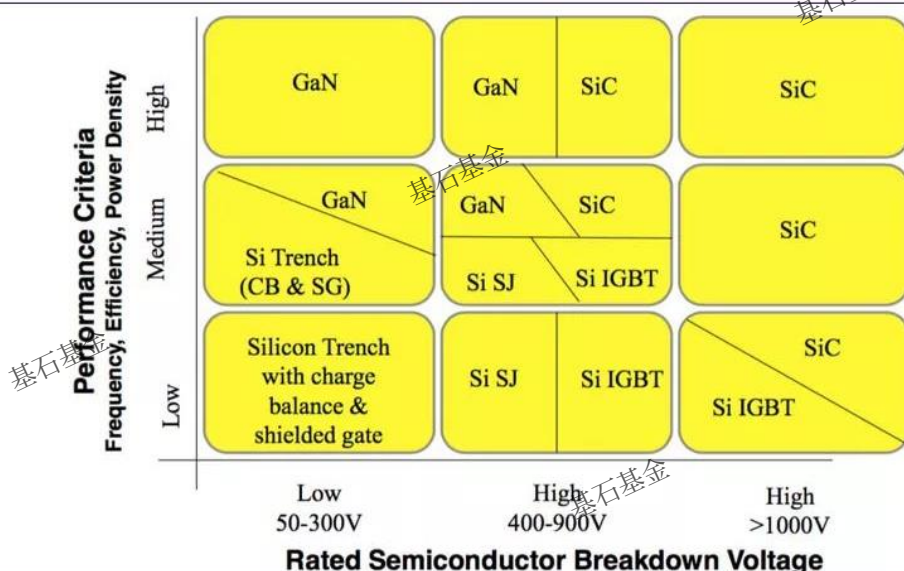
二是化合物半导体具有直接带隙，这是和硅半导体所不同的，因此化合物半导体可适用发光领域，如发光二极管(LED)、激光二极管(LD)、光接收器(PIN)及太阳能电池等产品。可用于制造超高速集成电路、微波器件、激光器、光电以及抗辐射、耐高温等器件，对国防、航天和高技术研究具有重要意义。

	材料	硅	砷化镓	氮化镓
物理性质	禁带宽度 (eV)	1.1	1.4	3.4
	饱和速率 ($\times 10^{-7}$ cm/s)	1.0	2.1	2.7
	热导 (W/c · K)	1.3	0.6	2.0
	击穿电压 (M/cm)	0.3	0.4	5.0

	电子迁移速率 ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	1350	8500	900
应用情况	光学应用	无	红外	蓝光/紫外
	高频性能	差	好	好
	高温性能	中	差	好
	发展阶段	成熟	发展中	初期
	制造成本	低	高	高

图表 2-6 不同半导体材料性能比较

此外，不同化合物半导体自身物理特性的不同，导致其电力电子性能存在差异，适宜应用于不同的器件及工作环境。比如，SiC 与 GaN 相比较，前者相对 GaN 发展更早一些，技术成熟度也更高一些；两者有一个很大的区别是热导率，这使得在高功率应用中，SiC 占据统治地位；同时由于 GaN 具有更高的电子迁移率，因而能够比 SiC 或 Si 具有更高的开关速度，在高频率应用领域，GaN 具备优势。



图表 2-7 碳化硅、氮化镓的性能优势

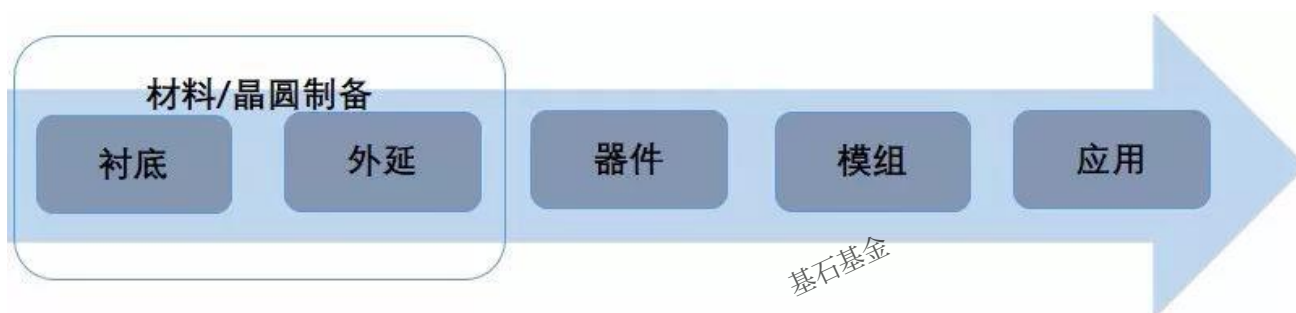
三、三代半导体相关产业链及市场状况

3.1 三代半导体产业链

三代半导体产业链与传统半导体的产业链环节基本类同，包括上游的材料（衬底和外延）、中游的器件和模组、下游的系统和应用。化合物半导体与硅半导体制程最大差别在于外延生长过程比较复杂，需要经过基板厂商和外延厂商两道环节。

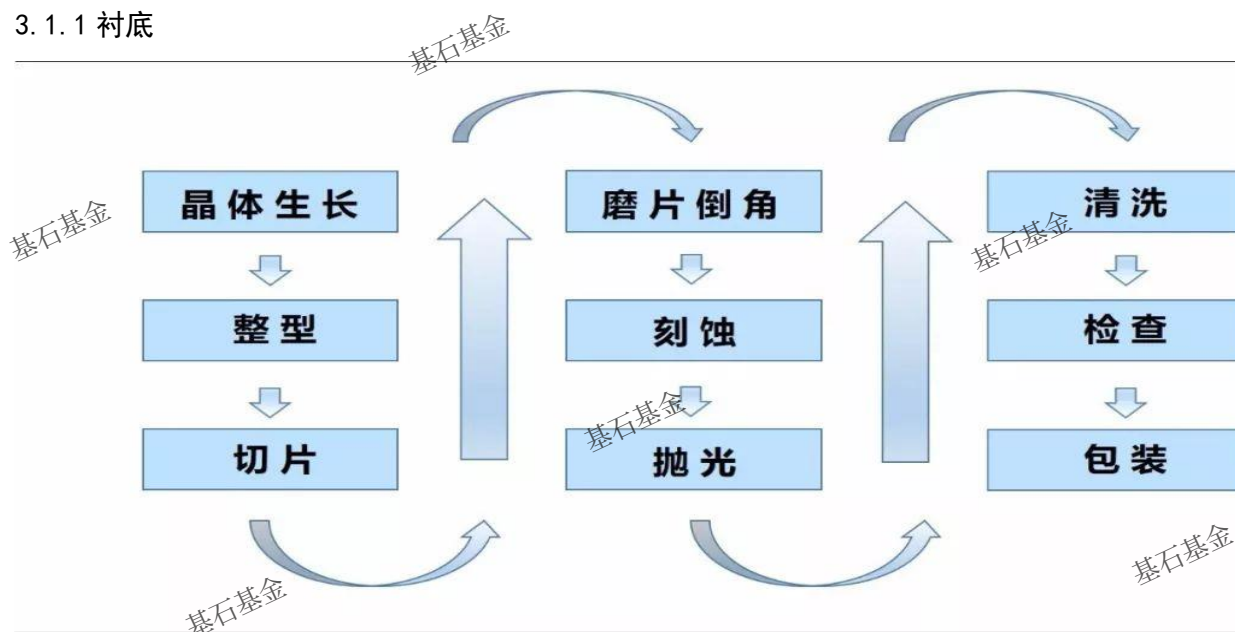
对于三代半导体材料，主要是晶圆制备，包括衬底制备和外延工艺两大环节。衬底是由半导体单晶材料制造而成的晶圆片，衬底可以直接进入晶圆制造环节生产半导体器件，也可以进行外延工艺加工生产外延片。外延是指在单晶衬底上生长一层新单晶的过程，新单晶可以与衬底为同一材料，也可以是不同材料。外

延可以生产种类更多的材料，使器件设计有更多选择。



图表 2-8 化合物半导体产业链

3.1.1 衬底



图表 2-9 三代半导体衬底制备流程

对于碳化硅、氮化镓，目前的衬底制备流程如图表 9 中所示。对于具体的应用而言，根据器件设计的性能指标，会有 SiC-On-SiC/GaN-On-SiC/GaN-On-GaN 等诸多衬底与外延的组合方式，衬底种类的不同会决定器件的散热性能及生产制造的加工难度。例如，对于 GaN 外延适配的衬底材料就存在以下几种：

(1) SiC 衬底

多数 GaN 射频器件的衬底都是 SiC，SiC 和 GaN 的晶格匹配度良好，而且 SiC 还有良好的高热导率的性能。因为 GaN 射频器件相对于其他的一些器件来说，其功率密度很高。要把产生的热量快速导出不是一件容易的事情，所以衬底和外面封装的材料同样至关重要。

(2) Si 衬底

Si 衬底有更低的价格，但同时热导率也比 SiC 低。Si 基 GaN 拥有的优势在于：可以在标准工艺上处理更大的晶圆，并且其 CMOS 生产线成本低廉。

不过，MACOM 公司有解决方法：其公布了一组数据，数据显示如果设计恰当，在应用上，Si 基 GaN 的性能是可以和 SiC 基 GaN 性能一样可靠的。但是，MACOM 公司并不提供代工服务，他们与 GCS 公司合作生产 Si 基 GaN 器件，但这一工艺并不开放给其他公司。

(3) 蓝宝石 (Al_2O_3) 衬底

通常, GaN 基材料和器件的外延层主要生长在蓝宝石衬底上。蓝宝石衬底有许多的优点: 首先, 蓝宝石衬底的生产技术成熟、器件质量较好; 其次, 蓝宝石的稳定性很好, 能够运营在高温正常过程中; 最后, 蓝宝石的机械强度高, 易于处理和清洗。

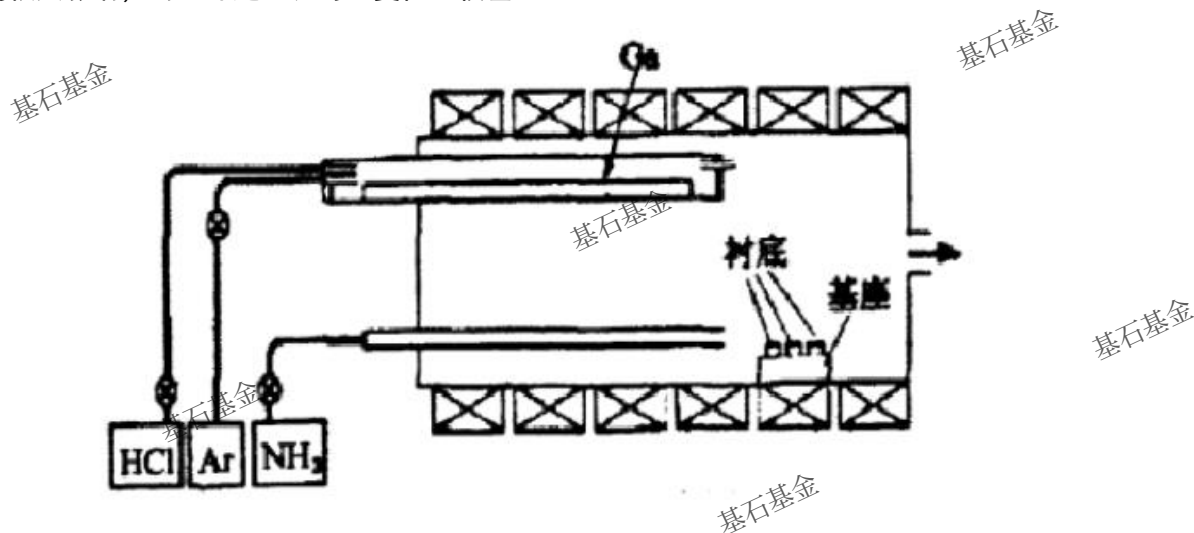
(4) GaN 衬底

氮化镓衬底作为同质衬底, 相对于蓝宝石、碳化硅等衬底的性能优势显而易见, 最大难题在于价格过高。

3.1.2 外延

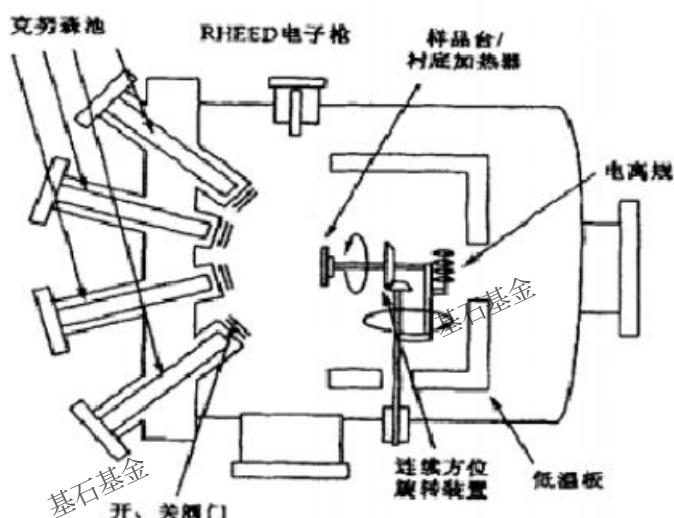
三代半导体的外延生长工艺, 由于化合物本身物理性质的不同, 目前成熟的工业化生产工艺对于不同物质存在差异, 比如氮化镓采用的技术为常规金属有机物气相沉积法 (包括 APMOCVD/LPMOCVD/等离子体增强 MOCVD 等)、分子束外延法 (MBE) 和氢化物气相外延法 (HVPE); 碳化硅主要采用物理气相传输法 (PVT)。

氢化物气相外延 (HVPE) 又称为卤化物气相外延 (Halide-VPE), 与金属有机物化学气相沉淀方法相比, 其工艺特点是操作简单, 氮化镓外延生长速率也较快, 但是这种方法生产的单晶质量较低。该工艺是目前国际上主流工艺。其工艺流程是先用 HVPE 设备在蓝宝石衬底上生长厚膜 GaN 单晶, 然后再通过激光剥离得到 GaN 自支撑衬底。HVPE 的缺点是 GaN 膜的厚度很难精确控制, 反应气体对设备腐蚀性很强, 会导致 GaN 材料的纯度受到很大影响, 而且外延生长的重复性比较差。



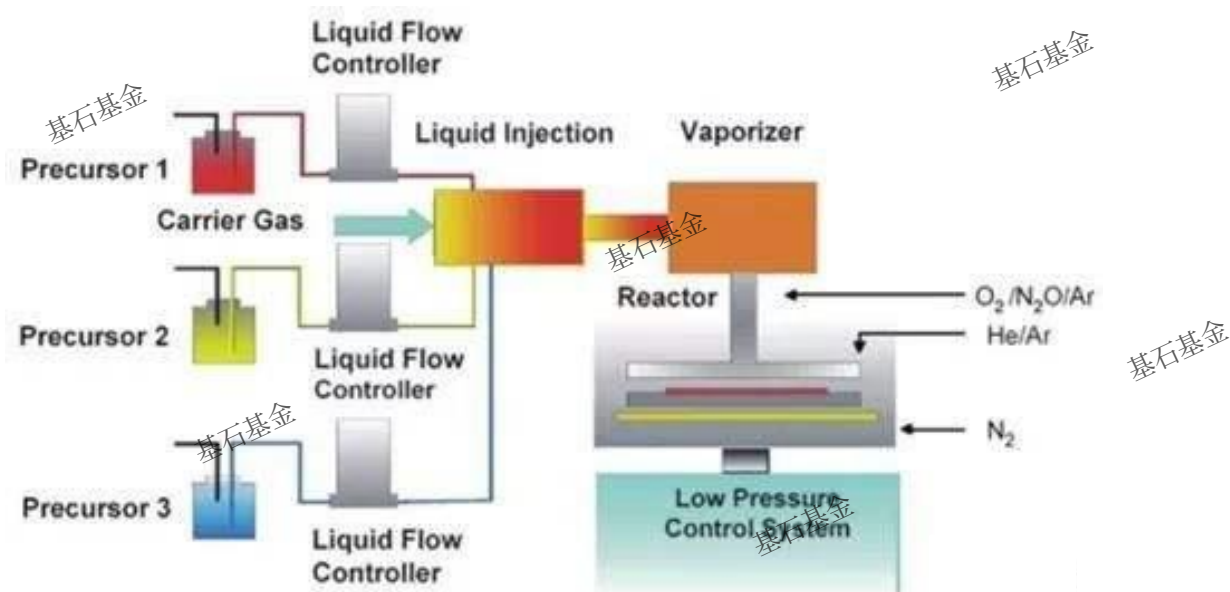
图表 2-10 HVPE 系统示意图

分子束外延 (MBE) 技术原理是: 在超真空条件下加热装有组分的喷射炉得到蒸汽, 经小孔准直后形成分子或原子束, 将其喷到基板上进行撞击, 使分子或原子排列在基板上, 进行外延生长。MBE 的生长速度很慢, 可以精确控制薄膜的厚度; 通过调整喷射炉的个数和装填物, 可以精确控制掺杂浓度和化学组成; 基板表面清洁, 有利于提高外延层生长质量。MBE 的缺点是对真空条件要求高, 耗费时间长, 成本较高。



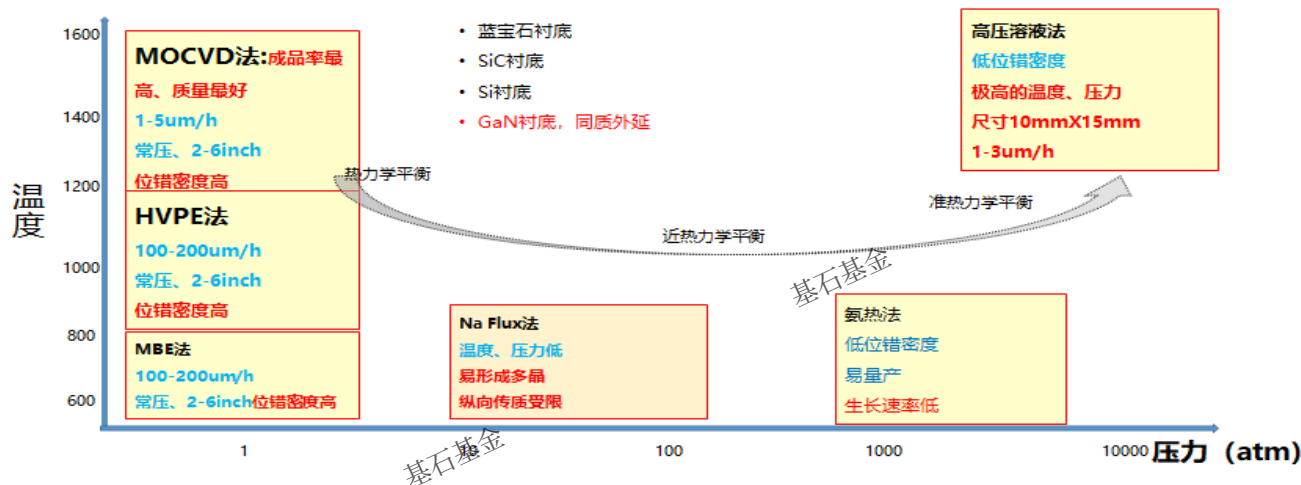
图表 2-11 MBE 系统示意图

金属有机物化学气相沉淀（MOCVD）系统一般包括反应源、反应腔、气体控制及混合系统、废气处理系统。反应源有两种，以三五族化合物为例，一种是Ⅲ族金属有机物（三甲基镓、三甲基铟等），一种是Ⅴ族氢化物（砷化氢、磷化氢等）。将反应源加热汽化，送入反应腔进行混合，在基板表面进行热分解反应和高温还原反应，生长出外延层。MOCVD 能精确控制生长厚度和掺杂成分，制备的外延层精度高、均匀性好，可以进行大规模生产，但是所有设备价格高，且许多反应源是有毒成分，对人体和环境存在潜在危害。



图表 2-12 MOCVD 系统示意图

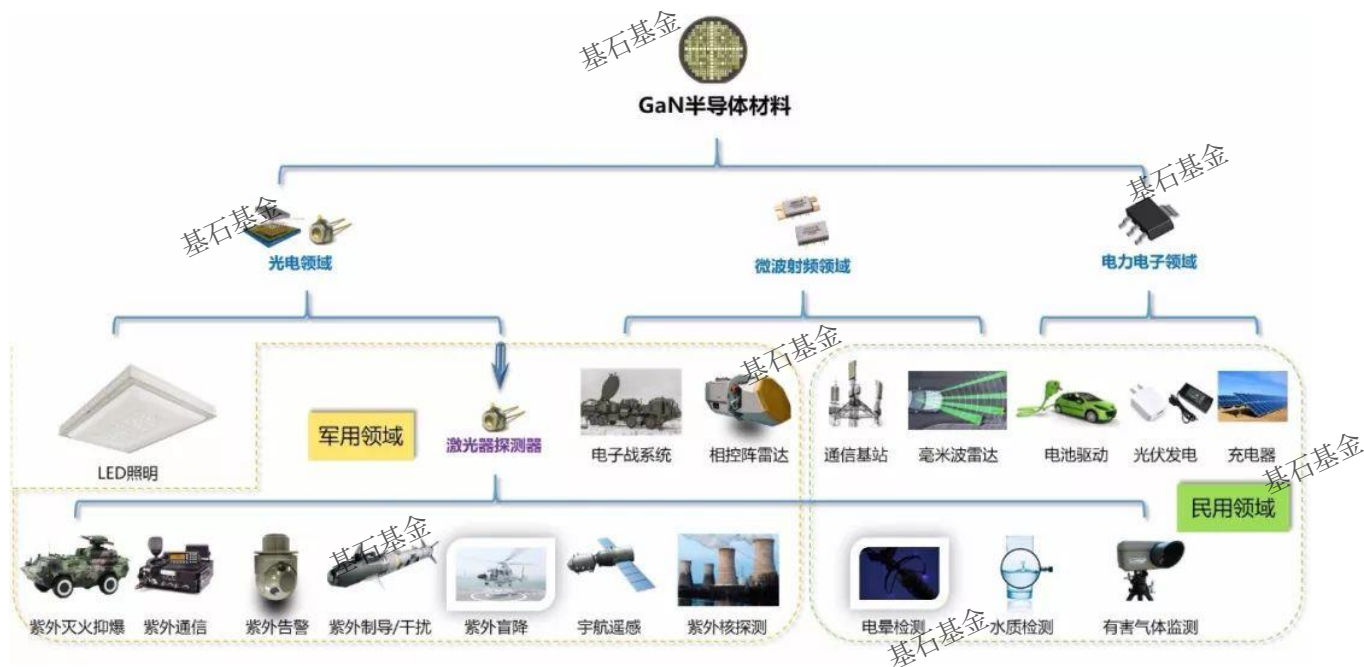
除了以上常用的方法外，还有其他一些方法，图 12 列示了 GaN 各种外延制作方法对于温度、压力等条件的要求：



图表 2-13 GaN 外延生长常用方法示意图

3.1.3 器件及模组应用

GaN 在微波射频器件、电力电子器件、光电器件方向应用前景广泛。包括白光 LED、短波长激光器、紫外探测器以及高温大功率器件、微波射频器件等，可用于军工雷达、探测器等，消费电子 PA、通信的基站建设、汽车功率器件、以及工业、太阳能发电、风电领域的控制器、逆变器等。



图表 2-14 GaN 半导体器件类别及应用

对于碳化硅而言，由于其耐腐蚀、高硬度和易碎等特点，使得其加工工艺难度较高。碳化硅电力电子器件主要包括功率二极管和三极管（晶体管、开关管）。



图表 2-15 碳化硅电力电子器件分类

SiC 功率器件应用领域按电压划分：

低压应用（600V-1.2kV）：高端消费领域（游戏控制台、等离子和液晶电视等）、商业应用领域（笔记本电脑、固态照明、电子镇流器等）以及其他（医疗、电信、国防等）。

中压应用（1.2kV-1.7kV）：电动汽车/混合动力汽车（EV/HEV）、太阳能光伏逆变器、不间断电源（UPS）以及工业电机驱动（交流驱动 AC Drive）等。

高压应用（2.5kV、3.3kV、4.5kV 和 6.5kV 以上）：风力发电、机车牵引、高压/特高压输变电等。

3.1.4 氮化镓、碳化硅产业链国内外现状

（1）氮化镓产业链国际国内现状

从 GaN 的应用领域来分，各国际厂商具有各自的优势。UVC 激光器方面，Nichia、Osram 走在了国际前列。UVC 探测器方面，韩国的 GenUV、日本的 Kyosemi 和德国的 Sgrux 是 UVC 探测器国际顶尖水平代表。UVC LED 方面，韩国的首尔半导体已具备国际顶尖水平，且已商业化。GaN HEMT 射频器件方面，美国的 Macom、Qorvo、Cree，代表当今国际顶尖水平。GaN HEMT 电力电子器件方面，德国的 Infineon 代表当今国际顶尖水平。

而目前的 GaN 衬底市场是重度集中的。超过 85% 的市场份额掌握在 3 家日本企业手中，它们分别是 Sumitomo Electric Industries（住友电工）、Mitsubishi Chemical Corporation（三菱化学）及 Sciocs 等。

主要的国际竞争厂商如下表所示：

企业名称	国家	产业领域	简介
Macom	美国	微波射频	MACOM 是一家高性能模拟射频、微波和光学半导体产品领域的领先供应商，在射频、微波、光电领域均享有很高知名度。
Qorvo	美国	射频功率器件	Qorvo 是 TriQuint 和 RFMD 合并而成，这两家公司都是 RF 领域的强者，却各有侧重，RFMD 在 PA 和开关领域，TriQuint 在滤波器和整合方面各具优势，几乎没有业务重叠。Qorvo 集中于三大市场：航空和国防、网络基础设施和移动设备。

Cree	美国	LED、射频功率	美国的 CREE 为全球 LED 外延、芯片、封装、LED 照明解决方案、化合物半导体材料、功率器件和射频于一体的著名制造商和行业领先者。
Skyworks	美国	射频功率	是世界上领先的专注于射频及无线半导体解决方案的公司，其 RF 与电源器件、RF 与 IC 设计及解决方案实力强。
住友电气工业株式会社	日本	微波射频器件	是最著名的通信厂商之一。一直以电线、电缆的制造技术为基础，通过独创性的研究开发和对新事业的不懈挑战，不断创造新产品和新技术，扩大事业领域。在 GaN 衬底材料、HEMT 器件领域等有很深造诣。
Mitsubishi Electric	日本	微波射频器件	日本三菱电机，世界领先的射频功率器件厂商。
Microsemi	美国	射频功率器件	世界领先的射频功率器件厂商，从射频，微波和毫米波集成电路，模块，单片微波集成电路（MMIC）等，凭借广泛的产品系列涵盖 DC 到 140GHz，新器件适用于国防，通信，仪器仪表，工业和航空航天等行业。
Infineon	美国	电力电子器件	英飞凌专注于迎接现代社会的三大科技挑战：高效能、移动性和安全性，为汽车和工业功率器件、芯片卡和安全应用提供半导体和系统解决方案。英飞凌的产品素以高可靠性、卓越质量和创新性著称，并在模拟和混合信号、射频、功率以及嵌入式控制装置领域掌握尖端技术。
EXAGAN	法国	电力电子器件	EXAGAN 致力于设计和生产基于氮化镓的电源开关功率晶体管，是一家在欧洲市场具有领先地位的法国公司
GaN Systems	加拿大	电力电子器件	全球氮化镓（GaN）功率半导体行业的领先企业。GaN Systems 使设计更小、更低成本、更高效率的电源转换系统成为可能
VisiC Technologies	以色列	电力电子器件	公司致力于为能源转换系统开发和销售基于氮化镓（GaN）的高效功率器件，2018 年 2 月推出业内首个 1200 伏氮化镓模块的样品，
GenUV	韩国	紫外探测器	在紫外线传感器市场上占据领先地位。目前生产以精密度高的 GaN/AlGaIn 为基础的紫外线传感器，以及有关应用系统。除了紫外线测定仪、水质净化器、空气净化器等，在支持智能手机的 UVI Checker 等，紫外线传感器的实际应用方面，也在投入不懈的努力。
Sglux	德国	紫外探测器	德国 Sglux 公司生产紫外光电二极管及其放大器，应用于工业生产、科学研究及消费市场，包括火警探测、火焰燃烧控制、紫外线净化、紫外线天文学、生物和医疗应用，以及个人保健产品等。
Spectronic	美国	紫外探测器	光电复合的 UVC 火焰探测器，国外，对中、俄禁运。
SCAN	奥地利	紫外探测器	UV 紫外光谱法水质监测仪等。
ABB	瑞士	紫外探测器	TVOC-2 电弧监测系统，GaN 紫外产品，批量成熟销售。
Nichia	日本	激光器	国际上少数几个批量提供 GaN 基激光器的厂商。
Osram	德国	激光器、LED	国际上少数几个批量提供 GaN 基激光器的厂商，另外销售 LED 芯片等。
首尔半导体	韩国	紫外 LED	全球领先的 LED 供应商，首尔半导体拥有世界级 LED 技术和生

产能力，其 UVC LED 技术已成熟并商业化。

在国内逐步扩大的市场带动下，上、中、下游及设计、配套等各环节均开始出现大批厂商，初步形成了较为完整的产业链，进入世界先进行列。



图表 2-16 国内氮化镓产业链主要企业

GaN 电力电子器件方面，包括苏州能讯、江苏华功等。GaN 射频器件方面，台湾台积电和稳懋是目前国内企业代工的主要平台，三安光电、苏州能讯已经布局，而中电 13 所、55 所、29 所（海特高新）已经在军用领域占据优势。

GaN 光电子方面，国内半导体 LED 照明相关企业几万家，包括三安光电、华灿光电、瑞丰光电等。在探测器方向，积极布局红外、紫外探测器等细分领域的企业较少，包括中蕊光电、镓芯光电等，尚未出现技术领先的行业龙头。

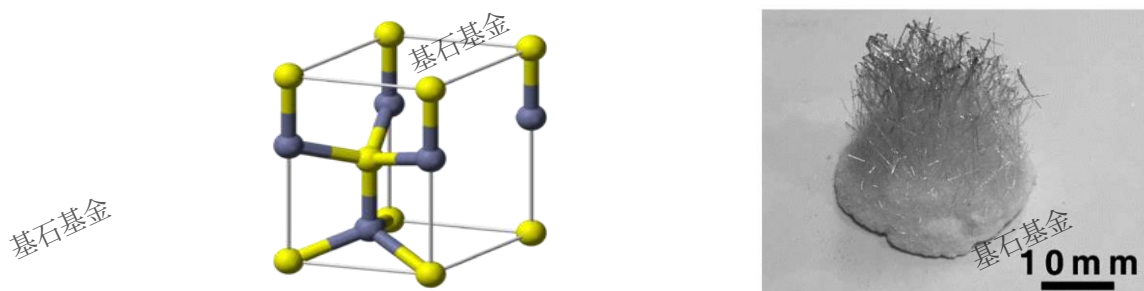
（2）碳化硅产业链国际国内现状

全球 SiC 产业格局呈现美国、欧洲、日本三足鼎立态势。其中美国全球独大，全球 SiC 产量的 70%~80% 来自美国公司，典型公司是 Cree、II-VI；欧洲拥有完整的 SiC 衬底、外延、器件以及应用产业链，典型公司是英飞凌、意法半导体等；日本是设备和模块开发方面的绝对领先者，典型公司是罗姆半导体、三菱电机、富士电机等。

国内市场上，衬底环节有山东天岳等已经实现量产，外延环节有东莞天域等，器件有世纪金光、泰科天润等；外延环节主要有中蕊光电、苏州晶湛等。

3.2 氮化铝 (AlN) 产业链

氮化铝 (AlN) 是一种六方纤锌矿结构的共价键化合物, 晶格参数为 $a=3.114$, $c=4.986$ 。纯氮化铝呈白色, 通常为灰色或灰白色, 是典型的 III-V 族宽禁带 (AlN 禁带 6.2eV) 半导体材料, 具有热导率高 ($3.3\text{W/cm}\cdot\text{K}$)、高温绝缘性和介电性好、高温下材料强度大、热膨胀系数低并且与半导体硅材料相匹配、无毒等优点, 具有良好的热学、电学、机械等性能, 是理想的电子封装散热材料, 可高效的解决大规模集成电路等大型元器件的散热问题, 对于高功率半导体元件性能提升具有重要作用, 对于推动功率半导体器件的小型化, 提升功效密度具有重要意义。



图表 2-17 氮化铝晶体结构及晶须形态

目前氮化铝产品主要以粉体及陶瓷为主; 氮化铝晶体由于制备难度较大, 尚未达到工业生产的成熟度, 可见的晶圆尺寸尚不到不到 2 英寸, 且以薄膜产品为主。AlN 陶瓷片主要用于大功率半导体集成电路和大功率的厚膜电路, AlN 薄膜主要用于薄膜器件的介质和耐磨、耐热、散热好的材料表面镀层。

目前氮化铝的应用主要集中在高功率 LED 衬底领域, 以陶瓷烧结形态存在。主要的生产流程大致分为粉末制备-胚体成型-陶瓷烧结三个步骤。

三种基板性能对照表			
项目	金属基板 (MPCB)	陶瓷基板 (Al_2O_3)	陶瓷基板 (AlN)
热导率 $\text{W/M}\cdot\text{K}$	0.15~4.0	20~41	150~170
绝缘性	差	好	好
热稳定性	一般	好	好
自身热辐射能力	一般	较好	强
应用领域	小功率大尺寸 LED	大功率小尺寸 LED	大功率大尺寸 LED

图表 2-18 氮化铝陶瓷基板的性能优势

3.2.1 氮化铝粉末制备

氮化铝粉体是制作氮化铝陶瓷的前端最主要的原料, 低成本的生产高纯度、粒度小的产品是目前粉体产业主要努力的方向。目前常见的氮化铝粉体生产工艺如下, 除此之外, 研发人员也在不断完善和开发新的生产工艺。

主要方法	制备过程	优缺点
金属直接氮化法	通过添加催化剂及两次氮化，使金属铝在高温下与氮（或氨）直接反应	优点：工艺简单，适合大规模工业化生产。 缺点：氮气扩散缓慢、铝粉结块、反应温度过高等
氧化物还原氮化法	氧化铝在高温下于氮气流中被碳或硅还原并氮化成氮化铝	优点：原料丰富、工艺过程简单，合成的粉体纯度高、粒径小且分布均匀。 缺点：合成时间长、氮化温度高，反应后需要对过量的碳进行除碳处理。
等离子体化学合成法	低温等离子体中，几乎所有颗粒均转为激活状态，具有很高的能量，并以很高的速度进行反应。制得的粉末无需经过研磨、过筛等工序，可避免带入外来杂质	优点：合成粉体团聚少、粒径小。 缺点：只能小批量处理，难于实现工业化生产，且氧含量高、所需设备复杂和反应不完全。
化学气相沉淀法	基于铝的挥发性化合物与氨或氮的化学反应从气相中沉积氮化铝的方法。根据使用分解物质不同，可分为铝的氨合物热解法和六氟铝酸铵热解法	优点：粉体纯度高，粒径小。 缺点：原料相对比较昂贵，工艺条件比较苛刻，难于满足工业应用要求。
熔炼法	在两根电极之间于过剩的氮气压力下引燃电弧，铝在电弧中被雾化并与氮气发生反应形成氮化铝	优点：粉体纯度高。 缺点：球磨时易被污染，难以获得稳定的燃弧，尚不适宜工业生产。

3.2.2 氮化铝坯体成型主要工艺

（1）干压成型

干压成型是将粉料加少量结合剂，经过造粒，然后将造粒后的粉料置于钢模中，在压力机上加压形成一定形状的坯体。干压成型的实质是在外力作用下，借助内摩擦力牢固的把各颗粒联系起来，保持一定的形状。常用的成型剂有石蜡、聚乙烯醇缩丁醛（PVB）。因氮化铝易于水解，AlN 材料的成型剂主要以有机疏水材料为主。

（2）等静压成型

等静压成型是利用液体介质不可压缩性和均匀传递压力性的一种成型方法，过程中将配好的坯料装入塑料或橡胶做成的弹性模具内，置于高压容器中，密封后，打入高压液体介质，压力传递至弹性模具对坯体加压。

（3）流延法成型

流延成型的具体工艺是将陶瓷粉体（包含烧结助剂）和分散剂在特定的容积介质中球磨、超声或机械搅拌混合一段时间，待分散均匀后加入粘结剂、塑性剂进行二次球磨混合，得到分散良好、稳定的浆料。成型时浆料从料斗下部流至载带之上，通过载带和刮刀的相对移动形成素坯膜。素坯膜和载带一起进入烘干室，溶剂蒸发，有机粘结剂在陶瓷颗粒间形成网络结构，形成具有一定强度和韧性的素坯膜。在储存过程中使残留溶剂分布均匀，消除湿度梯度。之后按照所需形状切割、冲片和打孔，最后排胶和烧结得到符合所需特性要求的陶瓷基片。流延法已成为电子工业用氮化铝陶瓷基片的主要成型工艺，流延法只适宜成形片状材料，无法满足氮化铝陶瓷的复杂形状成形问题，同时由于陶瓷材料固有的韧性低、性脆且难加工的缺点，使得用

传统的机械加工方法也难以制备复杂形状的 AlN 陶瓷零部件，因而限制了氮化铝在一些特殊场合的应用。

（4）粉末注射成型（PIM）

陶瓷注射成型（CIM）是粉末注射成型（PIM）的一种，是传统粉末冶金技术与现代塑料注射成型工艺相结合而发展起来的新型近净型成型技术，适合于制作几何形状复杂、组织结构均匀、高性能的小型精密部件。基本工艺流程是：将具有特定粒度和表面形态的陶瓷粉末与有机粘结剂混合均匀，制成唯料。以有机粘结剂为载体，使得唯料在一定的温度下具有流动性，唯料在注射成形机上在力和热的作用下流动填充模腔成型，得到注射坯体，随后经过脱脂和烧结得到全致密或接近全致密的产品。粉末注射成型不仅能够满足复杂形状零部件成型的要求，同时具有低成本、低消耗以及产品组织均匀、性能优良等特点。

3.2.3 氮化铝陶瓷的烧结工艺

自然界不存在天然的 AlN，因而只能依靠人工合成获取，但 AlN 是高熔点的强共价键化合物，烧结致密的难度较大，必须添加必要的粘结剂在 1850℃以上的高温进行烧结，才能获取电子工业生产所需性能的产品。目前主要的烧结工艺为常压烧结和热压烧结；研发人员目前正在逐步开发和完善微波烧结及放电等离子体烧结等新型工艺。

在常压烧结条件下，添加了 Y2O3 的氮化铝粉能产生液相烧结的温度为 1650℃以上，且烧结温度要受氮化铝粒度、添加剂种类及行亮等因素的影响。热压烧结的温度为 1500–1700℃，保温半小时，加压 20MPa 左右。

为了解决新兴的纳米陶瓷烧结过程中纳米晶粒随时间增长而长大的问题，快速烧结工艺应用而生，微波烧结与放电等离子烧结便是两种快速烧结的工艺。微波烧结是通过物质吸收微波的能量而进行自身加热，其加热过程在整个体积内同时进行，升温迅速、温度均匀，对于提高致密化速度、抑制晶粒生长较为有效，具有良好的发展前景。对于放电等离子烧结工艺，通过利用脉冲能、放电脉冲压力产生的瞬间高温，可在较低温度下迅速实现烧结。放电等离子烧结体内每个颗粒均匀的自身发热使颗粒表面活化，因而具有很高的热导率。

3.2.4 氮化铝国内发展现状

国内 AlN 产业发展仍处早期阶段。北大、北科大等少数院校对氮化铝粉体的制备及陶瓷基板的烧结、成型等有持续的研究跟踪；工业领域少数可生产氮化铝粉体的企业，产品质量与日本先进厂家仍存在较大差距，杂质跟含氧量不尽如人意，体现到价格上国产的粉体每公斤在 200–300 元人民币，而日本德山的产品经过表面活性处理后，可于空气中长时间存放仍不会水解，一公斤的售价可达 1200 元人民币。工业领域，目前国内仅有屈指可数的厂家具备氮化铝陶瓷基板成型、烧结的能力，但整体经验积累尚不足以与日本厂商竞争；而生产高质量产品所需的高纯氮化铝粉体大陆则完全依赖日本德山、丸和、京瓷及台湾的少数厂家。而像高铁 IGBT 等核心功效半导体的电子元件的 AlN 基板材料则基本都掌握在京瓷手中。同其他半导体材料一样，氮化铝国内应用的终端市场规模都较为庞大，但产业链的核心工艺及技术目前国内尚难于国外优势厂商

直接竞争。

3.3 三代半导体国内外主要厂商及最新动态

3.3.1 氮化镓领域

(1) 衬底：在 GaN 衬底方面，国内已经小批量生产 2 英寸衬底，具备 4 英寸衬底生产能力，并开发出 6 英寸衬底样品。国内可提供相关产品的企业有：纳维科技、中镓半导体。

公司名称	简介
纳维科技	苏州纳维依托中科院苏州纳米所而建。作为中国首家氮化镓衬底晶片供应商，团队从氮化镓单晶材料气相生长的设备开始研发，逐步研发成功 1 英寸、2 英寸、4 英寸、6 英寸氮化镓单晶材料，实现了氮化镓单晶材料生长的 n 型掺杂、补偿掺杂，研制出高电导率的和半绝缘的氮化镓单晶。
中镓半导体	中镓半导体采用 MOCVD 技术、激光剥离技术、HVPE 技术相结合的方法，研发、生产产品包括：GaN 半导体衬底材料，包括 GaN 衬底，GaN/Al ₂ O ₃ 复合衬底，图形化蓝宝石衬底。2018 年 2 月初，东莞市中镓半导体科技有限公司氮化镓（GaN）衬底量产技术实现重大突破！国内首创 4 英寸 GaN 自支撑衬底的试量产。

(2) 外延：外延环节国内主要的企业有苏州晶湛、江西晶能、大连芯冠科技、中晶半导体、耐威科技投资的聚能晶源等。

公司名称	简介
苏州晶湛	苏州晶湛半导体有限公司致力于为微波射频和电力电子器件应用领域提供高品质氮化镓外延材料。2013 年 8 月，晶湛开始在苏州纳米城建设国际先进的 GaN 外延材料生产线，可年产 150mm 氮化镓外延片 2 万片。2014 年底苏州晶湛在全球首家发布其商品化 8 英寸硅基氮化镓外延片产品，经有关下游客户验证，该材料具备全球领先的技术指标和卓越的性能，并填补了国内乃至世界氮化镓产业的空白。
大连芯冠科技	大连芯冠科技有限公司是一家由海外归国团队创立的半导体高科技企业。开展以氮化镓为代表的第三代半导体外延材料和电子器件的研发与产业化。公司拥有国际先进的德国爱思强 MOCVD 外延炉及外延表征设备、6 英寸化合物半导体芯片生产线、晶圆在片检测系统、可靠性测试系统和应用开发系统。在电力电子领域，公司已实现 6 英寸 650 伏硅基氮化镓外延片的量产，并发布了比肩世界先进水平的 650 伏硅基氮化镓功率器件产品，主要应用于电源管理、太阳能逆变器、电动汽车及工业马达驱动等领域。在微波射频领域，公司已进行硅基氮化镓外延材料的开发，射频芯片的研发与产业化准备工作亦已展开，产品定位为 10 GHz 以下的射频通讯和射频能量市场。
中晶半导体	2018 年，耐威科技先后投资设立了聚能晶源、青岛聚能创芯微电子有限公司，2018 年 12 月聚能晶源成功研制了 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

(3) 器件/模块/IDM 方面：英诺赛科、华润微、苏州能讯、江苏能华、士兰微、江苏华功半导体、三安集成、海威华芯均已进入布局。

公司名称	简介
------	----

英诺赛科	英诺赛科（珠海）科技有限公司是 2015 年 12 月由海归团队发起，并集合了数十名国内外精英联合创办的第三代半导体电力电子器件研发与生产的高科技企业。公司商业模式采用 IDM 全产业链模式，致力于打造一个集研发、设计、外延生长、芯片制造、测试与失效分析为一体的第三代半导体生产平台。 2017 年 11 月英诺赛科的 8 英寸硅基氮化镓生产线通线投产，成为国内首条实现量产的 8 英寸硅基氮化镓生产线。 2018 年年中，英诺赛科宽禁带半导体项目在苏州市吴江区举行开工仪式。据悉，该项目总投资 60 亿，占地 368 亩，建成后将成为世界一流的集研发、设计、外延生产、芯片制造、分装测试等于一体的第三代半导体全产业链研发生产平台，填补我国高端半导体器件的产业空白。 英诺赛科 CEO 孙在亨表示，目前，在氮化镓的电子电力器件及射频器件，尤其是硅基氮化镓领域，我国还未能实现国产化。该项目的落地，就是要打破这样的局面、填补我国高端半导体器件的产业空白。同时，该项目也是该领域全球首个大型量产基地，单月满产可达 6-8 万片，为 5G 移动通信、新能源汽车、高速列车、电子信息、航空航天、能源互联网等产业的自主创新发展和其他转型升级行业提供先进、高效、节能和低成本的核心电子元器件。
华润微	华润微规划建设的化合物半导体项目，判断生产线主要是 GaN 工艺。该项目将分两期实施，其中一期项目投资 20 亿元，二期投资 30 亿元。 2017 年 12 月，华润微电子对中航（重庆）微电子有限公司完成收购，拥有 8 英寸硅基氮化镓生产线，国内首个 8 英寸 600V/10A GaN 功率器件产品，用于电源管理。
苏州能讯	能讯半导体采用整合设计与制造（IDM）的模式，自主开发了氮化镓材料生长、芯片设计、晶圆工艺、封装测试、可靠性与应用电路技术。能讯半导体在江苏昆山国家高新区建成了中国第一家氮化镓（GaN）电子器件工厂，厂区占地 55 亩，累计投资 10 亿元。完成了面向 5G 通信系统的技术与产品的积累，产品性能已通过国际一流通讯企业的测试与认证。目前已可以提供 6 英寸、8 英寸硅基氮化镓晶圆材料。 2018 EDICON China 展会上，能讯半导体推出了 780 Dual-Path 封装的大功率射频功放管及各类解决方案，满足基站客户高频、宽带、高效的系统要求；尤其是效率高达 60% 的 1.8GHz FDD Doherty 功放，领先同期主流 LDMOS PA 效率高达 5% 以上。
江苏能华	江苏能华由国家“千人计划”专家朱廷刚博士创办，建设 8 条 6 英寸以上的外延片生产线和一条完整的功率器件工艺生产线，主要生产以氮化镓为代表的复合半导体高性能晶圆及其功率器件、芯片和模块。 2016 年，江苏能华参与了国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项，进行 GaN 基新型电力电子器件关键技术项目。
士兰微	杭州士兰微电子股份有限公司坐落于杭州高新技术产业开发区，是专业从事集成电路芯片设计以及半导体微电子相关产品生产的高新技术企业，公司现在的主要产品是集成电路和半导体产品。 2017 年三季度士兰微打通了一条 6 英寸的硅基氮化镓功率器件中试线。打通之后士兰微会进一步加强这方面的技术研发，公司预计在未来 1-2 年内会有产品突破，能够有新产品尽快推到市场上。 2018 年 10 月，杭州士兰微电子股份有限公司厦门 12 英寸芯片生产线暨先进化合物半导体生产线正式开工。2017 年 12 月，士兰微电子与厦门市海沧区人民政府签署了《战略合作框架协议》。士兰微电子公司与厦门半导体投资集团有限公司共同投资 220 亿元人民币，在厦门规划建设两条 12 英寸 90~65nm 的特色工艺芯片（功率半导体芯片及 MEMS 传感器）生产线和一条 4/6 英寸兼容先进化合物半导体器件（第三代功率半导体、光通讯器件、高端 LED 芯片）生产线。
华功半导体	江苏华功半导体有限公司成立于 2016 年 5 月，在第三代半导体行业拥有雄厚的专家资源、优秀的人才队伍、长期的技术积累和丰富的产业化经验。 华功半导体的技术团队以北京大学、中山大学以及合作的高校产业化企业为核心，从 2012 年开始合作推动硅基氮化镓功率电子产业化，目前已攻克了相关材料与器件的产业化关键技术。

2019 年度集成电路行业研究

三安集成	2018 年 11 月, 据厦门晚报报道, 经过 4 年多的建设, 省、市重点项目三安集成电路(一期)基本完工, 目前已小批量生产砷化镓、氮化镓和碳化硅产品, 并陆续投用市场。新建的生产线将积极布局国产化品牌的 5G 射频、光通讯等领域芯片, 将在 5G、无人驾驶及新能源汽车等领域。 截至 2018 年 10 月, 三安集成电路(一期)累计完成固定资产投资 24.1 亿元, 拥有涵盖 GaAs、GaN、SiC 芯片及外延的生产线, 现有年产能 9.6 万片/年, 达产后可形成 36 万片/年的产能规模。
海威华芯	海威华芯是国内首家提供六英寸砷化镓/氮化镓微波集成电路的纯晶圆代工(FOUNDY)服务公司。2016 年 7 月国家队国开基金 1.52 亿元增资海威华芯, 为半导体产业护航。海威华芯二股东四威电子为中电科 29 所旗下全资子公司, 且海特高新已与 29 所签署了《战略合作意向书》, 为公司军用订单 奠定基础。 公司在 2017 年年报中表示, 海威华芯技术研发团队的砷化镓制程研发方面 IPD 和 PPA25 产线试生产阶段良率达到预期水平, 具备初步量产能力; 氮化镓成功突破 6 英寸 GaN 晶圆键合技术; 芯片产品开发方面, 通用芯片、定制芯片、数字电路等开发设计超过 120 余款, 包括滤波器、功分器、开关矩阵、耦合器等产品。

3.3.2 碳化硅领域

(4) 衬底: 单晶衬底方面, 国内衬底以 4 英寸为主, 目前, 已经开发出了 6 英寸导电性 SiC 衬底和高纯半绝缘 SiC 衬底。据 CASA 数据, 山东天岳、天科合达、河北同光、中科节能均已完成 6 英寸衬底的研发, 中电科装备研制出 6 英寸半绝缘衬底。

公司名称	简介
山东天岳	2017 年, 山东天岳自主开发了全新的高纯半绝缘衬底材料, 目前量产产品以 4 英寸为主, 此外其 4H 导电型碳化硅衬底材料产品主要有 2 英寸、3 英寸、4 英寸及 6 英寸。山东天岳还独立自主开发了 6 英寸 N 型碳化硅衬底材料。 2018 年 11 月 13 日, 天岳碳化硅材料项目开工活动在长沙浏阳高新区举行, 该项目的落实标志着国内最大的第三代半导体碳化硅材料项目及成套工艺生产线正式开建。据悉, 天岳碳化硅材料项目由山东天岳晶体材料有限公司开发建设, 总投资 30 亿元, 项目分两期建设, 一期占地 156 亩, 主要生产碳化硅导电衬底, 预计年产值可达 13 亿元; 二期主要生产功能器件, 包括电力器件封装、模块及装置, 新能源汽车及充电站装置, 轨道交通牵引变流器、太阳能光伏逆变器等, 预计年产值达 50 亿-60 亿元, 税收可达 5 亿-7 亿元。
天科合达	截止至 2018 年 7 月, 天科合达已研发出 4 项产品: 4 英寸碳化硅晶片生产(6 英寸未量产, 准备当中); 碳化硅单晶生长设备; 碳化硅晶体切割、晶片加工及清晰返抛服务; 碳化硅宝石晶体。 天科合达总经理杨健说: “现在, 天科合达总共 100 多台炉子, 一年能产 2 万片 4 寸导电碳化硅晶片。我们的产能离市场需求还有距离, 我们现在的 4 个大客户需求在 20 万片。天科合达正在继续扩充产能, 计划扩充 3 倍。” 2018 年 10 月, 天科合达在徐州经开区投资的碳化硅晶片项目正式签约。
河北同光	河北同光主要产品包括 4 英寸和 6 英寸导电型、半绝缘碳化硅衬底, 其中 4 英寸衬底已达到世界先进水平。 2017 年 10 月, 同光联合清华大学、北京大学宽禁带半导体研究中心、中国科学院半导体研究所、河北大学共同搭建了“第三代半导体材料检测平台”, 推动了国内第三代半导体产业的发展。
中科节能	2017 年 7 月, 中科节能与青岛莱西市、国宏中晶签订合作协议, 投资建设碳化硅长晶生产线项目。该项目总投资 10 亿元, 项目分两期建设, 一期投资约 5 亿元, 预计 2019 年 6 月建成投产, 建成后可年产 5 万片 4 英寸 N 型碳化硅晶体衬底片和 5 千片 4 英寸高纯度半绝缘型碳化硅晶体衬底片; 二期投资约 5 亿元, 建成后可年产 5 万片 6 英寸 N 型碳化硅晶体衬底片和 5 千片 4 英寸高纯度半绝缘型碳化硅晶体衬底片。

Norstel	Norstel 成立于 2005 年 2 月, 是从硅晶圆片制造商 Okmetic Oyj 分离出来的企业。位于瑞典 Norrköping 的工厂建成于 2006 年。Norstel 采用用高温化学气相沉积 (HTCVD) 专利技术, 生产高质量大尺寸的 SiC 衬底和外延片。
---------	---

(2) 外延片: 国内瀚天天成、东莞天域半导体、国民技术子公司国民天成均可供应 4-6 英寸外延片, 中电科 13 所、55 所亦均有内部供应的外延片生产部门。

公司名称	简介
瀚天天成	瀚天天成是国内一家专注于碳化硅外延晶片的中美合资高新技术企业。公司已经形成三英寸四英寸以及六英寸的完整碳化硅半导体外延晶片生产线, 并满足 600V、1200V、1700V 器件制作的需求。公司也是国内第一家提供商业化 6 英寸碳化硅外延片的供应商。
东莞天域	东莞市天域半导体科技有限公司 (TYSiC) 成立于 2009 年 1 月 7 日, 是我国首家专业从事第三代半导体碳化硅外延片研发、生产和销售的高新技术企业。目前公司已引进四台世界一流的 SiC-CVD 及配套检测设备, 生长技术已达到国际先进水平。 2012 年天域半导体已实现年产超 2 万片 3 英寸、4 英寸碳化硅外延晶片的产业化能力, 目前可提供 6 英寸碳化硅外延晶片以及各种单极、双极型 SiC 功率器件等产品。
国民技术	2017 年 8 月 15 日, 国民技术发布公告, 公司全资子公司国民投资与成都邛崃市政府签署投资协议书, 拟以不少于 80 亿元投建“国民天成化合物半导体生态产业园”, 项目预计三年初具规模, 五年实现产能。公司另拟通过国民投资出资 5000 万元, 与陈亚平技术团队等合作设立成都国民天成化合物半导体有限公司, 建设和运营 6 英寸第二代和第三代半导体集成电路外延片项目, 项目首期投资 4.5 亿元。

(3) 器件/模块/IDM: 中国在碳化硅器件设计方面有所欠缺, 还没有厂商涉及于此。但是在模块、器件制造环节我国已出现了一批优秀的企业, 包括三安集成、海威华芯、泰科天润、中车时代、世纪金光、芯光润泽、深圳基本、国扬电子、士兰微、扬杰科技、瞻芯电子、天津中环、江苏华功、大连芯冠、聚力成半导体等。

公司名称	简介
三安集成	2018 年 12 月, 三安光电子公司厦门三安集成电路宣布推出 6 英寸 SiC 晶圆代工制程。商业版本的 6 英寸 SiC 晶圆制造技术的全部工艺鉴定试验已完成并加入到三安集成电路的代工服务组合中。
泰科天润	泰科天润的基础核心产品以碳化硅肖特基二极管为代表, 产品包含各种封装形式的碳化硅肖特基二极管、碳化硅 MOSFET 和碳化硅模块等, 其中 600V/5A~50A、1200V/5A~50A 和 1700V/10A 等系列的碳化硅肖特基二极管产品已投入批量生产。泰科天润已建成国内第一条碳化硅器件生产线, SBD 产品覆盖 600V-3300V 的电压范围。
芯光润泽	2012 年, 芯光润泽通过引进海内外顶尖行业专家, 组建碳化硅芯片科研技术团队, 并在第三代半导体方面与西交大、西电等院校成立联合研发中心。2016 年 12 月, 芯光润泽第三代半导体碳化硅功率模块产业化项目正式开工建设。 2018 年 9 月, 厦门芯光润泽国内首条碳化硅 IPM 产线正式投产, 标志着我国在碳化硅芯片这个战略新兴行业又实现了一次重要的突破。
世纪金光	世纪金光是一家致力于二代、三代半导体晶体材料、外延器件的研发、生产与销售的高新技术企业。公司现主要产品为 2-4 英寸碳化硅单晶片, 可满足光电及微波和功率器件使用要求。
深圳基本	深圳基本半导体有限公司 (BASiC Semiconductor Ltd.) 是中国第三代半导体行业领军企业, 致力于碳化硅功率器件的研发与产业化。基本半导体整合海外创新技术与国内产业资源, 对碳化硅器件的材料制备、芯片设计、制造工艺、封装测试、驱动应用等各方面进行研发, 覆盖产业链各个环节。基于独有的 3D SiCTM 技术, 基本半导体碳化硅功率器件性能达到国际先进水平, 可广泛应用于新能源发电、新能源汽车、轨道交通和智能电网等领域。

国扬电子	2016 年, 位于扬州市开发区的扬州国扬电子有限公司功率电子产业园项目, 10 月正式竣工投产。据了解, 项目分三期实施, 2014 年投资约 0.9 亿元, 用于建设碳化硅模块项目; 2015—2016 年投资约 9.1 亿元, 用于建设碳化硅材料、碳化硅模块扩产及尺寸硅外延项目; 2017—2018 年投资约 10 亿元, 用于建设大尺寸硅外延扩产项目和射频模块项目。
扬杰科技	扬杰科技产品包括功率二极管、整流桥、肖特基二极管和 mosfet。随着 4 寸线扩产一倍以及 6 寸线产线 2018 年底满产, 总营收基于出货量稳步提升保持 35% 的增长速度。2015 年 3 月, 扬杰科技与西安电子科技大学签约开展第三代半导体材料与器件的产业化应用研究工作; 2015 年 4 月, 扬杰科技通过增资和股权转让方式取得国宇电子 38.87% 股权, 与中国电子科技集团公司第五十五研究所所在碳化硅芯片和模块产品方面建立紧密合作关系。2015 年 7 月, 扬杰科技募资 1.5 亿元用于碳化硅芯片、器件研发及产业化建设项目。 同时公司战略布局 8 寸线 IGBT 芯片和 IPM 模块业务等高利润产品, 多产品线协同发展助力公司提升在功率器件市场份额。
瞻芯电子	2018 年 5 月, 上海瞻芯电子称, 公司制造的第一片国产 6 英寸碳化硅 (SiC) MOSFET 晶圆正式面世。据介绍, 上海瞻芯电子于 2017 年 10 月上旬完成工艺流程、器件和版图设计, 在 10 月至 12 月间完成初步工艺试验, 并且从 2017 年 12 月开始正式流片, 2018 年 5 月成功地在一条成熟量产的 6 英寸工艺生产线上完成碳化硅 MOSFET 的制造流程。晶圆级测试结果表明, 各项电学参数达到预期, 为进一步完成工艺和器件设计的优化奠定了坚实基础。

3.4 三代半导体市场规模及增速

3.4.1 三代半导体电力电子市场规模

据 Yole 和 HIS Markit 数据显示, 2018 年全球半导体电力电子市场约 390 亿美元, 其中分立器件市场规模 130 亿美元左右, 占整体市场的三分之一。推动该市场增长的主要因素为电力基础设施的升级, 便携式设备对高能效电池的需求增长。其中, 汽车应用市场增速最高, 主要归因于混合动力汽车 (HEV) 和电动汽车 (EV) 的数量日益增长, 以及全球对轿车和其他乘用车需求不断增加。

参照 Yole 和 HIS MarKit 的数据, 2018 年 SiC 电力电子器件市场规模约 3.9 亿美元, GaN 电力电子器件市场约 0.5 亿美元, 两者合计 4.4 亿美元, 占整体电力电子器件市场规模的比例达到 3.4%。

第三代半导体电力电子市场成长空间广阔。据 HIS MarKit 预计, SiC 和 GaN 电力电子器件预计将在 2020 年达到 10 亿美元, 受益于混合动力及电动汽车、电力和光伏逆变器等方面的需求增长, 自 2017 年起, 由于 SiC 和 GaN 电力电子器件在混合动力和电动汽车的主传动系逆变器中的应用开启, SiC 和 GaN 电力电子器件市场年复合增长率 (CAGR) 将超过 35%, 到 2027 年达到 100 亿美元。

据 Yole 预测, 在汽车等应用市场的推动下, 到 2023 年 SiC 电力电子器件市场规模将增长至 14 亿美元, 复合年增长率接近 30%。目前, SiC 电力电子器件市场的主要驱动因素是功率因数校正 (PFC) 和光伏应用中大规模采用的 SiC 二极管。然而, 得益于 SiC MOSFET 性能和可靠性的提升, 3—5 年内, SiC MOSFET 有望在电动汽车传动系统主逆变器得到广泛应用, 未来 5 年驱动 SiC 器件市场增长的主要因素将由二极管转变为 MOSFET。

据 Yole 预测, 到 2020 年 GaN 电力电子晶体管在同等性能情况下, 将会达到 Si MOSFET 和 IGBT 持平的价格, 到 2024 年 GaN 电力电子器件市场预计将达到 6 亿美元。HIS Markit 认为, GaN 电力电子器件有望凭

借成本优势，取代价格较高的 SiC MOSFET，成为 2020 年后逆变器中的首选。

3.4.2 氮化镓的射频器件市场状况

GaN 射频器件已成功应用于众多领域，以无线电设施和国防应用为主，还包括卫星通讯、民用雷达和航电、射频能量等领域。据 Yole 统计，2018 年全球 3W 以上 GaN 射频器件（不含手机 PA）市场规模达到 4.57 亿美元，在射频器件市场（包含 Si LDMOS，GaAs 和 GaN）的渗透率超过 25%。预计到 2023 年市场规模达到 13.24 亿美元，年复合增长率超过 23%。

国防是 GaN 射频器件最主要的应用领域。由于对高性能的需求和对价格的不敏感，国防市场为 GaN 射频器件提供了广阔的发展空间。据 Yole 统计，2018 年国防领域 GaN 射频器件市场规模为 2.01 亿美元，占 GaN 射频器件市场的份额达到 44%，超过基站成为最大的应用市场。预计到 2023 年，市场规模将达到 4.54 亿美元，2018-2023 年均复合增速为 18%。

基站是 GaN 射频器件第二大应用市场。据 Yole 统计，2018 年基站领域 GaN 射频器件规模为 1.5 亿美元，占 GaN 射频器件市场的 33%。随着 5G 通信的实施，2019-2020 年市场规模会出现明显增长。预计到 2023 年，基站领域 GaN 射频器件的市场规模将达到 5.21 亿美元，2018-2023 年均复合增长率达到 28%。

3.4.3 三代半导体国内市场状况

受到经济形势的影响，2018 年中国半导体电力电子市场增速有所下滑。中国半导体协会数据显示，预计 2018 年中国半导体电力电子市场规模 2,264 亿，同比增长 4.3%。2018 年，SiC、GaN 器件在电力电子应用领域渗透率持续加大。根据 CASA 统计，2018 年中国市场 SiC、GaN 电力电子器件的市场规模约为 28 亿元，同比增长 56%，预计未来五年复合增速 38%，到 2023 年 SiC、GaN 电力电子器件的市场规模将达到 148 亿元。

现阶段中国三代半导体电力电子器件市场渗透率仍然较低。国内应用市场中，进口产品的占有率仍然超过 90%，市场继续被国际电力电子器件巨头公司 Cree、Rohm、Infeneon、Macom 等产品占有，进口替代问题仍急需突破。

从应用市场看，在电源（不间断电源 UPS、消费类电源 PFC、工业及商业电源）、太阳能光伏逆变器领域取得了较大进展。电源领域是三代半导体电力电子器件领域最大的市场，规模约 16.2 亿元，占到整体的 58%。太阳能光伏逆变器领域，三代半导体市场规模 6.8 亿元，相比 2017 年增速仅 7%。尽管如此，SiC 电力电子器件在光伏逆变器中渗透率却在逐年提升，到 2019 年 SiC 电力电子器件的渗透率有望超过 20%。

2018 年，中国三代半导体微波射频电子市场规模约 24.5 亿元，较 2017 年同比增长 103%。国防应用和基站的持续增长将推动 GaN 射频市场规模不断放大。国防、航天应用仍为驱动 GaN 市场的主力军，占 GaN 射频市场规模的 47%。受益于国防需求驱动，特别是机载和舰载军用装备现代化转变，中国军用雷达系统更新换代，AESA 雷达技术成为主流，将推动对 GaN 射频市场需求不断增长。

移动通信领域，随着 5G 商业化渐行渐近，5G 基站的规模化铺设将进一步催生对射频微波器件的大量需

2019 年度集成电路行业研究

求。移动通信基站应用方面，2018 年 GaN 射频市场需求达到 9 亿元，同比增长 2 番。2018 年，中兴、华为事件刺激中国 5G 商用自主化进程，5G 基站发货量大幅增加，带动 GaN 射频器件需求规模近 0.4 亿元。从市场前景看，随着移动通信要求的工作频率和宽带日益增加，GaN 在基站和无线回传中的应用持续攀升，预计 2018-2023 年未来五年中国 GaN 射频器件市场年均增长率达到 60%，2023 年市场规模将有望达到 250 亿元。

通用照明领域，中国目前是全球最大的半导体照明制造中心、销售市场和出口地。2018 年，中国 LED 产业整体发展增速放缓，进入下降周期。其中应用环节约 6080 亿元，同比增长 13.8%。通用照明仍是最大应用市场，占比达 44.1%，但增速放缓，2018 年约为 5.0%，产值达 2679 亿元。景观照明仅次于通用照明为第二大应用，产值达 1007 亿元，同比增长 26%，占整体市场的 16.5%。显示应用中超小间距显示屏是市场主要驱动力，2018 年，LED 显示屏产值为 947 亿元，同比增长 30.2%。汽车照明作为 LED 应用新突破点，实现同比 20% 高增长。农业光照、紫外 LED、红外 LED 灯创新应用市场推进速度加快，新品不断推出，逐步开始起量。

四、三代半导体国内相关政策梳理

“十二五”以来，我国开展了跨学科、跨领域的研发布局，在新材料、能源、交通、信息、自动化、国防等各相关领域分别组织国内科研院所和企业联合攻关，部分解决了第三代半导体材料和器件制备的关键技术问题。2016 年作为“十三五”开局之年，科技部、工信部、国家发改委等多部委出台多项政策，对第三代半导体材料进行布局。从政策的内容来看，科技创新仍是重点，产业化布局、专业人才储备、投资鼓励、产业园规划建设、生产制造扶植等方面的支持政策也逐步出台，力争全面实现“换道超车”。

地方政策也在 2016 年大量出台，福建、广东、江苏、北京、青海等 27 个地区出台第三代半导体相关政策（不包括 LED）近 30 条。一方面多地均将第三代半导体写入“十三五”相关规划（17 项）另一方面不少地方政府有针对性对当地具有一定优势的 SiC 和 GaN 材料企业进行扶持。

颁布时间	颁布机构	名称	内容
2015.05	国务院	中国制造 2025	4 次提到了以碳化硅、氮化镓为代表的第三代半导体功率器件。
2016.07	国务院	《“十三五”国家科技创新规划》	提出发展新一代信息技术，发展微电子和光电子技术，重点加强极低功耗芯片、新型传感器、第三代半导体芯片和硅基光电子、混合光电子、微波光电子等技术及器件的研发。
2016.09	科技部、国家发改委、外交部、商务部	《推进“一带一路”建设科技创新合作专项规划》	在共同开展高品质特殊钢等重点基础材料产业化关键技术中提到第三代半导体制造技术合作研发。

2019 年度集成电路行业研究

2016. 09	科技部	国家重点研发计划“战略性先进电子材料”重点专项	面向下一代移动通信的 GaN 基射频器件关键技术及系统应用”，该项目旨在针对 5G 通信需求，建立开放的工艺代工线，实现从高效率器件到超宽带电路设计等系列自主可控的 GaN 基射频器件和电路成套技术；建立“产学研用”协同创新产业链，实现 GaN 器件与电路在通信系统的应用，推动我国第三代半导体在射频功率领域的可持续发展。
2016. 09	工信部	《建材工业发展规划（2016—2020 年）》	在主要任务中提出要壮大建材新兴产业（人工晶体），重点发展高品质人造金刚石和金刚石膜，4-6 英寸 LED 用蓝宝石晶体衬底，第三代半导体晶体材料等产品。
2016. 11	国务院	《“十三五”战略性新兴产业发展规划》	提出做强信息技术核心产业，推动智能传感器、电力电子、印刷电子、半导体照明、惯性导航等领域关键技术研发和产业化，提升新型片式元件、光通信器件、专用电子材料供给保障能力，将大功率半导体照明芯片与器件纳入节能技术装备发展工程。
2016. 12	国务院	国家新材料产业发展领导小组	成立国家新材料产业发展领导小组，做好顶层设计和政策引导，抓好重点工作落实，加快推动新材料产业快速健康发展，国家重大项目“重点新材料研发及应用”有望在 2017 年启动。
2017. 04	科技部	“十三五”材料领域科技创新专项规划	战略性电子材料技术以第三代半导体材料与半导体照明、新型显示为核心，以大功率激光材料与器件、高端光电子与微电子材料为重点，第三代半导体材料与半导体照明、新型显示两大核心方向整体达到国际领先水平。

五、国内三代半导体产业发展机遇与挑战

5.1 机遇

(1) “超越摩尔定律”成为发展新动能

由于集成电路制造工艺节点的更新难度越来越大，技术研发费用剧增，50 多年来驱动半导体产业高速发展的“摩尔定律”演进速度显著放缓。能够承受先进制造工艺开发和投资费用的企业和客户越来越少，应用场景也集中在高性能计算和通信等有限的领域。然而随着智能化改造和物联网应用的不断推进，万物智能、万物互联为行业发展带来新机遇，“超越摩尔定律”成为发展新动能。由此带来对集成电路特色制造工艺和产品的旺盛需求。近一年来，MCU 和 MOSFET 等产品缺货和 8 英寸生产线产能紧缺印证了这一趋势。化合物半导体由于性能优势，特别适合于制造射频器件、光电子器件、电力电子器件，是“超摩尔”领域的重要发展方向。

(2) 中国是全球最大的应用市场

中国是全球最大的移动通信市场，已建成全球最大的 4G 通信网络，基站数量超过 200 万，并计划在 2019 年开始启用 5G 通信。华为和中兴分别是全球第一大和第四大基站供应商。华为、OPPO、小米、vivo 是全球前六大的智能手机企业，每年出货量近 5 亿部。我国是全球最大的新能源汽车市场。2017 年，国内新能源汽车产销分别达到 79.4 万辆 77.7 万辆，同比增长 53.8%和 53.3%。比亚迪、北汽、上汽、吉利、蔚来等在新能源汽车领域开始发力，比亚迪和北汽的两款车型包揽了 2017 年全球新能源汽车销量的前 2 名。

(3) 高校和研究机构具备技术积累

清华大学、北京大学、南京大学、山东大学、西安电子科技大学等高校、中科院和中国电子科技集团下属的研究所在化合物半导体领域已耕耘超过 20 年，并通过技术转化和合作成立了中镓半导体、苏州纳维、山东天岳、天科合达、保定同光、东莞天域、华功半导体等企业。随着化合物半导体在 5G、物联网、能源、国防军工等领域发展不断加速，人才和技术需求增加，我国科研机构的人才和技术储备优势将愈发显著。

(4) 国家和地方产业政策支持

工业和信息化部、国家发展改革委发布的《信息产业发展指南》将“第三代化合物半导体”列为集成电路产业的发展重点。科技部将第三代半导体列入国家重点研发计划“战略性先进电子材料”重点专项。2018 年国务院政府工作报告中明确将新能源汽车和第五代移动通信 2 个化合物半导体最重要的应用市场作为加快制造强国建设的重点。地方政策方面，北京、深圳、成都、厦门、泉州、芜湖等均已发布或正在研究推动化合物半导体产业发展的扶持政策。

5.2 挑战

(1) 国际技术封锁

化合物半导体可用于军用雷达，是有源相控阵雷达的关键元器件，因而受到国际上《瓦森纳安排》的出口管制。中国资本在该领域的国际并购频频被否决，包括收购 Aixtron、Lumileds、GCS 等。2018 年 8 月 1 日，美国商务部公布新增的 44 家中国出口管制企业名单，限制美国的技术向其出口和转移。名单中的中电科 13 所和 55 所是国内技术领先的化合物半导体研究机构。

(2) 市场推进困难

集成电路是资源全球配置的产业，在国际政治环境允许的情况下，国内的整机应用企业会优先采购全球领先的化合物半导体供应商的产品，以保持整机产品在全球市场的竞争力。国内的化合物半导体企业面临着在行业市场和消费市场两面碰壁的困难。在行业市场，需要器件企业与整机企业形成长期稳定的合作，共同提升产品的可靠性和稳定性；在消费市场，需要器件企业具备规模产能和出色的成本管理能力。这对于国内的化合物半导体企业来说，不论是技术上还是管理上，任务都非常艰巨。

(3) 研发分散、投入不够，缺乏稳定持续的有效攻关

中国总体研发投入的力度不够、不集中。企业作为创新的主体，原始创新能力不足，在产品研发方面重视不够，缺乏主动研发投入，参与创新研发少、生产跟踪仿制多，“中国制造”产品中缺乏“中国创造”元素，只能依靠廉价销售与低层次竞争手段寻找出路。

(4) 产业体系未建立，整体创新环境较差

在第三代半导体产业具有爆发性增长潜力的应用领域，例如 5G 移动通信、电动汽车等，与国外相关产业和市场的差距还比较明显，落后程度甚于技术层面的落后程度。在标准、检测、认证等方面的行业规则、办事程序和现有的体制等与新材料产业发展规律和特点不相匹配，尚未解决材料“能用-可用-好用”发展过

程中的问题和障碍。

六、三代半导体投资建议

三代半导体目前整体产业尚未成熟。从产业技术成熟度来看，前端的衬底、外延制备工艺成熟度一般，成本较高，良品率稳定性仍有待提升。从市场来看，上游晶圆成本高企，使得应用市场主要集中在对成本不敏感的高端应用市场，规模化的消费市场仍然以硅基半导体为主。从行业属性看，三代半导体属于资本、研发密集型企业，需要大量资金、优质人才的长期持续投入，使得能涉足三代半导体行业的玩家屈指可数，要么是具有国资背景的产业集团，要么是具备行业资源积累的上下游企业。

这些特点使得三代半导体领域的创业企业必然较少，少数创业企业能坚持下来得益于地方政府的长期支持和背书。对于股权投资机构而言，尤其是追求短期财务回报的机构，三代半导体产业现阶段仍不适宜介入；具备深厚产业背景的产业投资更适宜三代半导体领域相关投资。