

—第三代半导体主要下游产品及应用领域—

目录

概述

第三代半导体简介	P1
第三代半导体代表性材料	P1
第三代半导体其他材料	P4

下游产品

碳化硅材料主要下游产品	P6
氮化镓材料主要下游产品	P7
氮化铝材料主要下游产品	P8
氧化锌材料主要下游产品	P8

应用领域及市场动态

碳化硅 MOS 管的应用领域	P9
碳化硅肖特基二极管应用领域	P11
氮化镓材料的应用领域	P11
市场动态	P13

概述

第三代半导体简介

半导体材料是信息技术的核心基础材料。半导体领域向来有“一代材料、一代技术、一代产业”的说法。上个世纪半导体材料的实用化进程先后发展了三类代表性的半导体材料。

第一代半导体以 Ge（锗）、Si（硅）元素为主，在上个世纪 40-50 年代取得突破。它的发展推进了晶体管的发明、集成电路的诞生，以及电荷耦合器件的发明，开创了固体电子学与硅微电子技术，引领电子学、电子技术的革命。

第二代半导体是以 GaAs（砷化镓）、InSb（锑化铟）为代表的化合物半导体，在上个世纪 60-70 年取得突破。它的发展推动了半导体激光器诞生、射频晶体管的问世，引发通信技术革命（宽带光纤通信，宽带射频无线通信），为互联网、移动互联网技术奠定了基础。

第三代半导体是 SiC（碳化硅）、GaN（氮化镓）为代表的宽禁带化合物半导体，在上个世纪 80-90 年代取得突破性进展。在光电子领域，第三代半导体作为颠覆性技术，开拓高效固态发光光源和固态紫外光源与探测技术，开创白光照明和全色平板显示的新纪元。在微电子领域，第三代半导体超越第一代、第二代半导体，发展高效率、低功耗、具有极端性能和耐恶劣环境的宽带功率技术和宽带射频电子技术。第三代半导体以不可替代性优势支撑信息技术的创新发展。

第三代半导体代表性材料

碳化硅

碳化硅由于化学性能稳定、导热系数高、热膨胀系数小、耐磨性能好，除作磨料用外，还有很多其他用途，例如：以特殊工艺把碳化硅粉末涂布于水轮机叶轮或汽缸体的内壁，可提高其耐磨性而延长使用寿命 1~2 倍；用以制成的高级耐火材料，耐热震、体积小、重量轻而强

度高，节能效果好。低品级碳化硅（含 SiC 约 85%）是极好的脱氧剂，用它可加快炼钢速度，并便于控制化学成分，提高钢的质量。此外，碳化硅还大量用于制作电热元件硅碳棒。

碳化硅的硬度很大,莫氏硬度为 9.5 级，仅次于世界上最硬的金刚石（10 级），具有优良的导热性能，是一种半导体，高温时能抗氧化。自 1905 年第一次在陨石中发现碳化硅，1907 年第一只碳化硅晶体发光二极管诞生，1955 年生长高品质碳化硅概念理论和技术上重大突破。2001 年起，德国 Infineon 公司、美国 Cree 日本罗姆、新日本无线及瑞萨电子和意法半导体等厂商推出了 SiC 二极管产品。2013 年 9 月 29 日，碳化硅半导体国际学会“ICSCRM2013”召开，24 个国家的半导体企业、科研院校等 136 家单位与会，国际知名的半导体器件厂商，如科锐、三菱、罗姆、英飞凌、飞兆等在会议上均展示出了最新量产化的碳化硅器件。到现在已经有很多厂商生产碳化硅器件比如 Cree 公司、Microsemi 公司、Infineon 公司、Rohm 公司。

碳化硅器件的优势特性

碳化硅（SiC）是目前发展最成熟的宽禁带半导体材料，世界各国对 SiC 的研究非常重视，纷纷投入大量的人力物力积极发展，美国、欧洲、日本等不仅从国家层面上制定了相应的研究规划，而且一些国际电子业巨头也都投入巨资发展碳化硅半导体器件。与普通硅相比，采用碳化硅的元器件有如下特性：

高压特性：碳化硅器件是同等硅器件耐压的 10 倍，碳化硅肖特基管耐压可达 2400V。碳化硅场效应管耐压可达数万伏，且通态电阻并不很大。

高频特性。

高温特性：在 Si 材料已经接近理论性能极限的今天，SiC 功率器件因其高耐压、低损耗、高效率等特性，一直被视为“理想器件”而备受期待。然而，相对于以往的 Si 材质器件，SiC 功率器件在性能与成本间的平衡以及其对高工艺的需求，将成为 SiC 功率器件能否真正普及的关键。目前,低功耗的碳化硅器件已经从实验室进入了实用器件生产阶段。目前碳化硅圆片的价格还较高,其缺陷也多。

碳化硅的性能评价

几乎凡能读到的文章都是这样介绍碳化硅：碳化硅的能带间隔为硅的 2.8 倍（宽禁带），达到 3.09 电子伏特。其绝缘击穿场强为硅的 5.3 倍，高达 3.2MV/cm.其导热率是硅的 3.3 倍，为 49w/cm.k。由碳化硅制成的肖特基二极管及 MOS 场效应晶体管，与相同耐压的硅器件相比，其漂移电阻区的厚度薄了一个数量级。其杂质浓度可为硅的 2 个数量级。由此，碳化硅器件的单位面积的阻抗仅为硅器件的 100 分之一。它的漂移电阻几乎就等于器件的全部电阻。因而碳化硅器件的发热量极低。这有助于减少传导和开关损耗，工作频率一般也要比硅器件高 10 倍以上。此外，碳化硅半导体还有的固有的强抗辐射能力。近年利用碳化硅材料制作的 IGBT（绝缘栅双极晶体管）等功率器件，已可采用少子注入等工艺,使其通态阻抗减为通常硅器件的十分之一。再加上碳化硅器件本身发热量小，因而碳化硅器件的导热性能极优。还有，碳化硅功率器件可在 400℃ 的高温下正常工作。其可利用体积微小的器件控制很大的电流。工作电压也高得多。

氮化镓

目前主流的氮化镓生长技术基本是采用异质外延制备技术，将蓝宝石作为衬底，在其上面外延生长氮化镓材料，是光电子器件制备的主要方法，且技术最为成熟，已逐渐实现产业化。目前制备氮化镓外延层主要采用金属有机化学汽相沉积（MOCVD）、分子束外延技术（MBE）、卤化物气相外延（HVPE）以及悬空外延术（Pendeo-epitaxy）等技术，其中金属有机化学汽相沉积法技术层次最高，生长的外延层具备平整性好、高纯度、外延层薄、易于量产等优点。以三甲基镓作为金属有机（MO）源，将氨气（NH₃）做为氮源并以氢气（H₂）和氮气（N₂）或者以氮气和氢气的混合气体作为载气，将反应物载入 MOCVD 炉的反应腔并在适当的温度下发生反应，生成相应薄膜材料的分子团，在衬底表面上发生吸附、成核、生长等一系列过程，最后形成氮化镓的外延层。

氮化镓的优势特性

与第一代半导体材料硅（Si）和第二代半导体材料砷化镓（GaAs）相比，第三代半导体材料氮化镓（GaN）因具有禁带宽度大（3.39eV）、高强度的击穿电场、高漂移速度的饱和电子、

热高导率、较小的介电常数、耐高频、耐高压、耐高温、高光效、高功率、较强的抗辐射能力以及稳定的化学性质等优越性能，因而能制备出在高温下运行稳定，在高电压、高频率下更为可靠的半导体器件，该器件能以较少的电能消耗，而获得更强的运行能力。氮化镓契合节能减排、智能制造、信息安全等国家重大战略需求而成为未来电子信息产业的重要发展方向，成为全球半导体研究的前沿和产业竞争的焦点。氮化镓是制备高温、高频、大功率和高密度集成微波器件的首选材料之一，而因其存在特有的禁带宽度，可发射波长比红光更短的蓝光，能够制成高效的蓝、绿、紫、白光的发光二极管和光探测器件。氮化镓作为第三代半导体材料的典型代表，是战略新兴光电子信息与集成电路产业的关键材料和核心器件，是 5G 通信技术、绿色节能环保技术以及国防军工安全的科技制高点，是战略性新兴产业高地。

第三代半导体其他材料

氮化铝

AlN 材料是 III 族氮化物，具有 0.7~3.4eV 的直接带隙，可以广泛应用于光电子领域。与砷化镓等材料相比，覆盖的光谱带宽更大，尤其适合从深紫外到蓝光方面的应用，同时 III 族氮化物具有化学稳定性好、热传导性能优良、击穿电压高、介电常数低等优点，使得 III 族氮化物器件相对于硅、砷化镓、锗甚至碳化硅器件，可以在更高频率、更高功率、更高温度和恶劣环境下工作，是最具发展前景的一类半导体材料。AlN 材料具有宽禁带（6.2eV），高热导率（3.3W/cm·K），且与 AlGaN 层晶格匹配、热膨胀系数匹配都更好，所以 AlN 是制作先进高功率发光器件（LED，LD）、紫外探测器以及高功率高频电子器件的理想衬底材料。近年来，GaN 基蓝、绿光 LED、LD、紫外探测器以及大功率高频 HEMT 器件都有了很大发展。在 AlGaNHEMT 器件方面，AlN 与 GaN 材料相比有着更高的热导率，而且更容易实现半绝缘；与 SiC 相比，则晶格失配更小，可以大大降低器件结构中的缺陷密度，有效提高器件性能。

金刚石

金刚石是碳结晶为立方晶体结构的一种材料。在这种结构中，每个碳原子以“强有力”的刚性化学键与相邻的 4 个碳原子相连并组成一个四面体。金刚石晶体中，碳原子半径小，因而其单位体积键能很大，使它比其他材料硬度都高，是已知材料中硬度最高（维氏硬度可达 10400kg/mm^2 ）。另外，金刚石材料还具有禁带宽度大（ 5.5eV ）；热导率高，最高达 $120\text{W/cm}\cdot\text{K}$ （ -190°C ），一般可达 $20\text{W/cm}\cdot\text{K}$ （ 20°C ）；传声速度最高，介电常数小，介电强度高等特点。金刚石集力学、电学、热学、声学、光学、耐蚀等优异性能于一身，是目前最有发展前途的半导体材料。依据金刚石优良的特性，应用十分广泛，除传统的用于工具材料外，还可用于微电子、光电子、声学、传感等电子器件领域。

氧化锌

氧化锌（ ZnO ）是 II-VI 族纤锌矿结构的半导体材料，禁带宽度为 3.37eV ；另外，其激子束缚能（ 60meV ）比 GaN （ 24meV ）、 ZnS （ 39meV ）等材料高很多，如此高的激子束缚能使它在室温下稳定，不易被激发（室温下热离化能为 26meV ），降低了室温下的激射阈值，提高了 ZnO 材料的激发效率。基于这些特点， ZnO 材料既是一种宽禁带半导体，又是一种具有优异光电性能和压电性能的多功能晶体。它既适合制作高效率蓝色、紫外发光和探测器等光电器件，还可用于制造气敏器件、表面声波器件、透明大功率电子器件、发光显示和太阳能电池的窗口材料以及变阻器、压电转换器等。相对于 GaN ， ZnO 制造 LED、LD 更具优势，具预计， ZnO 基 LED 和 LD 的亮度将是 GaN 基 LED 和 LD 的 10 倍，而价格和能耗则只有后者的 $1/10$ 。 ZnO 材料以其优越的特性被广泛应用，受到各国极大关注。日、美、韩等发达国家已投入巨资支持 ZnO 材料的研究与发展，掀起世界 ZnO 研究热潮。

下游产品

碳化硅材料主要下游产品

碳化硅 MOS

SiC-MOSFETs SiC-MOSFET 是碳化硅电力电子器件研究中最受关注的器件。成果比较突出的就是美国的 Cree 公司和日本的 ROHM 公司。碳化硅 MOS 的结构碳化硅 MOSFET (SiCMOSFET) N+源区和 P 井掺杂都是采用离子注入的方式, 在 1700°C 温度中进行退火激活。另一个关键的工艺是碳化硅 MOS 栅氧化物的形成。由于碳化硅材料中同时有 Si 和 C 两种原子存在, 需要非常特殊的栅介质生长方法。SiC-MOSFET 采用沟槽结构可最大限度地发挥 SiC 的特性。

碳化硅 MOS 的优势

硅 IGBT 在一般情况下只能工作在 20kHz 以下的频率。由于受到材料的限制, 高压高频的硅器件无法实现。碳化硅 MOSFET 不仅适合于从 600V 到 10kV 的广泛电压范围, 同时具备单极型器件的卓越开关性能。相比于硅 IGBT, 碳化硅 MOSFET 在开关电路中不存在电流拖尾的情况具有更低的开关损耗和更高的工作频率。20kHz 的碳化硅 MOSFET 模块的损耗可以比 3kHz 的硅 IGBT 模块低一半, 50A 的碳化硅模块就可以替换 150A 的硅模块。显示了碳化硅 MOSFET 在工作频率和效率上的巨大优势。碳化硅 MOSFET 寄生体二极管具有极小的反向恢复时间 t_{rr} 和反向恢复电荷 Q_{rr} 。同一额定电流 900V 的器件, 碳化硅 MOSFET 寄生二极管反向电荷只有同等电压规格硅基 MOSFET 的 5%。对于桥式电路来说 (特别当 LLC 变换器工作在高于谐振频率的时候), 这个指标非常关键, 它可以减小死区时间以及体二极管的反向恢复带来的损耗和噪音, 便于提高开关工作频率。

碳化硅肖特基二极管

碳化硅肖特基二极管 (SiCSBD) 的器件采用了结势垒肖特基二极管结构 (JBS), 可以有效降低反向漏电流, 具备更好的耐高压能力。

碳化硅肖特基二极管优势

碳化硅肖特基二极管是一种单极型器件，因此相比于传统的硅快恢复二极管（SiFRD），碳化硅肖特基二极管具有理想的反向恢复特性。在器件从正向导通向反向阻断转换时，几乎没有反向恢复电流，反向恢复时间小于 20ns，甚至 600V10A 的碳化硅肖特基二极管的反向恢复时间在 10ns 以内。因此碳化硅肖特基二极管可以工作在更高的频率，在相同频率下具有更高的效率。另一个重要的特点是碳化硅肖特基二极管具有正的温度系数，随着温度的上升电阻也逐渐上升，这与硅 FRD 正好相反。这使得碳化硅肖特基二极管非常适合并联实用，增加了系统的安全性和可靠性。概括碳化硅肖特基二极管的主要优势，有如下特点：1）几乎无开关损耗；2）更高的开关频率；3）更高的效率；4）更高的工作温度；5）正的温度系数，适合于并联工作；6）开关特性几乎与温度无关碳化。

氮化镓材料主要下游产品

氮化镓的主要下游产品包括二极管、场效电晶体（MOSFET）、高电子迁移率晶体管（HEMT）等。随着氮化镓（GaN）在二极管、场效电晶体（MOSFET）、高电子迁移率晶体管（HEMT）等元件上的不断应用，特别是近年来随着氮化镓广泛被应用于 LED 照明、固态紫外探测、电子电力、射频微波、手机快充、新能源汽车、轨道交通、智能电网、消费类电子以及 5G 移动通讯市场等领域，氮化镓被视为引领半导体技术革命的先锋，被视为支撑新能源、轨道交通、电子信息、国防军工等战略性新兴产业发展的核心技术。氮化镓（GaN）器件的市场规模预计将从 2016 年的 165 亿美元复合年增长率（CAGR）升至 4.6%，至 2023 年的 224.7 亿美元。驱动 GaN 功率器件行业增长的主要动力为：氮化镓在消费电子和汽车领域具有广阔的市场潜力；氮化镓材料的宽带隙特性促进了创新应用；氮化镓在 RF 功率电子领域的成功应用；军事、国防、航空航天应用领域增加对氮化镓 RF 半导体器件的采用。电信垂直行业预计将占据 GaN 功率器件市场的最大份额，而 5G 技术将从 2019 年起对电信行业产生积极的影响，预计 5G 技术的需求将在 2021 和 2022 年全面爆发，这将进一步推动 GaN 功率器件市场的增长。而我国“新基建”的提速也将为氮化镓产业的发展提供宝贵的机遇。

氮化铝材料主要下游产品

氮化铝 AlN 是生长 III 族氮化物外延层及器件结构的理想衬底，其优点包括：与 GaN 有很小的晶格失配和热膨胀系数失配；化学性质相容；晶体结构相同，不出现层错层；同样有极化表面；由于有很高的稳定性并且没有其它元素存在，很少会有因衬底造成的沾污。AlN 材料能够改善器件性能，提高器件档次，其主要下游产品包括以下一些：

美国的 TDI 公司是目前完全掌握 HVPE 法制备 AlN 基片技术，并实现产业化的唯一单位。TDI 的 AlN 基片是在 SiC 或蓝宝石衬底上淀积 10~30 μ m 的电绝缘 AlN 层。主要用作低缺陷电绝缘衬底，用于制作高功率的 AlGaIn 基 HEMT。目前已经有 2、3、4、6 英寸产品。日本的 AlN 技术研究单位主要有东京农工大学、三重大学、NGK 公司、名城大学等，已经取得了一定成果，但还没有成熟的产品出现。另外俄罗斯的约菲所、瑞典的林雪平大学在 HVPE 法生长 AlN 方面也有一定的研究水平，俄罗斯 NitrideCrystal 公司也已经研制出直径达到 15mm 的 PVTAIn 单晶样品。在国内，AlN 方面的研究较国外明显滞后，一些科研单位在 AlN/MOCVD 外延生长方面，也有了初步的探索，但都没有明显的突破及成果。

氧化锌材料主要下游产品

氧化锌的下游产品包括：日本已生长出直径达 2 英寸的高质量 ZnO 单晶；我国有采用 CVT 法已生长出了直径 32mm 和直径 45mm、4mm 厚的 ZnO 单晶。材料技术的进步同时引导和推进器件技术的进步，日本研制出基于 ZnO 同质 PN 结的电致发光 LED；我国也成功制备出国际首个同质 ZnO-LED 原型器件，实现了室温下电注入发光。器件制备技术的进步，推动 ZnO 半导体材料实用化进程，由于其独特的优势，在国防建设和国民经济上将有很重要的应用，前景无限。

应用领域及市场动态

碳化硅 MOS 管的应用领域

碳化硅 MOSFET 模块在光伏、风电、电动汽车及轨道交通等中高功率电力系统应用上具有巨大的优势。碳化硅器件的高压高频和高效率的优势，可以突破现有电动汽车电机设计上因器件性能而受到的限制，这是目前国内外电动汽车电机领域研发的重点。如电装和丰田合作开发的混合动力汽车（HEV）、纯电动汽车（EV）内功率控制单元（PCU），使用碳化硅 MOSFET 模块，体积比减小到 1/5。三菱开发的 EV 马达驱动系统，使用 SiC MOSFET 模块，功率驱动模块集成到了电机内，实现了一体化和小型化目标。预计在 2018 年-2020 年碳化硅 MOSFET 模块将广泛应用在国内外的电动汽车上。

目前碳化硅的应用面临的主要问题涵盖以下几个方面，现对其做一解读。

碳化硅晶片的微管缺陷密度

微管是一种肉眼都可以看得见的宏观缺陷，在碳化硅晶体生长技术发展能彻底消除微管缺陷之前，大功率电力电子器件就难以用碳化硅来制造。尽管优质晶片的微管密度已达到不超过 15cm^{-2} 的水平。但器件制造要求直径超过 100mm 的碳化硅晶体，微管密度低于 0.5cm^{-2} 。

外延工艺效率低

碳化硅的气相同质外延一般要在 1500°C 以上的高温下进行。由于有升华的问题，温度不能太高，一般不能超过 1800°C ，因而生长速率较低。液相外延温度较低、速率较高，但产量较低。

掺杂工艺有特殊要求

如用扩散方法进行掺杂，碳化硅扩散温度远高于硅，此时掩蔽用的 SiO_2 层已失去了掩蔽作用，而且碳化硅本身在这样的高温下也不稳定，因此不宜采用扩散法掺杂，而要用离子注入掺杂。如果 p 型离子注入的杂质使用铝。由于铝原子比碳原子大得多，注入对晶格的损伤和杂质处于未激活状态的情况都比较严重，往往要在相当高的衬底温度下进行，并在更高的温度下

退火。这样就带来了晶片表面碳化硅分解、硅原子升华的问题。目前，p 型离子注入的问题还比较多，从杂质选择到退火温度的一系列工艺参数都还需要优化。

欧姆接触的制作

欧姆接触是器件电极引出十分重要的一项工艺。在碳化硅晶片上制造金属电极，要求接触电阻低于 $10^{-5}\Omega\text{cm}^2$ ，电极材料用 Ni 和 Al 可以达到，但在 100°C 以上时热稳定性较差。采用 Al/Ni/W/Au 复合电极可以把热稳定性提高到 600°C 、100h，不过其接触比电阻高达 $10^{-3}\Omega\text{cm}^2$ 。所以要形成好的碳化硅的欧姆接触比较难。

高温问题

碳化硅芯片可在 600°C 温度下工作，但与其配套的材料就不见得能耐此高温。例如，电极材料、焊料、外壳、绝缘材料等都限制了工作温度的提高。以上仅举数例，不是全部。还有很多工艺问题还没有理想的解决办法，如碳化硅半导体表面挖槽工艺、终端钝化工艺、栅氧层的界面态对碳化硅 MOSFET 器件的长期稳定性影响方面，行业中还有没有达成一致的结论等，大大阻碍了碳化硅功率器件的快速发展。

早在 20 世纪 60 年代，碳化硅器件的优点已经为人们所熟知。之所以目前尚未推广普及，是因为存在着许多包括制造在内的许多技术问题。直到现在 SIC 材料的工业应用主要是作为磨料（金刚砂）使用。SIC 在能够控制的压力范围内不会融化，而是在约 2500°C 的升华点上直接转变为气态。所以 SIC 单晶的生长只能从气相开始，这个过程比 SI 的生长要复杂的多，SI 在大约 1400°C 左右就会熔化。使 SIC 技术不能取得商业成功的主要障碍是缺少一种合适的用于工业化生产功率半导体器件的衬底材料。对 SI 的情况,单晶衬底经常指硅片（wafer），它是从事生产的前提和保证。一种生长大面积 SIC 衬底的方法已在 20 世纪 70 年代末研制成功。但是用改进的称为 Lely 方法生长的衬底被一种微管缺陷所困扰。只要一根微管穿过高压 PN 结就会破坏 PN 结阻断电压的能力，在过去三年中，这种缺陷密度已从每平方毫米几万根降到几十根。除了这种改进外，当器件的最大尺寸被限制在几个平方毫米时，生产成品率可能在大于百分之几，这样每个器件的最大额定电流为几个安培。因此在 SIC 功率器件取得商业化成功之前需要对 SIC 的衬底材料作更大技术改进。现在 SIC 材料，光电子器件已满足要求，已经不受材料质量影响，器件的工业生产成品率，可靠性等性能也符合要求。高频器件主要包括

MOSFETSCHOTTKY 二极管内的单极器件。SiC 材料的微管缺陷密度基本达到要求，仅对成品率还有一定影响。高压大功率器件用 SiC 材料大约还要二年的时间，进一步改善材料缺陷密度。总之不论现在存在什么困难，半导体如何发展，SiC 无疑是新世纪一种充满希望的材料。

碳化硅肖特基二极管的应用领域

碳化硅肖特基二极管可广泛应用于开关电源、功率因素校正（PFC）电路、不间断电源（UPS）、光伏逆变器等中高功率领域，可显著的减少电路的损耗，提高电路的工作频率。在 PFC 电路中用碳化硅 SBD 取代原来的硅 FRD，可使电路工作在 300kHz 以上，效率基本保持不变，而相比下使用硅 FRD 的电路在 100kHz 以上的效率急剧下降。随着工作频率的提高，电感等无源原件的体积相应下降，整个电路板的体积下降 30%以上。

氮化镓材料应用领域

随着电力电子、新能源、电动汽车、5G 通讯、高速轨道列车、能源互联网和智能工业等领域的火热，无线充电、无人驾驶汽车用激光雷达、数据中心等应用的兴起，对功率器件的性能提出了新的需求。但传统的硅器件因受材料特性影响已达到物理极限，在性能方面已无法满足新兴的需求，所以在摩尔定律驱动下寻求下一个替代者已刻不容缓，于是国际半导体大厂纷纷将目光投向因电学性能优异而被认为是新一代半导体材料贵族的氮化镓。关于氮化镓器件的收购并购、产业整合等正不断发生，氮化镓功率半导体日益成为世人瞩目的焦点。

美国于 2002 年、欧洲于 2007 年分别启动了氮化镓功率半导体推动计划，并于 2007 年在 6 英寸硅衬底上首次长出了氮化镓，开启了从应用端推进氮化镓器件发展的先河。2013 年硅基氮化镓功率器件首次通过了 JEDEC（固态技术协会，是微电子产业的领导标准机构）质量标准的认证，同年中国科技部将大力发展第三代半导体列入 863 计划。法国电子、微电子及纳米技术研究院（IEMN）的 FaridMedjdoub 博士率领团队于 2017 年制造出了具有超过 1400V 击穿电

压的氮化镓器件，并在两款不同的硅基氮化镓外延片产品上完成了测试。其中一款外延片实现了 1400V 以上的纵向和 1600V 的横向（接地）击穿电压。另一款外延片产品是 ALLOS 公司针对 600V 应用推出的成熟产品，同样实现了非常高的（1200V）击穿电压，且横向和纵向测量值更高。

瑞士洛桑联邦理工学院的研发人员首次将氮化镓材料成功应用于平面栅极场效应晶体管，该器件采用了栅极与沟道在相同平面的设计，并且沟道和栅极之间没有氧化层隔离，而是采用了空气隔离的结构，主要用于高频射频。依托中科院苏州纳米所而建立的中国首家氮化镓衬底晶片供应商苏州纳维科技有限公司，已成功研制出 1 英寸至 6 英寸的氮化镓单晶材料，成功实现了氮化镓单晶材料生长的补偿掺杂和 n 型掺杂。

苏州纳维科技有限公司成功研制出的氮化镓单晶具有高电导率和半绝缘性，其块体材料和电子迁移率结晶质量等综合指标均达到国际前列，其 2 英寸氮化镓单晶产品的质量被《应用物理》杂志评为国际第一。苏州纳维科技有限公司 2 英寸氮化镓产品已开始大规模量产，其 4 英寸氮化镓单晶衬底也于 2017 年在国际上率先推出，客户覆盖了海内外 80% 以上的研究机构和生产企业。

珠海英诺赛科 8 英寸硅基氮化镓电力电子器件量产线于 2017 年 11 月 9 日在珠海正式通线，该生产线是全球首条 8 英寸硅基氮化镓量产线，意味着国内企业在宽禁带半导体的竞争中走在了世界的前列。英诺赛科公司现已经拥有世界领先的 8 英寸硅基氮化镓外延技术，成功突破了低翘曲度、低缺陷及位错密度、低漏电等晶圆制造的全球性难题，产品将广泛应用于智慧电网、新能源汽车、智能工业、5G 通信、高速列车等领域。高性能射频、微波、毫米波和光波半导体产品的领先供应商 MACOM 和横跨多个电子应用领域的全球半导体领先供应商意法半导体（ST）携手将硅基氮化镓引入了主流的射频市场，由 ST 负责生产，供 MACOM 在各种射频应用中使用，ST 于 2018 年底前开始样片的生产，该项合作标志着 MACOM 拉开了射频行业转向氮化镓技术的帷幕。

氮化镓的大尺寸单晶生长技术还不成熟，导致许多 GaN 物理特性（包括量子阱结构的发光机制、热压和压电效应等）的解释都不成熟，制约了器件研究的进一步发展，有待进一步的研究改进。GaN 材料的缺陷导致临界击穿电场下降、Bufer 衬底漏电等，致使 GaN 功率器件无法达到其材料理论极限。氮化镓属于宽禁带半导体，因其极性太大，通过高掺杂的方式来获得

具有较好金属半导体的欧姆接触是非常困难的，这是 GaN 器件制造中的一个难题，故欧姆接触的制作结果决定了 GaN 器件的好坏。氮化镓与蓝宝石、碳化硅等衬片之间的不匹配导致器件的寿命缩短、阈值电流上升、性能下降、发热量增大等一系列问题，所以继续寻找合适的衬片，提高氮化镓的质量仍然是今后研究的热点。

市场动态

碳化硅、氮化镓市场商机巨大 厂商如何把握？

第三代半导体材料受市场关注，包括碳化硅（SiC）材料以及氮化镓（GaN）产品，台积电也于近期宣布与意法半导体合作切入氮化镓市场，半导体业者包括环球晶、合晶、太极、嘉晶以及母公司汉磊、茂硅、世界、精材等厂商开始也切入此领域。

随着此类第三代半导体材料具有更高效节能、更高功率等优势，更适用在 5G 通讯、超高压产品如电动车领域，未来市场成长看好，但事实上，碳化硅以及氮化镓产品在市场上已久，但一直未可大量量产，技术上进入门槛相当高，市场商机是否都可雨露均沾，恐怕仍有考验。

第三代半导体材料市场潜力看好

据半导体材料分类，第一代半导体材料包括锗以及硅，也是目前最大宗的半导体材料，成本相对便宜，制程技术也最为成熟，应用领域在信息产业以及微电子产业；第二代半导体材料则包括 GaAs 以及磷化铟，主要应用在通讯产业以及照明产业；而第三代半导体则以碳化硅以及氮化镓为代表，则可应用在更高阶的高压功率元件以及高频通讯元件领域。至于碳化硅以及氮化镓虽然同为第三代半导体材料，但应用略有不同，氮化镓主要用在中压领域约 600 伏特的产品，一部分会与硅材料的市场重叠，但氮化镓有很好的移动性，适用在频率高的产品，此特性在基地台、5G 等高速产品就会很有优势；而碳化硅则可以用在更高压，如上千伏的产品，包括电动车用、高铁或工业用途，具有很好的耐高温以及高压特性。也因如此，以碳化硅晶圆为例，市场更看好其在车用市场的应用，包括充电桩、新能源车以及马达驱动等领域，据市调机构 Yole Developpement 表示，碳化硅晶圆到 2023 年时市场规模可达 15 亿美金，年复合成长率

逾 31%；而用在通讯元件领域，到 2023 年市场也可达 13 亿美金，年复合成长率则可达 23%，商机受瞩。

最大挑战：量产难度高

也因为第三代半导体材料后市看俏，所以也有不少厂商很早就开始投入研发，可望成为下一代的明日之星，要生产一片碳化硅晶圆并不难，困难的是要怎么从一片到一百片、一千片的量产能力，这些都受限技术、专利以及成本门槛，造成量产的挑战。以碳化硅来说，技术难度在于第一、在长晶的源头晶种来源就要求相当高的纯度、取得困难。

第二，长晶的时间相当长，以一般硅材料长晶来说，平均约 3—4 天即可长成一根晶棒，但碳化硅晶棒则约需要 7 天，由于长晶过程中要随着监测温度以及制程的稳定，以免良率不佳，故时间拉长更增添长晶制作过程中的难度。第三则是长晶棒的生成，一般的硅晶棒约可有 200 公分的长度，但长一根碳化硅的长晶棒只能长出 2 公分，造成量产的困难。打群架较容易突破困局虽然第一代的硅材料原料上取得方便，制程技术又相对成熟，但在高频高压的应用领域上，效能不如碳化硅或氮化镓产品，随着 5G 等应用领域扩大，第一代的硅材料优势受到压抑，而第三代半导体材料的成长将成为趋势，使业者不得不关注并切入此领域。但除了技术和生产上的困难外，材料的开发还是需要下游应用的配合，所以单独切入研发相对困难，还是需要上下游的互相合作，合晶则表示，公司一直有在关注碳化硅或氮化镓，也认同此为趋势上的产品，目前也启动策略合作的评估，未来会需要打群架，如 CREE 与英飞凌结盟，除了技术上的合作，更可以确保未来上游材料的取得以及下游确保出海口。

第三代半导体：氮化镓加速商用进程

今年以来，氮化镓（GaN）快充成为“网红”产品，受到小米、OPPO、魅族等手机厂商的“热捧”。氮化镓在消费电子领域迅速起量的同时，其应用范围也在持续扩展，正向新基建所涉及的 5G、数据中心、新能源汽车等领域渗透。新基建将如何赋能氮化镓，我国企业该如何抓住氮化镓的成长契机，利用好市场窗口？

5G 可率先打开商用空间

由于氮化镓具备高频率、高功率密度、损耗小等优势，射频器件成为氮化镓最有前景的应用领域之一。5G 时代，氮化镓将加速渗透基站所需的射频功率放大器（PA）。

集邦咨询指出，由于硅材料存在高频损耗、噪声大和低输出功率密度等特点，RF CMOS 已经不能满足要求。GaN 材料凭借高频、高输出功率的优势，将逐步替代 Si LDMOS，大幅运用于 PA。市场研究机构 Yole 在报告中指出，5G 商用宏基站以 64 通道的大规模阵列天线为主，单基站 PA 需求达到 192 个。2019 年全球 GaN 射频器件市场规模达到 5.27 亿美元，预计 2023 年将达到 13.24 亿美元。

“5G 对氮化镓的需求增长是非常明显的，5G 基站所需的 PA，为氮化镓带来了绝佳的市场机遇。随着硅的性能开发逼近极限，氮化镓替代硅切入更大带宽、更高频率的工作场景，使氮化镓的优势能充分发挥出来，这是一个技术换代带来的市场机会。”苏州能讯高能半导体有限公司董事总经理任勉向《中国电子报》记者表示。

今年 3 月，工业和信息化部在《关于推动 5G 加快发展的通知》中指出，将适时发布部分 5G 毫米波频段、频率使用规划。任勉表示，毫米波基站对射频功率器件的需求，比当前的宏基站市场更为可观，将为氮化镓带来更加庞大的市场增量。

当前，我国企业已经在 5G 氮化镓射频功率器件有所布局。苏州能讯高能半导体已建成 4 英寸氮化镓芯片产线，产能达到 25000 片 4 英寸氮化镓晶圆，以迎接 5G 无线通信对氮化镓射频芯片的市场需求。海特高新在 5G 宏基站的射频 GaN 已实现突破，在流片工艺上，已可实现代工制造。英诺赛科、赛微电子等企业也在积极开展相关布局。

高效率特性赋能数据中心

在电力电子领域，氮化镓充电器的市场热度不减。除了追求高频率、小体积的快充市场，氮化镓在数据中心服务器电源、高端工业配电系统电源等领域也有着应用潜能。

对于数据中心，服务器运行所需的电能往往占据运营成本的“大头”，如何提升能效比成为现代数据中心的关键课题。任勉指出，相对快充等体积敏感的应用领域，服务器电源将更好地发挥氮化镓高效率、低功耗的优势。

“氮化镓最大的特点是功率转化效率高。尤其在数据中心等高能耗的使用场景下，氮化镓凭借高效率的优势，将带来显著的节能效果。”任勉说。

根据数据中心运营商 GaN Systems 测算，GaN 器件用于从 AC（交流电）到 DC（直流电）的电源转换，以及转换负载的 DC 电源，可以将整体效率从使用硅器件的 77% 提高到 84%，使数据中心的功率密度增加 25% 以上，并将单个机架的电力成本降低 2300 美元以上。

新能源汽车应用进入研发期

在车规级市场，同为第三代半导体的碳化硅已经实现应用，但氮化镓还处于研发阶段。目前，用于新能源汽车的功率器件主要有三个领域：一是电机控制器，用于驱动及控制系统；二是 OBC（车载充电器），将交流电转化为可以被新能源汽车动力电池使用的直流电；三是 DC-DC 直流转换器，将动力电池的直流电转换为低压直流电，给仪表盘、显示屏、监控系统等车载设备供电。专家表示，以当前的技术水平来看，氮化镓用于 DC-DC 直流转换器这个细分领域有着较为明显的优势。

安世半导体 MOS 业务集团大中华区总监李东岳向《中国电子报》记者表示，电动汽车对高效率、高功率密度有着严苛的要求。通过节约零组件对车内空间的占用，让乘坐空间更加舒适。针对高功率密度、强续航能力等需求，目前的硅功率半导体材料器件已经发展到瓶颈期。氮化镓器件的开关速度比硅 MOSFET 快很多，在高效率和高功率密度方面更能符合电动汽车的需求。

当前，头部厂商对车规氮化镓多处于研发阶段。安世半导体正在研发用于高压 DC-DC 直流转换器、OBC 等车用氮化镓产品；意法半导体看好氮化镓在 OBC 及 48V 直流转换器的潜力，并于今年宣布与台积电合作，共同推进氮化镓在汽车电气化领域的应用；纳微半导体在去年路演中表示，其 GaN FET 相关产品和技术可用于电动汽车和混合动力车的 OBC 和 DC-DC 转换器，可以降低能量损耗并提升开关速度，使车辆实现更快的速度和更长的里程。

“车规功率器件的认证，从 A Sample 到 B Sample 到 C Sample，不管是可靠性还是方案的成熟度，都需要一定的验证时间。目前氮化镓在车规领域的应用还处于初级阶段，但未来几年预计会呈现递进式的增长。”李东岳说。

GaN 应用多项挑战待解

虽然氮化镓在多个新基建领域具备应用前景，但其仍处于发展初期，在技术开发、产品验证、市场渗透等方面，还有待进一步催熟和突破。

任勉指出，在 5G 射频领域，射频的技术壁垒比电力电子高得多。电力电子工艺主要涉及材料、器件设计、前道工艺和后道封测。但射频器件多了一个电磁波的技术维度，涉及射频电路、射频功放以及微波电子等，技术门槛更高。

在车用领域，李东岳表示，主要存在四方面的挑战：一是车用领域的功率要求波动较大，需要在所有工况下，保持器件参数的长期稳定；二是车规功率器件长期处于高振动、高湿度、高温度的工作环境，要求器件在应对热应力和机械应力的过程中有着极高的可靠性；三是车在装备的过程中，在体积重量和制造成本上都有严格的要求，功率器件必须契合汽车装备本身的需要；四是车规器件需要做到 15 年到 20 年的使用寿命，技术门槛很高。

对于我国企业该如何利用好 5G 等新基建领域为氮化镓带来市场机遇，集邦咨询分析师王尊民表示，在 5G 基站及数据中心服务器等使用场景，相关技术仍受国际大厂控制，因此我国厂商在其中参与的机会比较少。

“目前，我国厂商若要紧随新基建的发展趋势，首先要强化自身的制造与技术研发能力，例如 RF 通讯、电力传输的制造实力，才会逐步在相关应用领域站稳脚跟。”王尊民说。

任勉指出，面向 5G 等领域的需求，我国氮化镓相关企业要提前三到五年布局，进行五年左右的技术积累和三年左右的产能建设。“市场窗口往往稍纵即逝，一旦市场格局成形，企业再想进入并获得市场主动权，就会比较困难。要提前准备技术、产能、人才，提升布局效率，抓紧时间切入。”任勉说。

国内首条碳化硅全产业链生产线 在长沙高新区落地

近日，投资 160 亿元，占地面积 1000 亩的“三安光电第三代半导体产业园”，在长沙高新区启动开工建设。该产业园主要用于建设具自主知识产权的衬底（碳化硅）、外延、芯片及封装产业生产基地。这里，也将诞生我国首条碳化硅全产业链生产线。

第三代半导体材料及器件，是当前全球半导体材料产业的研究热点。其中，碳化硅、氮化镓是第三代半导体材料中成熟商用材料的典型代表，也是能源高效率、高频率新型电力电子芯片的重点新材料，在新能源汽车、5G、智能电网、高速轨道交通、半导体照明、航天等领域有重要应用价值。

此次开工建设的半导体产业园，着力打造世界级化合物功率芯片研发、制造与服务基地。产业园建成后，将形成我国首条碳化硅全产业链生产线，研发 6 英寸碳化硅导电衬底、4 英寸半绝缘衬底、碳化硅二极管外延等。达产后，还有望形成超 100 亿元的产业规模，带动上下游配套产业产值超 1000 亿元，创造就业岗位超万个。

长沙高新区党工委书记周庆年称，第三代半导体产业园项目是长沙市委市政府举全市之力，引进的具全局性、基础性、战略性影响的重大项目。这一项目的落地，对长沙发展第三代半导体产业，优化“三智一芯”战略布局，和奠定长沙在全球碳化硅市场和化合物半导体领域的领先地位有重要影响和意义。