



CASA

第三代半导体产业技术创新战略联盟

China advanced semiconductor industry
innovation alliance

GaN微波射频技术路线图

2020版

第三代半导体产业技术创新战略联盟

2020年6月

GaN 微波射频技术路线图（2020 版）

编委会名单

顾问：

郝跃、沈波、蔡树军、张乃千

统稿人：

张进成

分报告主笔人：

衬底、外延组：张进成

器件组：张志国

封装模块组：张志国、于洪宇

应用技术组：钱洪途、黄伟

专利分析组：段小玲、汪勇

编委会成员（按姓氏笔画排序）：

于坤山、于洪宇、毛维、刘爽、刘志宏、刘晓雨、阮军、朱航欧、何元浩、李仲扬、李刚、李小佳、李娟、李海燕、汪青、汪勇、吴阿惠、张志国、张进成、杨兰芳、杨斌、杨学林、杨凌、房玉龙、周弘、郑雪峰、段小玲、郝玉蕾、郝建群、赵璐冰、钱洪途、黄伟、董毅敏、蔡道民

GaN 微波射频技术路线图（2020 版）

合作单位名单

高校（按笔画排序）:

北京大学

西安电子科技大学

南方科技大学

复旦大学

厦门大学

科研院所（按笔画排序）:

中国电子科技集团第十三研究所

陕西半导体与集成电路发展研究中心

深圳第三代半导体研究院

企业（按笔画排序）:

北京华创智道知识产权咨询服务有限公司

北京国联万众半导体科技有限公司

苏州能讯高能半导体有限公司

序言

随着 5G 网络应用的到来和国防军事领域的应用需求，特别是近期 5G 成为新基建的核心内容之一，预示着 GaN 微波射频市场将快速发展。2019 年是 5G 元年，全球已经有超过 100 个国家进行 5G 网络部署，美国、日本、韩国、中国及欧洲地区的 5G 部署进入落地阶段。5G 具有大容量、低时延、低功耗、高可靠性等特点，要求射频器件拥有更高的线性和更高的效率，相比现有的硅 LDMOS 和 GaAs 解决方案，GaN 能够提供下一代高频电信网络所需要的功率和效能，将成为无线通信基站放大器的主流选择。另外，GaN 基微波射频器件高频、高功率的优点还特别适用于卫星通信、超宽频带通信（如有线电视）、微波中继通信等各种商用无线通信领域。

我国是全球最大的移动通信市场，国内市场需求庞大，但国产器件渗透较低，高校和研究机构虽具备 GaN 微波射频技术积累，但仍存在不少技术问题亟待解决。因此联盟于 2019 年组织国内大学、科研院所、优势企业的知名教授、学者和专家，成立了编写小组，正式启动了《第三代半导体微波射频技术路线图》的编制工作。自编写工作开展以来，工作组多次召开编写研讨会，通过采取远程会议、专项会议讨论、专家咨询等多种方式，对初稿进行了反复修改。在全体工作组成员的共同努力下，《第三代半导体微波射频技术路线图》（2020 版）终于要正式发布。

本次发布的路线图，主要聚焦于微波射频领域，主要涉及民用商业方面（无线基础设施如基站等、无人驾驶、卫星通信、有线电视等）以及军事国防（包括相控雷达、电子对抗、导弹和无线电通信等）两

大方面，由于时间和编写组成员所属专业领域的限制，肯定存在遗漏和谬误之处，希望各位读者批评指正，我们将在后续的版本中不断修订。我们希望通过产业背景、产业发展和技术路线的分析和预判，为业内提供参考，为国内 GaN 微波射频产业发展提供支撑。

技术路线图的编写是一项纯公益事业，在此郑重对所有积极参与技术路线图编写的顾问，编委及组织团队所做的非常繁杂和艰辛的工作表示衷心的感谢！感谢专家团队的大力支持！感谢张进成、张志国、于洪宇、黄伟、钱洪途、蔡道民、董毅敏、吴阿惠、段小玲、汪青、汪勇等代表 4 个工作组执笔报告。感谢张进成统稿！感谢感谢西安电子科技大学、中国电科 13 所、复旦大学、南方科技大学、苏州能讯高能半导体有限公司、陕西半导体与集成电路发展研究中心、北京华创智道知识产权咨询服务有限公司等高校、科研院所及企业的大力支持！这个过程全部是自愿自发！感谢大家的辛勤付出！感谢大家为了行业发展而自愿背负的压力及责任！因时间仓促和能力水平有限，不足之处还请批评指正！

深信在国家的支持和推动下，在第三代半导体同仁们的同心协办和共同奋斗下，我国第三代半导体技术及产业一定会实现快速发展，我们的努力一定会为中国从制造大国发展到强国增添动力！

吴 玲

第三代半导体产业技术创新战略联盟理事长

2020 年 5 月

目 录

1 产业及市场发展现状与趋势	1
1.1 概述.....	1
1.2 发展背景及产业现状	2
1.2.1 国外发展历程及典型企业	2
1.2.2 国内发展历程及典型机构	4
1.3 市场现状及预测	5
1.3.1 整体市场	5
1.3.2 细分应用	6
2 技术发展趋势分析	9
2.1 衬底、外延技术发展趋势	10
2.1.1 技术发展驱动力综述	11
2.1.2 关键技术发展趋势	12
2.2 器件技术发展趋势	25
2.2.1 技术发展驱动力综述	26
2.2.2 关键技术发展趋势	26
2.3 封装模块技术发展趋势	35
2.3.1 封装形式	35
2.3.2 技术发展驱动力综述	36
2.3.3 关键技术发展趋势	37
2.4 应用技术发展趋势分析	45
2.4.1 GaN 射频器件的现状.....	45
2.4.2 GaN 射频器件的发展趋势.....	47
2.4.3 GaN 射频器件应用的整体技术路线.....	49

2.4.4	民用通信领域技术路线	53
2.4.5	射频能量技术路线	55
2.4.6	军事国防领域技术路线	56
2.4.7	其他细分领域技术路线	57
3	GaN 微波射频技术专利分析	58
3.1	专利数据简述	58
3.2	专利分析	59
3.2.1	专利态势分析	60
3.2.2	申请人分析	62
3.3	专利地图	64
3.4	结论	65
4	产业技术路线图	67
4.1	市场发展路线图	67
4.2	产品发展路线图	67
4.3	技术发展路线图	71
4.4	GaN 射频技术路线图总图	74
4.4.1	第一阶段（2022 年）	75
4.4.2	第二阶段（2025 年）	75
4.4.3	第三阶段（2030 年）	76
4.5	发展建议	77

1 产业及市场发展现状与趋势

1.1 概述

以氮化镓（GaN）材料为基础的微波射频器件近年来得到蓬勃发展。与以硅（Si）为代表的第一代半导体材料、以砷化镓（GaAs）为代表的第二代半导体材料相比，第三代半导体 GaN 微波射频（RF）器件具有高输出功率、高效率、高频率、大带宽、可高温环境工作、抗辐照能力强等优良特性，是迄今为止最为理想的微波功率器件，因此成为 4G/5G 移动通信系统、新一代有源相控阵雷达等系统中首选的核心微波射频器件。

GaN 微波射频器件的典型器件结构是高电子迁移率晶体管（HEMT）。自从 1993 年美国南卡州立大学 Khan 报道了第一个具有直流特性的 GaN HEMT 电子器件以来，GaN 微波射频 HEMT 器件的学术研究和产业开发有了快速发展。GaN 微波功率器件在 2006 年后开始进行商业应用，目前正向更高频如 W 和 THz 波段发展；GaN 单片微波集成电路（MMIC）也在快速发展，产品的寿命也达到商业应用的标准。

在军事领域，GaN 射频功率器件主要应用于电子对抗、相控阵雷达、精确制导、微波通信等领域。采用 GaN 器件的雷达，相比传统 Si 器件和 GaAs 器件雷达，看的更远（超远距离探测），看的更清（反隐身）。谁能更快更好的掌握 GaN 技术，谁将掌握战场感知的主动权。

在民用领域，由于 GaN 器件能够在中低段频率和功率上全部覆

盖现有其它材料的半导体器件（如图 1-1 所示），GaN 技术将是 5G 时代基站微波功率放大器（PA，power amplifier）的最佳选择。GaN 成为各国在 5G 时代争夺的核心器件技术制高点。

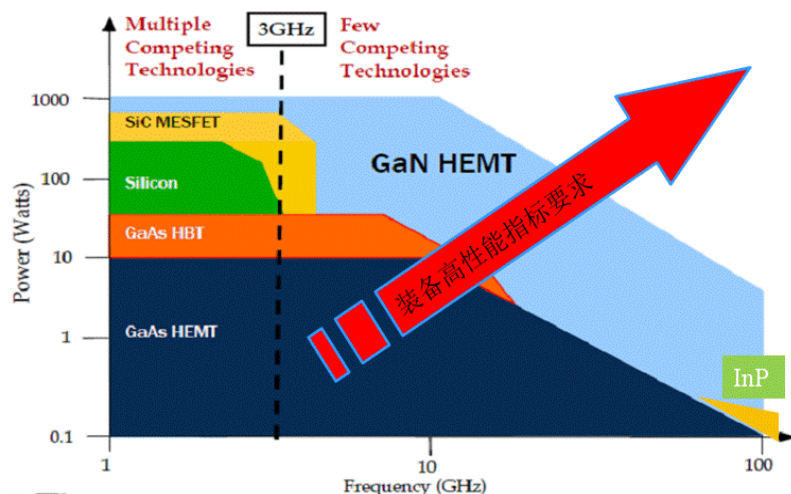


图 1-1 现有半导体材料在射频领域的能力对比

资料来源: Yole Development

1.2 发展背景及产业现状

1.2.1 国外发展历程及主要企业

国际上宽禁带半导体微波射频器件的研究始于 20 世纪 90 年代初。目前 GaN 已成为全球微波射频半导体产业的前沿和热点，是各国竞相占领的战略技术制高点。

美国政府、学术界、工业界均对 GaN 微波射频器件高度重视。2002 年之前主要是学术界进行探索研究，1993 年南卡州立大学报道了国际上第一只 GaN HEMT 器件，1996 年美国 UCSB 大学报道了第一只具有微波特性的 GaN HEMT，2001 年美国报道了 SiC 基 GaN 射频微波器件在 10GHz 下功率密度达到 10.7W/mm。2002 年之后美国军方开始大力支持 GaN 射频器件研发，先后制定了两个庞大的研究

计划。2002 年，美国国防部先进研究项目局 (DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency) 意识到 GaN 材料在微波/毫米波段领域的巨大潜力，制定了“宽禁带半导体技术创新计划 (WBGSTI, Wide Bandgap Semiconductor Technology Initiative)”。到 2010 年，分三个阶段完成：开发高质量、大直径的 SiC 衬底；实现高效率、高可靠性、高性能的 GaN MMIC，并将其应用于几种类型的模块中；逐步将器件与电路模块应用于各种商用系统，包括雷达、智能武器、电子对抗和通信系统等，最终实现工作频率达 40GHz，工作寿命超千万小时的 GaN 微波射频器件。为了把 GaN 技术再向前推进一步，DARPA 其后又启动了“氮化物电子下一代技术计划 (NEXT, Nitride Electronic Next-Generation Technology)”。其目的是研发能够同时实现极高频率和电压的 GaN 制造工艺，并且该工艺能满足大规模集成的要求。NEXT 计划最终目标是实现适用于 500 GHz 高速混合信号处理的、超过 1000 个晶体管的高良率 GaN（增强型/耗尽型模式）MMIC 技术。

日本新能源产业综合开发机构 (NEDO, New Energy and Industrial Science Development Organization) 于 1999-2002 年启动了“移动通讯和传感器领域 GaN 半导体器件应用开发区域性联合项目 (Regional Consortium Project on Development of Nitride Semiconductor Electronic Devices for Mobile Communication and Sensors)”。此后，于 2002 年启动了“GaN 半导体低功耗高频器件开发计划 (Development of a Low-power High-frequency Device Using a Nitride Semiconductor)”。该计划的主要目的是开发 GaN 晶圆评价、分析技术，在此基础上开发大

功率的微波 HEMT 及其制造技术，最终目标是 2006 年底在 5 GHz 以及 26 GHz 下分别实现 200 W 以及 20 W 的射频输出。

欧洲防卫机构（EDA）于 2005 年启动了面向国防和商业应用的“Key Organization for Research on Integrated Circuits in GaN”（KORRIGAN）计划，涉及从衬底到模块的所有领域。KORRIGAN 计划是在欧盟框架内组织一个大规模多国联合科研项目，目的是创建一条独立的 GaN 微波器件供应链，为欧洲防务提供可靠的、最先进的 GaN 晶圆制造服务。而欧洲航天局（ESA）资助的是面向高可靠航天应用的“GREAT2”计划，侧重于提高 GaN 基器件在空间应用中的可靠性。为了进一步提高 GaN HEMT 的散热，欧洲还启动了 Advanced GaN packaging（AGAPAC）计划，目的是解决 GaN 基器件在空间卫星应用中的封装问题，在 2011 年底建立与空间应用兼容的 GaN 微波器件封装供应链。

国外 GaN 微波射频器件的主要厂商包括美国的雷神（Raytheon，主要是国防产品）、诺斯罗普·格鲁曼（Northrop Grumman，主要是国防产品）、Macom、Wolfspeed（Cree 分拆，包括收购的 Infineon RF 部门）、Qorvo、Skyworks、英国的 BAE、法国的 Ommic（提供代工，已被中国企业四川益丰电子收购）、荷兰的恩智浦（NXP）、日本住友（Sumitomo Electric）、韩国 RFHIC 等欧美以及亚洲厂商。另外，我国台湾地区的稳懋半导体（Win）可以提供代工服务。

1.2.2 国内发展历程及主要机构

中国政府、学术界对第三代半导体微波射频高度重视。自 2001 年以来，实施了一系列围绕第三代半导体材料和微波射频器件的重大研究计划，包括各种基金、基础研究国家级项目。

初期 SiC 和 GaN 微波射频器件同时研究，2008 年之后逐步演进为 GaN 主攻微波射频器件、SiC 主攻电力电子器件的格局。也正是 2001 年开始，西安电子科技大学、北京大学、中科院半导体所和微电子所、中国电科等单位进入 GaN 微波射频研究领域。2001 年研制出第一台国产 GaN 外延用 MOCVD 设备，2005 年实现了 4GHz 下功率密度 3.6W/mm 的 GaN 微波射频器件，2010 年开始投入应用验证，2011 年 GaN 微波射频器件功率附加效率（73%）达到同期国际最高水平。

在民用方面，L-Ku 波段的 GaN 微波射频器件已经开始进入应用阶段。以北京国联万众、苏州能讯、三安集成为代表的公司，已推出可规模化量产的产品，为移动通信基站开始批量供货。在 GaN 射频器件代工方面，三安集成也已经有成熟产品推向市场。同时南京国博、南京三乐、云南凝慧、英诺赛科、海威华芯等也在积极布局 GaN 射频器件。

1.3 市场现状及预测

1.3.1 整体市场

随着技术进步，GaN 微波射频器件市场快速发展。过去三年，GaN 微波射频器件在无线通信以及国防领域的市场年增长率超过了 20%。

根据 Yole 数据预测，2019 年全球 GaN 射频器件市场规模 5.37 亿美元（不含国防应用），预计 2023 年将达到 13.24 亿美元的市场规模。目前，国防应用的雷达、卫星和民用的通信基础设施应用占比 80% 以上，随着 Si 基 GaN 微波射频器件技术的成熟和成本的进一步降低，手机等移动通信终端的市场比例有望快速上升。

1.3.2 细分应用

1.3.2.1 民用通信市场

民用通信市场是 GaN 射频器件的主战场，也是未来 5 年内 GaN 射频器件最大的增长点，是 GaN 射频器件产业是否能成功转型成为成熟产业的关键所在。民用通信市场可细分为基站业务和手机业务。

基站建设是 GaN 市场成长的主要驱动力之一。据市场调研公司 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 33% 的份额。5G 时代基站领域的射频器件将以 GaN 器件为主，随着 5G 通信的实施，2019-2020 年射频器件市场规模会出现明显增长，GaN 在射频器件市场中渗透率将持续提高。预计到 2023 年，基站中的 GaN 射频器件的市场规模将达到 5.21 亿美元，2018-2023 年期间年均复合增长率（CAGR）达到 28%。据 Yole 预测，至 2025 年，GaAs 市场份额基本维持不变的情况下，GaN 有望替代大部分 Si LDMOS（Lateral double-diffused MOSFET，横向双扩散金属氧化物半导体场效应管）份额，占据射频器件市场约 50% 的份额。

手机应用将为 GaN 提供新的市场增长点。Si 基 GaN 厂商的另一

个目标市场是大规模消费类 5G 手机功放市场，GaN 器件大带宽的优势将能够合并放大器，减少其数量，从而减少手机系统的复杂度，降低成本，提高可靠性，如果成功，将在未来五年开辟新的市场机遇。但是受制于成本和供电电压过高的挑战，目前 GaN 功率放大器应用到手机还存在很多技术难题需要克服。如果引入新型异质结结构、降低材料的方阻和欧姆接触电阻，实现低电压工作，GaN 射频器件将适合于手机应用，从而开辟一个新的巨大市场机会。

1.3.2.2 射频能量（RF Energy）市场

目前固态射频能源市场主要使用磁控管，存在无法现场测量和改变输出能量、强室内辐射和反射的能量的缺点。GaN 固态射频功放具有更高的效率、更优的控制能力，使用寿命比磁控管长 10 倍，具有更高的可靠性。因此在微波炉、射频脉冲肿瘤消融/热疗、汽车点火等领域存在巨大的应用市场。以微波炉市场为例，估计每年全球微波炉的销量在 7000 万台以上。消费品微波炉的传输功率范围大致在 600W-1500W 之间，微波炉的总射频功率需求范围为 42GW-105GW。但是各厂商对应用的技术路线尚未明确，其成熟产品的推出需要解决成本与应用市场相匹配的问题。这个市场预计未来 10 年内将迎来新的增长点。

1.3.2.3 军事国防市场

目前为止，在军用雷达、卫星领域，GaN 器件已经代替了大部分 GaAs 和部分 Si LDMOS 及行波管，占据了大部分市场。随着新型 GaN 基有源电子扫描阵列（AESA）雷达系统的应用，基于 GaN

的军用雷达预计将主导 GaN 军品市场。对于需要高频高输出的卫星通信应用，GaN 也有望逐步取代 GaAs 的解决方案。

2 技术发展趋势分析

GaN 材料具有宽带隙、高电子漂移速度、高热导率、耐高电压、耐高温、抗腐蚀、耐辐照等突出优点。GaN 材料制作的器件工作电压很高，所以能得到很高的功率密度。此外，GaN 材料体系易于形成如 AlGaIn/GaN 等异质结构，在异质结界面上存在极强的自发极化与压电极化效应，诱导产生的二维电子气（2DEG）的浓度高达 10^{13} cm^{-2} ，且同时具有高达 $2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的电子迁移率，因此基于异质结构的晶体管往往又被称为高电子迁移率晶体管（HEMT）。高电子迁移率的特性适合用来制作高频微波器件。基于 GaN 的 HEMT 器件被认为是 100 GHz 范围内最理想的微波功率器件，另外目前国际上基于 InAlN/GaN 异质结构的 HEMT 器件的截止频率已超过 400 GHz，已显示出其在更高频率如 THz 领域的应用潜力。

目前市场上比较成熟的产品为 SiC 基 GaN 射频器件，包括面向雷达应用的 UHF、L、S、C、X、Ku、K、Ka 波段功率放大器；面向通信基站应用的 Sub-6GHz 功率放大器和毫米波功率放大器；以及面向射频能量的 2.45 GHz 功率晶体管。未来技术的重点发展趋势包括面向 5G 移动通信基站和终端应用的低成本、高性价比的 Si 基 GaN 功率放大器和面向国防大功率高性能应用的金金刚石基 GaN 功率放大器。

GaN 微波射频器件的关键技术包括：衬底和外延材料、器件、封装和应用技术，以下我们就从这四个方面具体分析 GaN 微波射频器件的发展趋势。

2.1 衬底、外延技术发展趋势

基于 SiC、Si 等异质衬底外延材料制备的 GaN 微波射频器件是当前及未来一段时期的主要选择，而大尺寸 4-6 英寸半绝缘 GaN 自支撑衬底技术还未成熟，而且成本高，尺寸小，技术提升和成本降低周期更长，所以短期内用于 GaN 微波射频领域的希望不大。金刚石基 GaN 微波射频器件由于散热好，可应用在高功率密度情况下，备受关注，但是大尺寸金刚石衬底还很不成熟，有待进一步发展。

SiC 基 GaN 材料外延生长技术相对成熟。材料缺陷和位错密度小，方块电阻、迁移率等电学参数最好，SiC 衬底导热性好，适合于大功率应用，衬底电阻率高降低了射频损耗，因此 SiC 基 GaN 微波射频器件成为目前市场的绝对主流。

Si 基 GaN 材料外延生长因其具备低成本潜力被寄予厚望。尤其是大尺寸的 Si 衬底成本比 SiC 低很多，但是目前尚未开始大规模应用，主要原因是外延材料缺陷和位错密度较高，外延片翘曲影响加工成品率，衬底和外延层射频损耗较大。随着技术的不断成熟，以及手机终端、微波炉等应用 GaN 射频器件的需求不断加大，6-8 英寸低成本 Si 基 GaN 材料外延技术已经成为近年来微波射频领域关注的热点及重要发展趋势。

金刚石基 GaN 材料外延生长成为前瞻性研究热点。由于金刚石衬底极佳的导热性能，国外研究报道，金刚石基 GaN 器件的输出功率密度是 SiC 衬底器件的 3 倍以上，在国防应用的大功率微波功率

放大器方面具有很大的优势，因此金刚石衬底制备及外延生长 GaN 也是近年来一个重要发展方向。

2.1.1 技术发展驱动力综述

国防和军用市场对微波射频器件的大功率和高效率性能的迫切需求促进了 SiC 基 GaN 和金刚石基 GaN 外延技术的发展；民用无线通信基站、移动通信终端的低成本的需求促进了大尺寸 Si 基 GaN 外延材料的开发。从成本角度考虑，大尺寸 Si 基 GaN 外延材料的开发在未来几年是发展重点。现有 Si 基 GaN 外延材料的缺陷密度普遍在 10^9cm^{-2} 量级，SiC 基 GaN 外延材料的缺陷密度比 Si 基大约低 1-2 个量级，未来为了进一步降低 GaN 外延材料的缺陷密度和提高器件的长期可靠性，开发 GaN 自支撑衬底技术和 GaN 同质外延技术也是选择之一。

目前 SiC 基的 GaN 微波射频器件产品的工作电压一般在 20V-60 V，更高电压的产品面对散热的压力，需要开发具有更高导热性能的金 刚石基 GaN 材料。低工作电压的产品（<5 V）一般应用于手机等移动通信终端，需要开发大尺寸的 Si 基 GaN 材料技术。面向 5G 移动通信的毫米波通信频段，几种衬底的 GaN 外延材料均可胜任。但是面向未来 6G 移动通信的太赫兹通信频段，目前只有 SiC 基 GaN 材料满足要求，Si 基 GaN 材料需要进一步提高质量。从封装散热的角度出发，Si 基 GaN 的衬底热导率较低，对封装散热的要求比较高，尤其是对于大功率的放大器。对器件的能量转换效率性能的要求促使 GaN 外延材料生长技术的进一步提高，以降低面电阻和提高材料的导

热率。同时为了提升器件的增益、线性度、频率等指标，InAlN/GaN、InAlGa_N/GaN、AlN/GaN 等各种新型 GaN 异质结构材料外延也是重要的发展方向。从目前的产品来看，SiC 基、Si 基和金刚石基 GaN 外延材料制备的微波射频器件的可靠性均能满足应用需求。

2.1.2 关键技术发展趋势

下面列出了 SiC 基 GaN 外延、Si 基 GaN 外延、GaN 自支撑衬底同质外延材料的关键指标和参数发展趋势。

2.1.2.1 SiC 基 GaN 衬底及外延材料

SiC 基 GaN 材料的器件散热性能上最具优势，适合应用在高温、高频的领域，因此在大功率输出的雷达、卫星、5G 基站具有广阔的应用前景。

2.1.2.1.1 半绝缘 SiC 衬底材料

半绝缘 SiC 单晶是制备 GaN 微波射频器件的衬底材料。高功率、高频器件需要使用半绝缘 SiC 衬底材料，以达到低射频损耗和低器件寄生响应。要使生长的 SiC 单晶具有半绝缘电学性质，有两种生长方法：高纯半绝缘单晶生长和掺杂半绝缘单晶生长。

相比于蓝宝石（Sapphire，Al₂O₃）衬底和 Si 衬底，SiC 衬底与 GaN 之间有更小的晶格失配和热失配，因此 SiC 衬底上的 GaN 薄膜有更低的缺陷密度、更低的翘曲度和更高的材料性能。目前主流的半绝缘 SiC 衬底是 4-6 英寸，并逐步向 8 英寸发展。预计到 2020 年，4 英寸半绝缘衬底的市场保持在 4 万片，而 6 英寸半绝缘衬底的市场迅

速提升至 4-5 万片；2025-2030 年，4 英寸半绝缘衬底逐渐退出市场，而 6 英寸衬底将增长至 20 万片。

国际上半绝缘 SiC 单晶衬底材料的产业化公司主要有美国科锐（Cree）、美国贰陆（II-VI）、德国 SiCrystal（被日本罗姆 Rohm 收购）、瑞典 Norstel（被意法半导体 ST 收购）等公司，其半绝缘 SiC 衬底产品覆盖 4 英寸和 6 英寸。国内主要半绝缘 SiC 单晶衬底材料的产业化公司主要包括山东天岳、北京天科合达、河北同光、中国电科 2 所、46 所等，已经开发出成熟的 4 英寸半绝缘 SiC 单晶衬底产品，并已经研发出 6 英寸衬底样品。

目前，对于 4 英寸半绝缘 SiC 衬底，其单价约为 1-1.5 万元人民币。随着大尺寸 SiC 晶圆生长技术的成熟，单位面积成本会进一步降低。

➤ 问题与挑战

国产大尺寸 SiC 衬底已经取得明显的进步，目前有多家企业可提供批量供货，但是与国际先进水平还存在明显差距。主要表现在 6-8 英寸 SiC 衬底的研发水平进度滞后，4 英寸量产产品还存在成品率不高、片内均匀性以及批次一致性、稳定性等问题，以及因为成品率低等引起的成本偏高等问题。因此未来需要发展大尺寸 SiC 衬底技术的同时降低衬底的成本、提升衬底的质量一致性与成品率。

➤ 潜在解决方案

半绝缘 SiC 衬底性能的提升主要依赖于 SiC 单晶生长炉的改进、高纯碳粉和硅粉的制备、SiC 单晶生长工艺的自动精确控制等。进一

步需要在晶体生长炉的温度场设计与实现、高纯碳粉硅粉以及低缺陷密度籽晶的制备、大尺寸单晶生长工艺与低缺陷密度的综合控制、消除残余应力的厚单晶生长工艺开发、SiC 衬底切磨抛工艺以及大尺寸衬底的 Epi-ready 制备工艺等方面进一步进行技术攻关。

2.1.2.1.2 SiC 基 GaN 外延材料

对于 SiC 基 GaN，如何不断提升功率、效率、增益、线性度、可靠性等器件指标是永恒的话题，也是各家企业长期保持其竞争力的关键。从当前微波射频器件的应用频段来看，器件制备工艺方面，0.5 μm 、0.25 μm 、0.15/0.1 μm 等三代工艺会是长期的主流，而且各家企业均已基本掌握。因此未来 SiC 基 GaN 器件指标不断提升很难继续依靠制备工艺，主要技术途径将是新型异质结构材料外延、器件关键工艺、新型器件结构等。特别是新型异质结构材料外延已经成为近年来各家公司产品性能升级换代的主要途径。如降低缓冲层厚度可以大大提升散热特性，已从过去的 2 μm 降低到 1 μm 、500nm 甚至 300nm。如 InAlN/GaN、InAlGa/GaN 以及多异质结构材料外延技术，已在日本住友、德国 UMS 等公司开始规模化使用。如采用超晶格结构生长的 AlGaIn 势垒层，栅极漏电可降低 1-2 个数量级，有效提升了器件效率。

➤ 问题与挑战

SiC 基 GaN 外延技术上，面临的挑战包括在高工作温度下仍保持良好高阻特性的缓冲层、从室温到高温下保持高迁移率的二维电子气、异质结构的精细优化、高一致性和高均匀性的材料生长工艺以及各种新型异质结构的设计与生长。实现高阻的缓冲层，以获得低射频

损耗的器件；同时要设计更合理的外延结构和新型异质结构，以获得高的频率、高线性度、功率性能和可靠性。相比于 Si 和蓝宝石衬底，SiC 基 GaN 在外延厚度上面临的挑战较小，主要在于需合理控制多层结构外延材料间的应力问题、漏电问题和陷阱问题。目前，SiC 基 GaN 的位错密度相比于 Si 和蓝宝石衬底外延的 GaN 要低一些，但由于晶格失配导致的位错密度仍然高达 10^8 cm^{-2} ，面临的主要问题仍然是提高异质外延的材料质量和调控二维电子气的分布，抑制器件在高温高压下的漏电及其性能退化。需要进一步通过材料结构的精细化设计，通过应力调整与缺陷控制，提高材料质量的同时获得更高电学性能的异质结外延材料，并通过与器件工艺的反复迭代优化以获得最佳器件性能的外延材料结构。

➤ 潜在解决方案

急需将以材料性能提升为核心的材料结构设计与工艺优化研究转变为以器件性能提升为核心的材料结构设计与工艺优化研究，这是重要的理念转变。在材料研究者眼中最好的材料并不见得可以获得最佳的器件性能，因为迄今为止尚未建立材料结构参数、生长工艺参数、材料性能指标与器件性能指标之间的稳定依赖关系，因此围绕一种器件性能指标的获得，需要对材料结构和工艺进行大量迭代实验优化，也可能存在多种材料方案，因此长期来看，很难出现一种标准化的 GaN 外延材料结构。当然，从材料角度，仍存在很多明确的优化方向。为获得低缓冲层射频损耗，需要对 GaN 缓冲层进行铁或碳的补偿掺杂，通过杂质补偿作用实现高阻缓冲层。AlGaIn 背势垒结构也通常被

用来提高器件的高温电特性、微分输出阻抗和功率增益特性，提高 AlGa_N 势垒层材料的生长质量，减小铁和碳掺杂引起的深能级陷阱的引入和电流崩塌效应，满足新型异质结构对高质量 AlGa_N 的需求。优化外延层的生长结构，通过超晶格等插入层控制薄膜中的应力。采用高温 MOCVD 设备，提高 AlN 及高 Al 组分 AlGa_N 层的生长质量。

2.1.2.2 Si 基 GaN 衬底及外延材料

2.1.2.2.1 高阻 Si 衬底材料

由于 GaN 射频器件中的 GaN 及其他 III 族氮化物都是纤锌矿结构，Si 的 (111) 面在晶格对称性上与氮化物的 c 面兼容，通常以 Si 的 (111) 面外延氮化物材料。另外不同于电力电子器件，考虑到衬底导电性带来的射频损耗，Si 基 GaN 射频器件的 Si 衬底要求高阻特性，阻值越高，射频损耗越小。一般来说，Si 基 GaN 的 Si 衬底的电阻率要求在 $5000\ \Omega\cdot\text{cm}$ 以上。

单晶 Si 衬底有两种基本的制备方法：直拉法 (CZ) 和区熔 (FZ) 法。直拉法制备的单晶 Si 衬底 C、氧杂质浓度比较高，纯度容易受到坩埚污染，电阻率比较低并且不均匀，适合于制备中低电阻率 ($<3000\ \Omega\cdot\text{cm}$)、对纯度要求不高的 Si 衬底产品。区熔法采用高频加热，不使用坩埚，生产的单晶 Si 衬底纯度比较高，电学性能均匀，其电阻率能做到 $10^4\ \Omega\cdot\text{cm}$ 以上。但是区熔法的高阻 Si 片的价格也是直拉法的 5 倍左右。

考虑到高阻 Si 器件的市场容量，市场上的高阻(111)晶面的 Si 衬底不超过 8 英寸，以 6 英寸和 8 英寸为主，并且被日本信越 (Shin-

Etsu)、日本胜高 (Sumco)、德国世创 (Siltronic)、中国台湾环球晶圆 (Global Wafers) 等境外公司垄断。中国大陆的天津中环、有色金属研究院、中国电科 46 所能小批量供应微波射频外延用的 6 英寸和 8 英寸高阻 Si 衬底, 但材料质量及其高阻特性与国际大厂还有一定差距。

➤ 问题与挑战

进一步提升国产大尺寸高阻 Si 衬底材料质量, 包括提升电阻率、提高表面加工质量以及降低衬底成本等。

➤ 潜在解决方案

围绕微波、毫米波硅基 GaN 外延的需求, 针对性开展国产化的 6-8 英寸高阻硅衬底研发, 并通过大批量外延工艺验证不断提升射频 GaN 外延用高阻硅衬底。

2.1.2.2.2 Si 基 GaN 外延材料

大尺寸 Si 基衬底已经很成熟, 且供货量充足。Si 基 GaN 外延的主要问题包括外延层缺陷密度高、应力和翘曲度大、衬底与 GaN 界面存在漏电通道、界面和硅衬底的射频损耗大等问题。需要进一步通过材料结构设计和生长工艺的优化, 通过应力调整与缺陷控制, 减小缺陷密度及厚外延下面面临的裂纹、应力与翘曲问题, 提高大尺寸硅基 GaN 外延片的成品率, 才能真正地做到其价格的降低。

1、 应力控制

➤ 问题与挑战

Si 衬底和 GaN 外延层之间存在较高的热膨胀系数失配, 是 Si 基

外延片遇到的主要问题。它会在外延层生长结束降温过程中形成产生很大的张应力，使得外延层发生翘曲、龟裂，并且这种现象随衬底尺寸的增大而更明显，这也是困扰大尺寸 Si 基 GaN 外延的一个重要问题。有研究表明，采用大尺寸 Si 衬底虽然可以降低器件的成本（6 英寸外延片器件有效面积是 2 英寸的 9 倍），但相同曲率时，6 英寸外延片翘曲高度是 2 英寸片的近 10 倍。翘曲控制对于大尺寸 Si 衬底上 GaN 外延生长是一个必须考虑的因素。外延片翘曲一般有三种来源：衬底的初始翘曲、热失配引起的翘曲和外延生长导致的翘曲。此外在生长过程中即便是温度稳定不变，如果薄膜材料有内建应力（比如晶格失配导致的应力），随着薄膜厚度增加，外延片的翘曲也会变化。GaN 由于生长初期存在 3D 转 2D 的过程，在此过程中，“位错弯曲湮灭”会释放部分压应力，“晶粒合并”会引入一定张应力。对于 6-8 英寸的大尺寸 Si 基 GaN 薄膜的生长，翘曲的控制仍然是重要的技术问题。

GaN 与 Si 衬底之间的大晶格失配（17%）和热失配（118%）导致厚层 GaN 龟裂。热失配是指降温过程中，GaN 薄膜收缩速率是 Si 衬底两倍以上，GaN 会承受极大的张应力，薄膜容易龟裂。如何实现 Si 衬底上高质量无裂纹的 GaN 薄膜（应力控制层设计）是核心难点之一。目前也有很多研究者们采用超晶格插入层技术在尽量减少 GaN 裂纹密度的基础上提高 GaN 的晶体质量，因为超晶格可以很好的阻断位错并且在一定程度上可以释放 GaN 外延层所受的张应力。但是超晶格的周期较多（一般 10 对以上），在生长工艺技术方面难度系数较大，可变生长参数较多，对每一层厚度的控制要求严格，并且界

面要求陡峭，对设备的性能要求也较高。

选择合适的缓冲层，可以过渡 Si 衬底和 GaN 外延层之间的晶格常数和热膨胀系数，以释放 GaN 外延层中的应力，提高 GaN 外延层的质量。目前发现适合 Si 衬底外延 GaN 的缓冲层是 AlN，此外还有研究者采用 Al 组分渐变 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、BP、 Al_2O_3 、3C-SiC、ZnO、ScN、 ZrB_2 等作为缓冲层。多缓冲层技术可以调控外延生长过程中的应力，减少位错和龟裂。

➤ 潜在解决方案

Si 衬底上 GaN 外延生长常用应力调控方案有复合衬底、图形衬底、低温 AlN 插入层 (LT-AlN)、AlN/(Al) GaN 超晶格和 AlGaN 缓冲层等。其中，复合衬底常用 SOI 柔性衬底技术，薄层 Si 通过 SiO_2 键合在厚层 Si 衬底上，GaN 薄膜外延在 SOI 衬底上，不仅可以降低 GaN 薄膜内建应力，而且可以降低位错密度提高晶体质量。图形衬底指首先通过工艺在衬底上制作规则小图形（微米级尺寸），然后引导 GaN 薄膜外延生长在图形衬底上，裂纹偏向于产生在图形间隙，不影响器件制备。图形化衬底技术可以使各个生长平台上的 GaN 材料独立生长，释放了外延层中的应力，并减少了裂纹的传递。

对于厚的无裂纹 GaN 生长，商业化最可行的技术仍然是低温 AlN 插入层 (LT-AlN)、AlN/(Al) GaN 超晶格、AlGaN 缓冲层及多种方法相结合的技术。低温 AlN 插入层技术可以有效抑制裂纹。采用低温 AlN 插入层，其机制在于 GaN 上生长 LT-AlN 时，LT-AlN 是弛豫状态，晶格常数比 GaN 小，对后续生长的 GaN 会引入压应力，可以避

免 GaN 薄膜裂纹。此外 LT-AlN 还可以过滤阻挡位错，提高晶体外延质量。AlN/(Al) GaN 超晶格 (SLs) 也能有效引入压应力，该应力控制层方法灵活多变，可以在 AlGaIn 层数/组分上变化组合。采用多层连续渐变组分的 AlGaIn 缓冲层实现对 GaN 层提供足够的预压应力，避免降温过程中 GaN 龟裂。2017 年，Atsunori Tanaka 等人利用选择性生长，在 Si 上实现了最低的螺位错密度为 $1.1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 、无裂纹的纯 GaN 层生长。2018 年，Jeong-Tak Oh 等人用由 2 nm 厚的低温 (LT, 850°C) -AlN, 8 nm 厚的梯度温度 AlN 和 200 nm 厚的高温 (HT, 1100°C) -AlN 层组成的组合缓冲层，在 8 英寸 Si (111) 衬底上生长了高质量的无裂纹 n-GaN 层。2019 年中科院苏州纳米所通过 Al 组分渐变的 AlN / AlGaIn 缓冲层，实现了在 Si 上生长的无裂纹的连续 GaN，其穿透位错密度 (TDD) 为 $5.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 。此外，2019 年，北京大学使用具有纳米级直径和高填充因子的独特 C 纳米管 (CNT) 掩模，实现了应力协调和位错控制，并且获得了具有线位错(TDD)为 $2.51 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，均匀的无裂纹 GaN 外延层。

2、 位错密度

➤ 问题与挑战

GaN 材料的晶体结构为立方纤锌矿结构或闪锌矿结构，而 Si 材料为立方金刚石结构，Si 衬底和 GaN 外延层之间存在较大的晶格失配，这会在 GaN 外延层中产生较大的位错密度。目前 Si 基 GaN 外延厚度大约在 $2.5 \mu\text{m}$ 以上才能达到较低的缺陷密度。未来在确保无裂纹高质量的情况下，通过材料结构、生长技术等控制，实现更薄的高

质量 GaN 外延。

此外，高温下 GaN 与 Si 会发生回熔刻蚀。GaN 与 Si 回熔刻蚀导致 GaN-on-Si 无法像 GaN-on-Sapphire 一样采用两步法外延。因此，晶格失配会导致 GaN 薄膜晶体质量差，位错密度高($10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$)，相比于 GaN-on-SiC 高 1-2 个量级。在引入超晶格的同时也可能会引入新的位错等，导致人们在引用超晶格技术方面还受到很大限制。

➤ 潜在解决方案

避免回熔刻蚀最常用的方法是 Si (111) 上先外延 AlN 缓冲层 (buffer layer)，阻隔 Ga 与 Si 衬底的直接接触。此外，K Yu Shubina 等人用 GaN 纳米柱阵列和 Si_xN_y 薄层作为缓冲层，获得了 GaN/3D-GaN/Si (111) 和 GaN/ Si_xN_y /Si (111) 两种外延结构。证明了在不使用其他材料 (例如 AlN) 的情况下在 Si (111) 衬底上合成连续结晶 GaN 层的可能性。K Yu Shubina 等人在 Si (001) 衬底上成功地生长了半极性 ($101\bar{3}$) 和 ($101\bar{5}$) GaN 薄膜，并使用两步外延横向外延生长 (ELOG) 工艺提高半极性 ($101\bar{3}$) 和 ($101\bar{5}$) GaN 薄膜的晶体质量，ELO 可以使缺陷密度降低到 $2.72 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。证明了 ELO 方法在减少定向溅射 AlN 缓冲层的半极性 ($101\bar{3}$) 和 ($101\bar{5}$) GaN 薄膜中的缺陷的有效性。2018 年，Sungmin Cho 等人在 Si (111) 表面溅射 C 化钨 (WC) 缓冲层上进行 GaN 的气相 MBE 生长。发现低温 (LT) 缓冲层对于在 WC 表面上生长单晶质量的高温 GaN (HT-GaN) 至关重要。而且位错终止技术，如界面的形成和表面的退火可以提高单晶的质量。在退火的双缓冲层 (AlN/GaN) 上生长的 HT-GaN 样品

显示 X 射线衍射的半高宽 (FWHM) 为 2260 弧秒 (arcsec), 霍尔载流子密度为 $4.39 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 载流子迁移率为 $19.4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 。2018 年, 北京大学将一种新型的蛇形沟道掩膜引入到 Si 衬底中以进行低位错 GaN 外延生长, 并首次在掩膜的 Si 衬底上实现了完全聚结的 GaN 薄膜。与 ELOG 方法相比, 这种创新的掩模仅需要 GaN 的一步外延生长, 而且 GaN 的每个掩模口仅具有一个高位错区域, 这种新的生长方法可以有效降低位错密度, 从而显著提高了 GaN 的质量, 得到位错密度约 $2.4 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 的高质量 GaN。2019 年 Atsunori Tanaka 等人在 Si 和新近面世的 Qromis Substrate Technology (QST) 衬底上进行 GaN 的选区生长 (SAG), 使缺陷密度降低到几乎与同质衬底相当的水平。2019 年, 北京大学使用薄 GaN 过渡层 (GTL, GaN transition layer) 技术来控制应力, 并能降低位于 Si(111) 衬底上的 AlN 成核层上的 GaN 初始生长中的位错密度, 获得了 $1.5 \mu\text{m}$ 的无裂纹 GaN 外延层, 其 (002) 和 (102) X 射线衍射的半高宽 (FWHM) 值分别为 270 arcsec 和 521 arcsec。

2.1.2.3 GaN 自支撑衬底及同质外延材料

2.1.2.3.1 GaN 衬底材料

为了满足射频器件的需求, 需要 GaN 单晶衬底为半绝缘特性, 目前半绝缘 GaN 主要依赖 Fe 掺杂来实现, 最理想的材料是高纯半绝缘 GaN 单晶衬底, 仍需要进一步研发。因此, GaN 单晶衬底的尺寸、位错密度以及半绝缘特性, 都是射频器件应用所需要面临的挑战。

1、 衬底选择

➤ 问题与挑战

目前 GaN 衬底材料制备主要使用氢化物气相外延(HVPE)技术,虽然有生长速率快、大尺寸生长等优点,但 HVPE 使用的蓝宝石衬底和 GaN 之间的晶格失配、热失配会在 GaN 中产生较高的位错密度,很难将衬底位错密度降低到 10^4cm^{-2} 以下,同时因每次生长一片且剥离成品率不高,导致 GaN 衬底材料制造成本偏高。

➤ 潜在解决方案

解决异质剥离衬底技术中由于失配造成的晶体质量下降,可以采用晶格失配度更小的衬底材料,如在 HVPE 中可以采用 SiC 衬底提高晶体质量,但是 SiC 价格高昂,不利于产业化。开发大尺寸单晶分离技术。或者通过高质量的 GaN 同质衬底进行晶体生长,以期提升 GaN 衬底材料的质量。

2、 单晶缺陷密度

➤ 问题与挑战

GaN 衬底制备的基本方法有: GaN 体单晶制备法、异质剥离衬底和 HVPE 制备 GaN 厚膜衬底。由于 GaN 的熔点很高,融解压很高,所以用常规方法直接合成 GaN 单晶十分困难。异质剥离衬底技术中常用的衬底材料有蓝宝石、SiC、GaAs 等,由于晶格失配和热失配,会降低 GaN 的质量。目前商业化使用的氢化物气相外延(HVPE)虽然有生长速率快、大尺寸生长等优点,但 HVPE 使用的蓝宝石衬底和 GaN 之间的晶格失配、热失配会在 GaN 中产生较高的位错密度。

➤ 潜在解决方案

针对当前主流生长方法 HVPE 和氨热法开展大尺寸设备研发,优化设计反应腔温度场、气流场以及生长工艺,探索新型缓冲层、柔性衬底以及横向外延生长的新技术。

3、 衬底片成本

目前,2 英寸 GaN 衬底,其价格在 1 万元左右;3 英寸 GaN 衬底,其价格在 2 万元左右;未来,随着大尺寸等生长技术的成熟,单位面积成本会迅速降低。

➤ 问题与挑战

主要是大尺寸半绝缘 GaN 衬底的批产能力不足,还无法满足现有市场对自支撑衬底的需求;另外价格相比于 SiC 衬底来说还较高;缺陷密度、电阻率的控制方面还有待加强。

➤ 潜在解决方案

进一步通过优化生长工艺与缺陷控制,减小缺陷密度,提高大尺寸 GaN 衬底的材料质量,才能真正地做到其价格的降低。同时开发新的晶体生长技术。

2.1.2.3.2 GaN 同质外延材料

受制于 GaN 衬底材料的影响,其 GaN 同质外延的尺寸被限制在 2 英寸-3 英寸之间,目前主要以 2 英寸外延片为主,3 英寸外延片还处于研发阶段。

1、 位错密度

目前,采用 GaN 同质衬底材料进行外延生长,外延材料的晶格位错密度从 10^6 - 10^8 cm⁻² 可以降低到 10^4 - 10^6 cm⁻²,极大的提升了材料

的结晶质量。

➤ 问题与挑战

基于 GaN 衬底进行同质外延时，初始界面处存在较高的 Si、O 等 n 型杂质，造成较大的背景掺杂浓度和深能级陷阱，影响缓冲层的高阻特性和器件的电流崩塌、射频散射效应。

➤ 潜在解决方案

引入 p 型掺杂或加强界面处理，抑制或消除 Si、O 等 n 型杂质。

2、 外延层厚度

目前 GaN 同质外延厚度根据其应用场景的不同，其外延厚度变化较大，针对微波功率器件，其外延厚度在 $1\mu\text{m}$ - $3\mu\text{m}$ 。

➤ 问题与挑战

针对微波功率器件应用，其同质外延的缓冲层电阻较 SiC 衬底而言较小，因此其射频损耗较大，造成器件功率特性的退化。

➤ 潜在解决方案

为了有效提升 GaN 同质衬底的绝缘性，可通过 Fe 和 C 的掺杂来提升衬底的绝缘性，从而有效降低衬底材料的频率插损，同时提升单位外延厚度的耐压能力。

2.2 器件技术发展趋势

GaN 微波射频器件主要包括 SiC 基 GaN、Si 基 GaN 和金刚石基 GaN 的功率放大器，主要产品参数包括输出功率、功率附加效率、增益、线性度等。GaN 微波射频器件总的发展趋势是提高输出功率、提高效率、提高增益和改善线性度，但是根据不同应用场合具有不同的

侧重点。

对于 SiC 基 GaN 器件来说，主要应用场景是军事和国防领域的雷达、卫星通信，对输出功率要求比较高；另外一个主要应用场景是民用通信系统基站，对输出功率、效率和线性度均有要求。对于 Si 基 GaN 器件来说，主要应用场景是规模巨大的 5G 通信系统，输出功率要求不高，对低成本、高性价比的要求相对比较高。对于金刚石基 GaN 射频器件来说，主要应用场景是军事和国防用雷达、卫星通信，对输出功率要求比较高。

2.2.1 技术发展驱动力综述

新一代 5G 移动通信高传输速率、大带宽的特点，对无线移动基站提出了新的要求，GaN 材料的优异特性促使 GaN 基芯片成为 5G 移动基站的首选芯片，而民用通信市场的白热化竞争，促使基站及芯片的成本不断降低。根据美国战略分析公司战略组件应用（SCA）小组报告预测，GaN 射频市场到 2022 年将超过 10 亿美元（国防部门需求略高于商业收入）。目前 GaN 射频应用的增长主要是由于商用无线基础设施的推出以及军用雷达、电子战（EW）和通信应用的需求，5G 无线通信基站市场将成为 GaN 射频器件最大应用市场。

2.2.2 关键技术发展趋势

得益于美国国防部（DoD）计划、中国重大项目等政府计划，日本住友与华为等公司的合作推动，GaN 射频器件发展迅速，成为微波功率放大器领域的最新恒星。GaN 最初是为伊拉克简易爆炸装置（IED）

干扰器开发的,现已成为所有新型微波和毫米波射频器件(包括雷达、卫星、通信和电子战)的首选技术。

2.2.2.1 SiC 基 GaN 射频器件

1、 器件关键参数

➤ 线性度

在通信系统中,器件的线性度是关键技术指标,直接影响通信系统的语音和视频等数据的传输质量。

因 5G 与卫星通信的毫米波芯片应用牵引,GaN 线性度参数与性能的重要性日渐凸显。目前国内外研究机构相继提出复合双沟道材料、Finfet 器件可获得高线性指标(5 dBc -10dBc,或 $P_{OIP3}/P_{DC}=20\text{dB}$)。

针对微波功率器件,存在 $P_{OIP3}/P_{DC}=10\text{dB}$ 以及现有高线性 GaN 器件的局限性,美国 DARPA 等研究机构面向军民两用的无线通信、卫星通信的应用未来需求,于 2017 年提出了 $P_{OIP3}/P_{DC}=1000\text{dB}$ 的技术目标。

当前包括 Si、化合物半导体(GaAs 等)在内的微波功率器件线性化手段以电路预失真回退技术为主。因此,围绕在高线性新器件研制中,除研究高线性 I-V 特性以外,开展高线性新器件的最小化电容效应及其结合电路失真的 AM/AM、AM/PM 相关研究显得尤为重要。

➤ 功率

在固态高功率放大器方面,大栅宽 GaN 半导体器件与工艺工程化步伐加快,它与内匹配、外功率合成和功分器中的平衡网络等应用技术结合更加紧密,已呈现出低频段千瓦级的大栅宽器件和高频段

MMICs 并举的技术路线，并在 UHF、L、S、C、X、Ku、K 及部分 Ka 多个波段高功率、高效率与小型化同时突破。

针对在民用通信的连续波、宽带新应用，固态微波功率放大器的热管理与性能稳定性成为重要指标，开展高热导率的金刚石衬底转移技术、热界面接触材料与散热片结构是未来的研究方向。

➤ 效率

如何兼顾高效率、高线性以及预失真回退等性能是当前重要的研究课题，研究人员在 Doherty 放大器新拓扑电路结构、无线通信 100/500MHz 宽带演示等方面取得较好的成果，有助于 5G 包络跟踪功率放大的应用研究。

➤ MMICs 与高频应用

针对未来结构紧凑的军民应用系统需求，GaN MMICs 的多功能集成成为重要的发展趋势，包含 GaN 功放、LNA、SPDT 开关之外，在片内集成 VCO、Mixer 实现 GaN 收发机前端 MMIC 成为研究方向。

GaN MMIC 在 W 波段以下频段的技术正走向成熟，大功率芯片输出功率超过 100W；且随着化合物半导体工艺节点进入 40nm，GaN MMIC 器件在 180GHz 的应用也成为可能。但器件在横向与纵向尺度同时微缩时，材料体系与器件性能控制及其芯片热管理是需要突破的技术难点。

➤ 问题与挑战

GaN 微波功率器件在工作时热分布集中，其输出大功率时在芯片有源区的热积累效应，导致器件输出功率密度以及效率等指标迅速恶

化，使 GaN 器件在高功率状态下的可靠性面临严峻挑战，其大功率性能优势远未充分发挥。特别是，GaN 射频晶体管在临近最大输出功率时，由于芯片工作时的信道加热使其寿命大大缩短、可靠性急剧下降。因此，散热问题已经成为限制 GaN 微波功率器件技术进一步发展和应用的主要技术瓶颈之一。

➤ 潜在解决方案

研究 GaN 微波大功率芯片及器件热管理技术。突破 GaN 芯片低温低热阻烧结技术、高热导率材料热沉等关键技术，实现 GaN 芯片散热通道低接触热阻、GaN 芯片快速散热、提升 GaN 器件热沉散热能力，改善 GaN 芯片热分布，有效降低芯片沟道温度。

开展 2-4 英寸金刚石材料技术研究，开发大尺寸高热导率的金刚石热沉材料，开发基于衬底剥离和原子级键合技术，实现高热导率衬底材料的转移，解决大功率微波器件散热问题。

2、 新结构器件

新型 GaN 射频器件研究主要围绕二次再生长、四元材料体系器件新结构来开展，增加沟道对二维电子气的控制力、获得低的寄生电阻以实现高 f_T 、 f_{max} 。

随着 GaN 射频器件的新应用不断衍生，具有新机理、新功能的 GaN 射频器件需要进一步开展研究，兼容 CMOS 工艺的 GaN 射频器件是研究方向之一。

2.2.2.2 Si 基 GaN 射频器件

1、 器件关键参数

包含线性度、功率、效率、频率等。使用 Si 基衬底的代表厂商为四川益丰(OMMIC)，其有 SiC 基与 Si 基的 GaN 射频器件工艺，其中 Si 基工艺线为 6 英寸线，其 D01GH 工艺器件栅长 100nm，功率达 3.3W/mm (@30GHz)，截止频率达 110/160GHz (f_T/f_{max})。在 OMMIC 公开的技术报告中，其 Si 基 GaN 器件工艺包含：(1) 原位生长表面钝化层；(2) AlN 势垒层；(3) AlGaIn 背势垒层；(4) 短源极-栅极间距(0.25 μ m)；(5) 再生长欧姆接触工艺，接触电阻 (R_c) 小于 0.1 Ω /mm 与开启电阻 (R_{on}) 小于 1 Ω /mm。美国 Macom 公司有 4、6、8 英寸 Si 基射频 GaN 器件工艺，其 0.5 μ m 工艺提供 DC 到 6GHz 分立器件与放大器模块，5W 6GHz 的分立器件效率>50% (@5.8GHz)。国内目前海威华芯具备 6 英寸 Si 基射频器件量产能力，目前量产的产品主要是面向 5G 移动通信的微基站应用，频率应用范围覆盖 6GHz 以下，输出功率 2-20W；其正在开发的 Si 基 GaN 栅长 0.15 μ m GaN HEMT 工艺已经取得突破性进展，器件功率增益截止频率 f_{max} 达到 180GHz，40GHz 下功率负载牵引扫描，峰值输出功率密度达到 1W/mm，该工艺可以应用于 5G 通信高频段。此外，公开报道中提到已有 6 英寸 Si 基功率 GaN 器件工艺的三安集成正在开发 6 英寸 Si 基 GaN 射频器件工艺。

学术界方面，传统 AlGaIn/GaN 外延结构中，中科院苏州纳米所在势垒层掺入少量 In，大幅提高载子迁移率，搭配 55nm 栅长，截止频率达 145/220GHz (f_T/f_{max})。我国台湾国立清华大学使用欧姆/肖特基复合漏极，提高器件跨导 (G_m) 与降低栅极-漏极电阻 (R_{gd})，搭

配 $0.2\mu\text{m}$ 栅极长, 截止频率达 $49.1/49.9\text{GHz}$ (f_T/f_{max})。德国 Fraunhofer IAF 在 Si 基板生长 SiC, 再进行 GaN 等外延, 搭配无金欧姆接触工艺 ($R_c=0.13\Omega/\text{mm}$) 与 80nm 栅极长, 截止频率达 $70/176\text{GHz}$ (f_T/f_{max})。此外, InAlN 势垒层因与 GaN 晶格常数匹配且有较佳极化系数, 逐渐吸引研究团队开发。我国台湾国立清华大学 InAlN/GaN 外延结构搭配 $0.11\mu\text{m}$ 栅极长, 截止频率达 $60/101\text{GHz}$ (f_T/f_{max})。瑞士苏黎世联邦理工学院 AlInN/GaN 外延结构搭配再生长的重 N 型掺杂欧姆接触 ($R_c=0.22\Omega/\text{mm}$) 与 50nm 栅极长, 工作频率达 $141/232\text{GHz}$ (f_T/f_{max}), 输出功率 $1.35\text{W}/\text{mm}$ ($@94\text{GHz}$), PAE 12% ($@94\text{GHz}$)。新加坡 SMART 使用 AlInN/GaN 外延结构搭配再生长的重 N 型掺杂欧姆接触 ($R_c=0.2\Omega/\text{mm}$)、短源极-漏极长度 ($0.3\mu\text{m}-0.7\mu\text{m}$)、 40nm 栅极长, 截止频率达 $250/600\text{GHz}$ (f_T/f_{max}), 为已报导的 Si 基 GaN 射频器件最高的截止频率。此外, 鱼鳍栅极器件近年已证实可改善器件线性度, 代表性开发团队为新加坡 SMART, 其结合介电层的鱼鳍栅极器件有较宽的等效通道宽度, 成功改善线性度。搭配 80nm 栅极长, 截止频率 68GHz (f_T), OIP3 达 39dBm (相同长度的水平器件, 截止频率 129GHz (f_T), OIP3 为 28dBm)。德国 Fraunhofer IAF 也演示了 AlN/GaN 鱼鳍栅极器件制备的 1.5W MMIC, 栅极长 100nm , 因具有较佳的栅极控制能力提高器件跨导, 截止频率达 $120/300\text{GHz}$ (f_T/f_{max}), PAE 8% ($86\text{GHz}-94\text{GHz}$)。

➤ 问题与挑战

近年在线性度方面突破的 GaN 器件通常为三维鱼鳍结构, 然而

该结构引入过多寄生电容，通常工作频率不如平面器件，且工艺复杂。场板虽然证实可改善 DC-RF 色散问题与漏极-栅极寄生电容，但引入额外电容导致器件工作频率下降。商业化产品通常同时提供有场板与无场板方案，有场板器件用以提高工作电压及抑制器件的电流崩塌效应而非提高 PAE（功率附加效率）。一般提高 PAE 方式：（1）提高器件的栅极肖特基接触质量，降低器件的栅极泄漏电流；（2）改善欧姆接触电阻与钝化层，但低欧姆接触的工艺通常需额外掺杂或再生长，较为复杂，且掺杂深度及浓度难以控制，会产生附加的漏电通道，降低器件的击穿电压。另外氧化物与 GaN 形成的氧化镓会在界面产生深级能态，因此常见用于半导体的氧化物(如氧化铝、氧化硅或氧化铅等)通常不适合用于器件钝化层，目前最广为使用的钝化层为氮化硅。

➤ 潜在解决方案

在线性度方面，有别于改善源栅间的沟道电阻与三维器件，以工艺方式使器件具备多个不同开启电压的寄生器件并联，可使器件 G_m - V_g 曲线平坦化，例如西安电子科大使用光刻与刻蚀工艺实现具有梯度厚度的势垒层，等效于多个不同势垒层厚度的器件并联。钝化工艺方面，氮化铝已证实可提供较氮化硅更佳的钝化，目前质量足够用于钝化的氮化铝仅能用电浆辅助原子层沉积生长，沉积速率不利于生产。

2、 器件结构

➤ 发展趋势

由于 GaN 射频器件漏极耐压通常不高，为追求低接入电阻与低载流子沟道延时，器件的栅极长度、源栅间距、栅漏间距等尽可能的

微缩，通常相应尺寸分别为小于 500 nm、小于 1 μm 、小于 5 μm ，且通常使用 T 形栅极结构。此外，毫米波器件为避免细栅时的短沟道效应（例如开启电压降低与关态漏电提高），势垒层厚度也需减薄至 10nm 以下，以增强栅极对沟道电子的控制能力，提高跨导。为进一步降低关态漏电，引入背势垒层结构，将电子限制于异质结的三角形量子阱附近，以提高跨导。早期部分团队亦利用缓冲层的梯度掺杂实现类似效果。此外，因器件表面/界面缺陷皆会降低器件的二维电子气浓度和引入陷阱效应，射频器件制备应尽量避免对 III 族氮化物半导体的刻蚀，因此在功率器件中常用的凹栅（Gate-recessed MIS-HEMT）或 P-GaN 栅极器件结构较不适用于射频放大器，也不太常见。目前市场上较少企业提供常关型 GaN 射频器件方案。3D 结构或 GaN 纳米线的射频器件近年也吸引各研究单位开发，主要是改善器件线性度。

➤ 问题与挑战

减薄 AlGaN 势垒层的同时，为维持一定浓度的二维电子气，Al 组份必须提高，然而提高 Al 组份会增强势垒层的张应力，增加缺陷密度，导致器件漏电，减低了器件的可靠性。

➤ 潜在解决方案

高铝组分的 AlGaN 薄势垒层所导致的应力缺陷问题发生在漏极侧栅极边界，具备本征应力的钝化层已证实可施加应力于该位置，从而中和势垒层的张应力。此外，InAlN 因有较强的极化特性，相较于 AlGaN 可感应较大的二维电子气浓度（10nm 的 InAlN 面电阻小于 250 $\Omega/\square$ ）。且 In 组份为 0.17 的 InAlN 其晶格常数与 GaN 匹配，理论

上在势垒层中没有内建应力，可有效改善应力造成的可靠性问题。然而 InAlN 的外延生长存在 In 组分涨落、晶相分立，从而缺陷密度比较大，其生长条件仍需优化。

3、 可靠性

➤ 发展趋势

GaN 射频器件常见的可靠性问题，包含高反偏压时的击穿、直流-射频色散效应(或电流崩塌效应)、逆压电效应等。对于逆压电效应，近年 MIT SMART (新加坡-麻省理工学院科研技术联盟) 中心的 Carl V. Thompson 团队证实缺陷容易产生于漏极方的栅极边界，且该缺陷的产生与氧有关。因此有效隔绝水气与氧气与器件表面的接触可改善该可靠性问题，例如使用较致密的钝化层。相较于 SiC 基器件，电流崩塌的现象较易发生于 Si 基 GaN 射频器件。英国布里斯托大学的研究团队发现，不同于高电阻的 SiC 衬底，Si 基衬底会注入电子，并被捕获在缓冲层顶部，造成电流崩塌。比利时 IMEC 的研究团队已证实改变 Si 衬底的掺杂梯度(例如采用 n/p/n⁺/p⁺结构)可调制衬底/缓冲层的电场，并有效改善电子捕获现象。此外，意大利帕多瓦大学证实电子在信道的局限性与器件工作中造成的热电子导致的电流崩塌效应强相关。因此背势垒或者梯度掺杂的缓冲层外延结构，除有利于提高器件的关态漏电和功率增益等性能外，亦有助于提高器件的可靠性。

➤ 问题与挑战

根据上述团队的研究结果，逆压电效应产生的缺陷无法完全避免，只能减缓或减少其发生机会。此外，上述提到的衬底掺杂以避免 Si 衬

底注入电子的方法会降低衬底电阻，引入额外射频损耗。

➤ 潜在解决方案

上述 InAlN 势垒层可有效降低势垒层内部应力，抑制逆压电效应，然而其生长条件仍需优化以供器件应用。此外，在电力电子器件中，用质子照射或钝化层优化也可改善衬底造成的电流崩塌效应，但其对于射频器件的可用性仍未获证明。

2.3 封装技术发展趋势

目前面向国防和军事应用、通信基站应用的 GaN 射频器件以陶瓷封装为主。为了进一步降低成本以适应大规模 5G 基站建设和手机等移动终端的应用要求，未来将主要发展有机封装、扇出封装、3D 封装等新型封装技术。由于 GaN 微波射频器件高输出功率的特性，增强散热的技术一直是开发重点，尤其是对于 Si 基 GaN 微波射频器件。

2.3.1 封装形式

GaN 射频器件封装过去以传统的贴片/打线的陶瓷封装为主，将向有机封装方向发展，并逐步引入倒装封装、扇出封装和 3D 封装等先进封装。引进 LCP 封装材料将大大改善其高频性能。

陶瓷封装主要应用于百瓦级大功率器件领域；有机封装主要应用于小功率的 DC 到毫米波的小功率器件领域。图 2-1 展示了 GaN 器件在不同应用频率与功率使用的封装结构图。

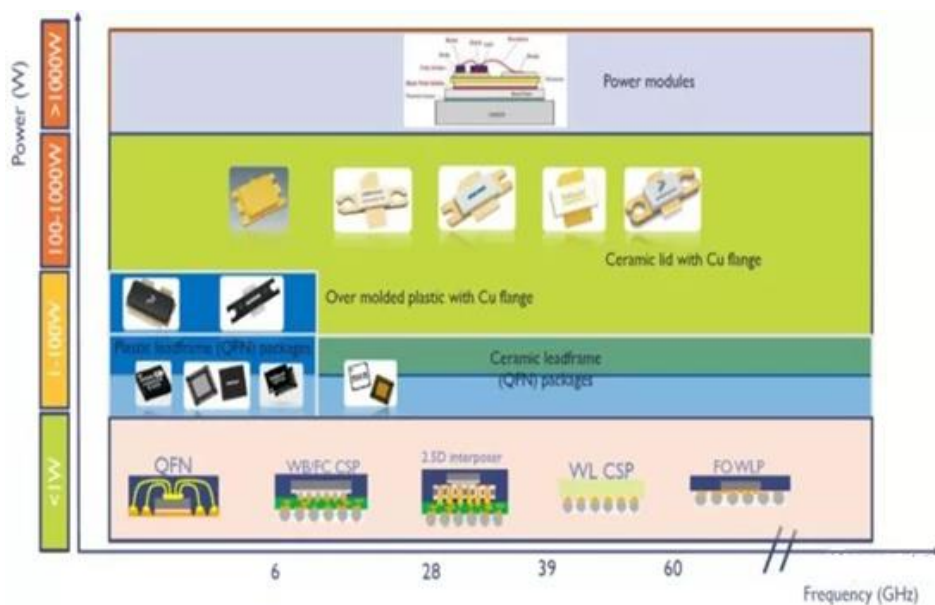


图 2-1 GaN 器件在不同应用频率与功率使用的封装结构

资料来源: Yole development

2.3.2 技术发展驱动力综述

近年来,对高集成度、高性能、低成本的电子产品需求越来越大,新型扇出型封装技术迎来了高速增长。其中,大面板级 (Panel) 扇出型封装技术凭借高密度、低厚度、高性能、高散热性等突出优点,自 2015 年开始就逐渐成为半导体封装技术的重点发展方向。根据 Yole 预测,从 2019 年开始,Panel 级 Fanout 封装市场将会有大幅度提升,从 2019 年的 0.84 亿美元增长到 2020 年的 2.44 亿美元,到 2024 年将达到 4.57 亿美元,如图 2-2 所示。

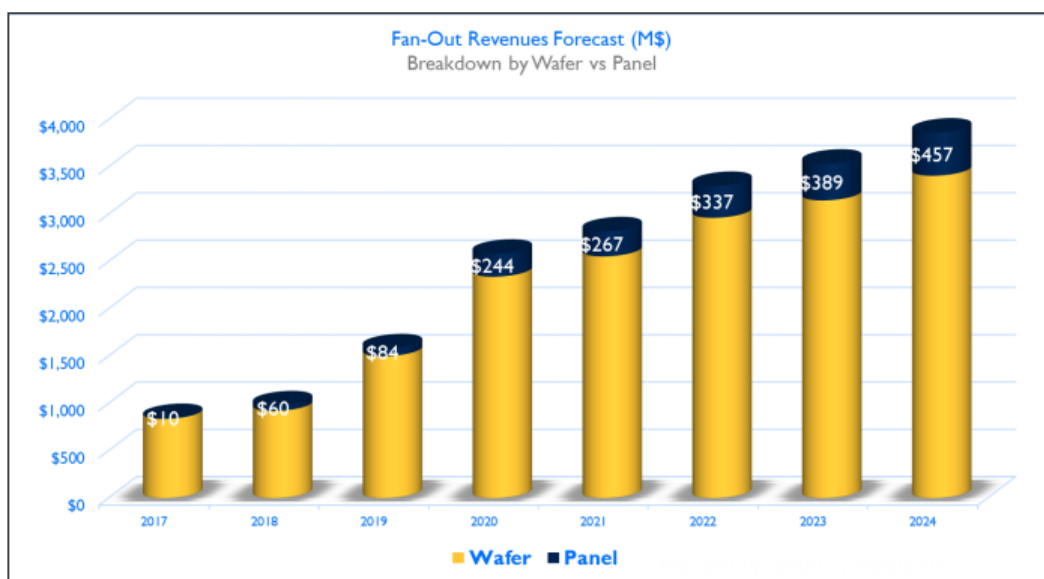


图 2-2 2017-2024 年 Fanout 市场预测 (M\$)

资料来源: Yole development

2.3.3 关键技术发展趋势

2.3.3.1 结构与尺寸

1、扇外型封装 (Fanout 封装)

相对于 4G 传输, 5G 的传输速率有数十至数百倍的增长, 从而对芯片封装提出了更高的要求: 低寄生参数、高集成密度、高散热性、轻薄短小的尺寸等。采用引线框架或塑封基板的传统封装形式已经不足以满足 5G 应用新型元器件如 5G 射频芯片、功率芯片、电源模块等对封装的需求, 扇外型 (Fanout) 封装成为一种可行的解决方案, 如图 2-3 所示。

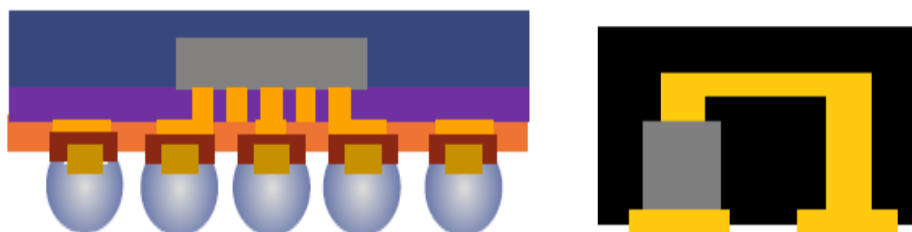


图 2-3 平面式芯片和垂直式芯片的 Fanout 结构

Fanout 封装主要通过晶圆表面进行后段加工处理，在晶圆表面再增加介质层和线路层，将原有的焊盘通过再布线的方式从芯片的四周排布变为全芯片阵列排布，充分利用芯片的面积，将原有的小焊盘密间距变为大焊盘大间距，最终完成封装。针对 5G 的应用，此种封装可减少电气互连延迟，增加芯片传输速率带宽，降低热阻，降低功耗，降低成本，同时容易实现异质器件集成。在市场驱动力的推动下 Fanout 封装逐渐成为主流解决方案。

目前在 Fanout 封装领域，主要是封装厂及少量的晶圆厂在发展晶圆级 Fanout 工艺，由于扇外型晶圆级封装对生产设备要求极高，以及晶圆最大直径 300 mm 的尺寸限制，逼近了技术和成本的双重瓶颈。大面板级扇外型封装（Panel 级 Fanout）可以突破晶圆尺寸限制，增大产出并降低成本，成为扇外型封装新的方向。Yole 研究表明，大尺寸的大面板级扇外型封装相对于晶圆级扇出封装，可将制造成本大幅降低 2 倍以上。

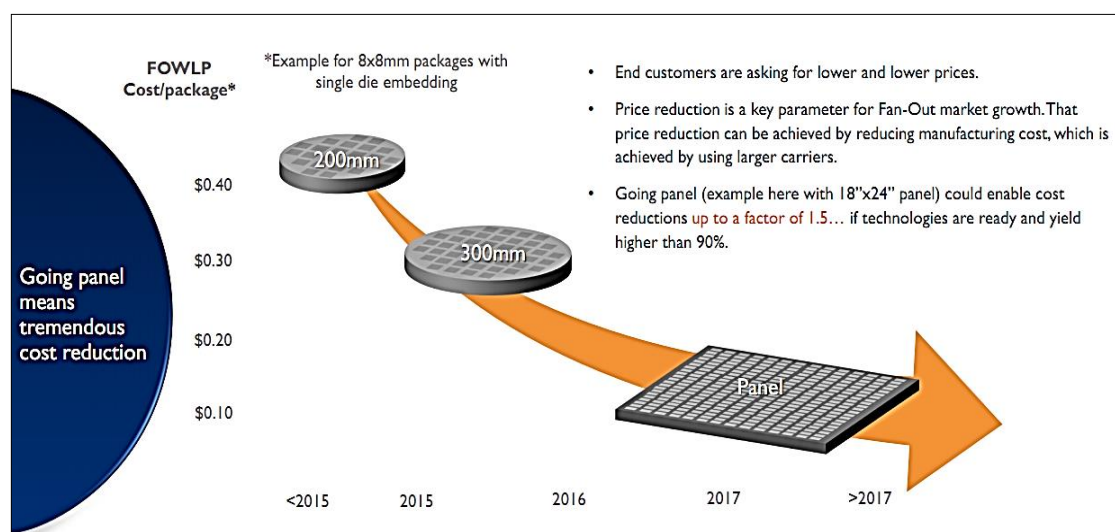


图 2-4 不同尺寸 Fanout 封装成本对比

资料来源: Yole development

2、晶圆级封装

晶圆级封装不需封装基板，在性能/成本上有非常高性价比的优势。在封装选型时，如果尺寸大小、工艺要求、布线可行性和 I/O 数量都能满足需求时，可能是成本最低的封装形式。晶圆级封装也能适用于广泛的市场，如模拟/混合信号、无线连接、汽车电子，也涵盖集成无源器件(IPD)、编解码器(Codec)、功率放大器(Power Amplifier)、驱动 IC (Driver)，射频收发器 (RF Transceivers)，无线局域网网络芯片(Wireless LAN)、导航系统(GPS)和汽车雷达(Automotive Radar)。其封装工艺相对简单，其中重要的技术工艺为植球技术，即将一定大小的锡球直接连接到芯片上，但植球前需要电镀或在化学镀一层铜层保证互联性能。

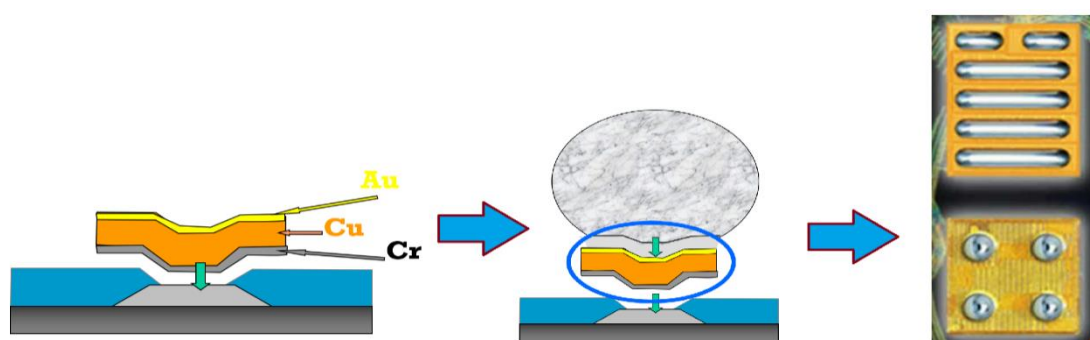


图 2-5 晶圆及封装工艺流程示意图

2.3.3.2 器件性能

在微波频率下封装内线键的性能更像电感器，在毫米波频率下，它更像谐振器或天线。因此，GaN 微波射频器件封装除了有一些通常(与频率无关)的封装问题外，微波和毫米波频率下还有一些特有的封装问题：

- 金属图案和介质厚度的设计，以保持所需的线路阻抗；

- 缩短互连长度，以尽量减少反射；
- 仔细选择材料，尽量减少对集成电路中电磁场的影响；
- 走线和封装谐振之间的耦合；
- 有源设备通常具有高功耗。

2.3.3.3 功率与散热

GaN 微波射频器件正沿着大功率化、高频化、集成化的方向发展，导致其热流密度不断增加。其尺寸不断缩小，功率密度不断增加，功率密度可达每平方厘米数千瓦，对随之带来的热管理和器件的可靠性提出了极大的挑战，同时导致应用成本急剧上升。基于 GaN 微波射频大功率器件的封装研发，需要重点解决大功率封装的散热的热管理问题。

热导率方面，SiC 基 GaN 的热导率远高于 GaAs，这意味着器件中的功耗可以更容易地转移到周围环境中，散热性更好。

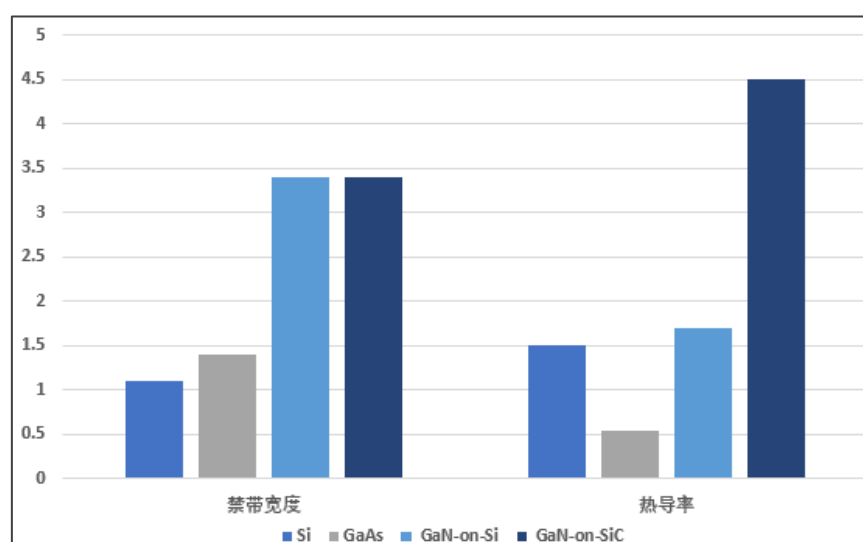


图 2-6 对于微波射频器件，GaN 器件优势在于带隙宽度与导热率

资料来源: CASA Research 整理

热管理对于射频系统来说尤其重要，因为它们本身能量损耗就比

较高，会带来比较严重的散热问题。GaN 在保持低温方面有其独特优势，另外即使在温度较高的情况下，相比于 Si 其性能影响较小。例如 100 万小时失效时间中位数 MTTF 显示，GaN 比 GaAs 的工作温度可以高 50℃。

GaN 的高功率密度，或从小封装中散热的能力，使其令人印象深刻。GaAs 的基本功率密度约为 1.5 W/mm，而 GaN 的功率密度范围为 5-12 W/mm。它还具有高电子迁移率，这意味着它可以将信号放大到上千兆赫的范围内。典型的 GaN 晶体管的截止频率 f_T 高达 200 GHz。此外，GaN 可以在相对较高的击穿电压水平（高达 80 V 左右）下完成所有这些操作。

GaN 器件的功率密度是砷化镓（GaAs）器件的十倍。GaN 器件的更高功率密度使其能够提供更宽的带宽、更高的放大器增益和更高的效率。

金刚石基 GaN 的技术正在走向成熟。与 SiC 基 GaN 和 Si 基 GaN 相比，金刚石基 GaN 具有极高功率输出密度和更小的占地面积。该技术适用于追求高性能的应用领域，如高功率基础电信站（BTS）、军事雷达和卫星通信。

相对于 Si 衬底来说，SiC 衬底具有更好的热传导特性，这使得在同样大小的封装里，基于 SiC 的 GaN 放大器可以输出更高的功率，从而使器件具备更好的可靠性。并且在相同输出功率的条件下，SiC 衬底良好的热传导性可考虑进一步缩小封装尺寸，从而降低器件的整体成本。目前业界超过 95% 商用的 GaN RF 器件采用 SiC 基 GaN。

如图 2-7 所示, Qorvo 的 QPD1013 晶体管采用 0.50 μm GaN-on-SiC 技术。它采用具有成本效益的 6.6 x 7.2 mm 双边扁平无引脚 (DFN) 封装, 与传统的金属陶瓷封装相比, 可以实现更简单的 PCB 组装。

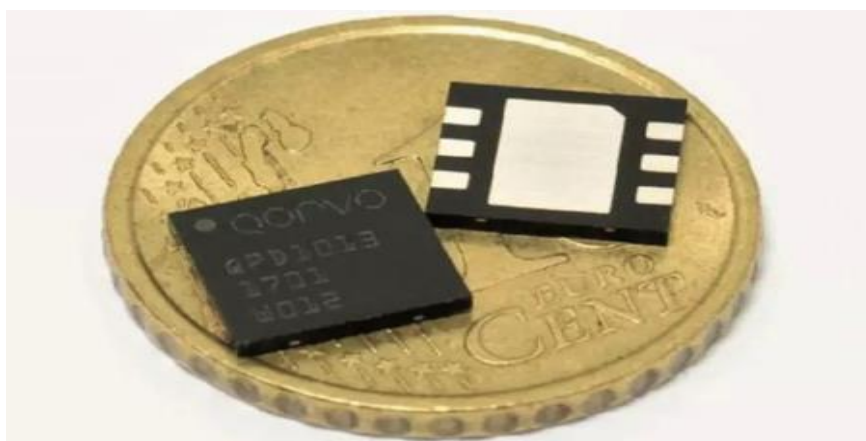


图 2-7 QPD1013 晶体管

资料来源: Qorvo

尽管 Qorvo 的 GaN 晶体管效率非常高, 但考虑到高射频功率, 意味着即使是高效的功率放大器, 功耗也将非常显著。由于晶体管是表面贴片封装 (SMT), 因此需要仔细设计 PCB 以优化系统的热性能。两种主要的优化 PCB 热性能的技术为: 在晶体管的接地焊盘下使用覆铜孔阵列; 使用铜币技术。铜币是在制造期间嵌入到 PCB 中的一块实心铜 (通常称为金属块), 以增强从晶体管到安装了 PCB 的载体之间的有效热传递。许多 PCB 制造商都具有覆铜孔技术的经验, 但射频频率下的铜币技术还未成熟。

从散热角度考虑, GaN 比 LDMOS 或 GaAs 的微波射频器件具有更高的功率密度。散发的热量需要在封装中散掉, 以便微波射频器件保持足够低的结温, 并确保较长的使用寿命。

目前封装的主要散热通道是通过芯片贴装板进入 PCB。PCB 的精心设计对于确保向环境的良好散热、保持晶体管温度在适当水平至关重要。图 2-8 展示了两种 PCB 增强散热的方法，一种使用覆铜孔阵列（如图 2-8 右侧所示），另一种使用装配到 PCB 中的铜币（如图 2-8 左侧所示）。在这两种情况下，PCB 都安装在了铝载体上。

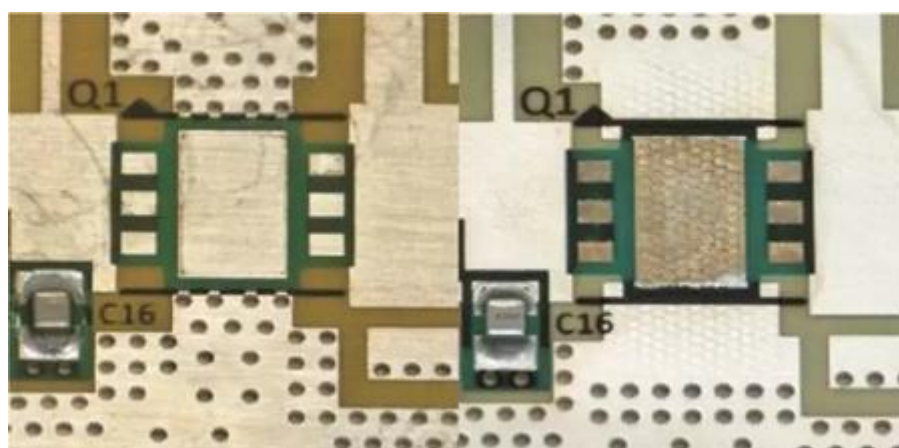


图 2-8 铜币(左)和覆铜孔(右)

虽然铜币 PCB 有效的减少了热阻，但是必须确保 PCB 的表面保持平坦，以及在铜币和 DFN 的接地焊盘之间的接触良好。任何气隙或焊缝都可能会削减铜币方法的内在优势。

GaN 微波射频器件瞬态热场的机理问题与实际应用中产生的瞬间高热问题非常重要。另外，高校和研究院所的实验室里正在进行对新型散热技术的研究，包括双面液体散热设计、热电散热技术、纳米流体散热技术、柔性热管散热技术、超高导热材料等。适用于 GaN 微波射频器件的先进的温度测试设备也正在进行研究和开发。

2.3.3.4 材料与工艺

封装模块在材料与工艺方面的发展趋势为：基于高频特性来进行新材料（LCP、modified PI 等）方面研发，在工艺方面引入 Flip-chip

和 Fanout 等先进封装方法。先进封装的目的在于减少高频损耗，降低电感，优化高频器件的性能，提高可靠性。

LCP（液晶聚合物）是一种极具吸引力的材料，可实现具有机械灵活性的低成本密封封装，这对千兆无线通信、雷达和成像系统的应用极具吸引力。LCP 研究是目前微波工程中一个非常热门的课题，但是，使用 LCP 也遇到了一些问题。LCP 的化学惰性具有优异的电气和机械性能，但是也可以起到阻碍实际电路制备的作用。通过深入研究，了解 LCP 的设计和实现的实际问题，根据微波封装和电路模块的要求来灵活处理 LCP。

2.3.3.5 可靠性

除了成本居高不下，器件性能完全发挥和缺乏安全稳定的可靠性仍是微波射频器件应用的主要障碍之一。但是随着新型器件结构、新的拓扑设计以及新封装形式的出现，可靠性问题将逐步得到解决，进而加快商业化应用。例如，使用扇出封装不仅提高了器件性能，也可改善器件的可靠性。

相对于 Si 衬底来说，SiC 衬底具有更好的热传导特性。这使得在同样大小的封装里，基于 SiC 的 GaN 放大器可以输出更高的功率，并具备更好的可靠性。在相同输出功率的条件下，SiC 衬底良好的热传导性可考虑进一步缩小封装尺寸，从而降低器件的整体成本。

热管理对于 RF 系统来说尤其重要。因为它们本身能量损耗就比较高，会带来比较严重的散热问题。GaN 在保持低温方面有其独特优势，另外即使在温度较高的情况下，相比于 Si 其性能影响较小。例

如 100 万小时失效时间中位数 MTTF 显示, GaN 比 GaAs 的工作温度可以高 50℃。

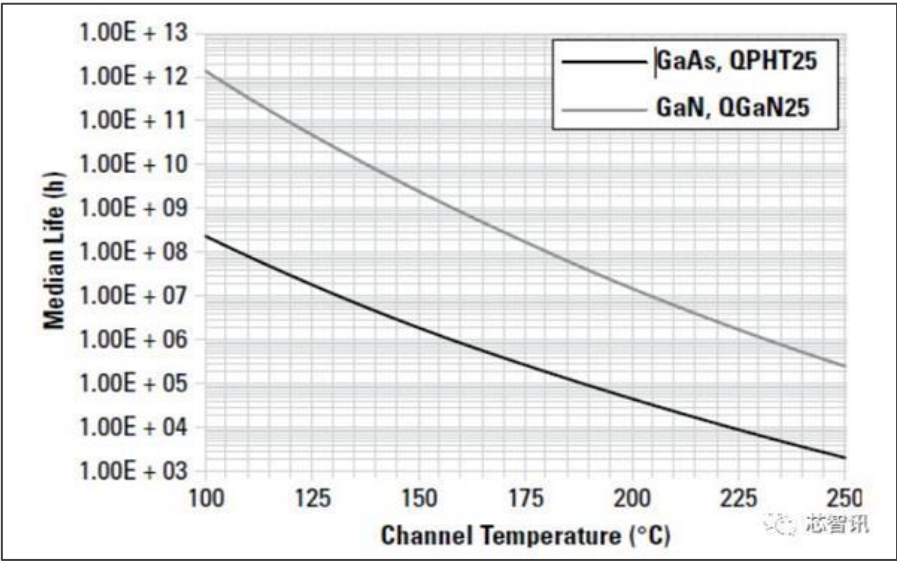


图 2-9 GaAs 与 GaN 的可靠性比较

资料来源: Qorvo, 中银国际证券

2.4 应用技术发展趋势分析

目前 GaN 微波射频器件的产品主要是面向国防雷达和卫星通信、无线通信基站、射频能量等领域应用的功率放大器,以 SiC 基 GaN 的材料技术为主。未来的发展趋势是开发更具成本优势的 Si 基 GaN 微波射频产品和更高输出功率的金刚石基 GaN 微波射频产品。

2.4.1 GaN 射频器件的现状

目前 GaN 射频器件的应用市场主要包括国防、卫星通信、无线通信基站,其中,无线通信基站是 GaN 射频器件最大应用市场。据 Yole 统计,2018 年基站领域 GaN 射频器件市场规模为 1.5 亿美元。5G 商用宏基站将以 64 通道的大规模阵列天线为主,按三个扇区计算,单基站功放需求量高达 192 只。未来五年随着 GaN 技术的进步

和规模化发展，GaN 功放在基站的渗透率将不断提升，预计 2023 年将超过 85%，带动 GaN 功放需求量达到 1.94 亿只。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%。

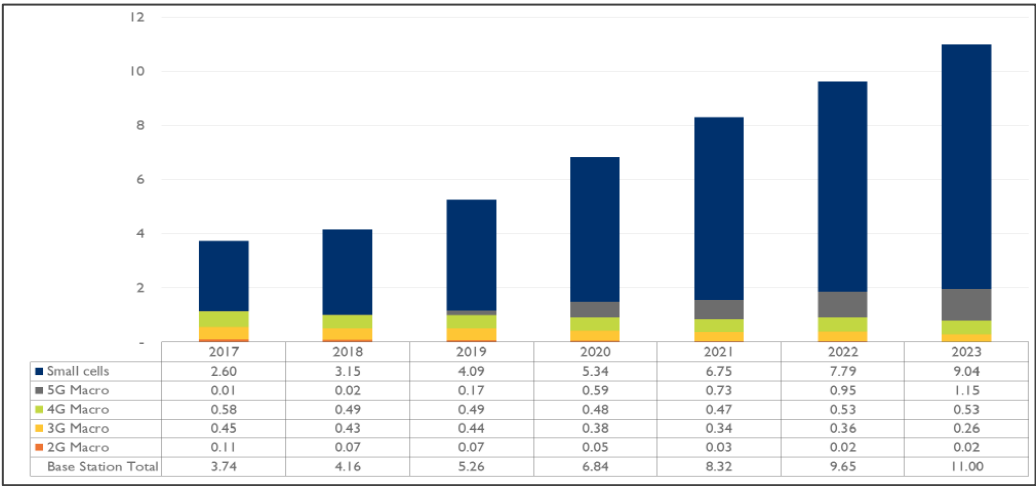


图 2-10 2017-2023 年基站数量预测（单位：百万个）

资料来源：Yole, CASA Research

GaN 射频器件的产品目前有三大类，一种为应用于 4G 宏基站及 CATV 等系统的大功率功放管，饱和功率等级从 100W 到 300W 甚至更大；另一种是应用于 Sub-6 GHz 的 5G Massive MIMO 基站的 GaN 功放模块，单模块输出平均功率为 5-10 W，要求高集成、小体积；第三种是应用于 5G 高频频段的 GaN MMIC，饱和输出功率为 2W-10W，主要用于人员密集的应用场所。

基于在前期工艺与技术积累，国外 GaN 射频器件厂商针对以上应用推出了相关产品，国内厂商也在相关领域有所涉足，前期产品主要服务于军工，产品指标与国外相当，规模量产能力不足。随着 5G 市场的兴起，国内加大投资力度和技术开发力度，在规模量产的良率、

稳定性以及可靠性等方面均有大幅提升，但仍需开展产业化技术攻关，进一步提升良率，降低产品成本。

2.4.2 GaN 射频器件的发展趋势

1、SiC 衬底技术仍是主流，Si 衬底有小部分应用

目前 90%以上厂商采用基于半绝缘 SiC 衬底的 GaN 外延技术制备 GaN 射频器件，少部分采用 Si 衬底技术。

SiC 衬底的优势在于：散热性能好，可以满足大功率器件的散热要求、外延工艺较为成熟，外延片缺陷密度较低、供应链体系较为完善，但缺点在于衬底尺寸相对较小，衬底成本较高。SiC 基 GaN 射频器件适用于受性能驱动较大的应用领域，其射频器件的优势在于优异的器件性能，能同时实现高频高增益适用于性能驱动领域，如国防、宏基站等。

Si 衬底的优点在于：衬底工艺成熟，可扩展的晶圆尺寸较大，衬底价格较便宜，且基于成熟大尺寸 Si 衬底加工和与 CMOS 工艺兼容的器件加工工艺，规模产后可以实现低成本，但是缺点在于 Si 衬底与 GaN 外延层晶格失配较大，外延片存在较高缺陷密度，且由于 Si 衬底散热性能较差，主要适用于中小功率器件。在通常情况下，工作频率越高，对器件的输出功率要求会降低，对散热要求也会同步降低，因此 Si 基器件适用于受成本驱动较大以及对输出功率要求相对较低的应用领域，如无线回传以及小基站、射频能量（例如微波炉加热功能）、有线电视（CATV）、卫星通信系统（VSAT）等领域。

2、器件向高效率、高线性度、模块化和多功能集成方向发展

从器件本身而言，GaN 射频器件将向着高频率、高效率、高线性度和多功能集成方向发展。GaN HEMT 射频器件的工艺制程在百纳米级左右，且在不断微缩。现在 GaN 工艺尺寸正在从 $0.5\ \mu\text{m}$ 至 $0.25\ \mu\text{m}$ 向 $0.15\ \mu\text{m}$ 转换，一些主流厂商（如 Qorvo）甚至在尝试 $60\ \text{nm}$ 。一般来说，大多数制造厂提供两个或三个标准工艺： $0.5\ \mu\text{m}$ 高压工艺主要处理频率低于 $6\ \text{GHz}$ 的高功率器件， $0.25\ \mu\text{m}$ 中压（ $28\text{V}-40\text{V}$ ）工艺处理更高频率的应用高达约 $18\ \text{GHz}$ 。有的制造厂提供第三个选项，即更小栅极长度（ $0.15\ \mu\text{m}$ ）用于毫米波应用（高达 $40\ \text{GHz}$ ）。为了适应未来基站应用需求，GaN 器件将呈现如下发展趋势：

➤ 高效率、高线性度

效率和线性度是 GaN 功率放大器的核心指标，高效率和高线性度的功率放大器是未来发展趋势。Doherty 技术和包络跟踪技术可以有效地提高功放的平均效率和线性度，是目前国内外研究的热门功放效率和线性度提升技术。将这两种技术结合，可以使得功放更高效地放大高峰均比信号。在架构层面，Doherty 和包络跟踪（ET）等将是主流结构。现代通信系统中 Doherty 已经获得广泛应用。Doherty 功放通过与输入信号成反比地调整负载阻抗，从而实现高回退状态下高效率的放大。而 ET 功放通过动态调节偏置电压，使之随着信号包络而变化，从而使得功放工作于高效率情况下，且 ET 功放在提高效率的同时不受射频频率的限制。与 Doherty 功放仅在射频域上做处理不一样，ET 功放还包含部分基带信号的处理。典型的 ET 功放至少应包含包络调制器、包络赋型、延迟对齐、射频放大链路。

➤ 小体积模块化

模块化是未来 GaN 器件的重要趋势，尤其在 sub-6GHz 领域，多芯片模组（MCM）通过将高效率 GaN 射频芯片与 IPD 组合使用，结合 Doherty 模块设计，可有效地解决 Massive MIMO 基站的射频功放需求，具有小型化、高集成度、高组装效率、高灵活性等特点。

➤ 多功能集成

全 GaN 射频模块的集成以 MMIC 为代表，MMIC 是采用平面技术，将元器件、传输线互连线直接制作在半导体基片上的功能模块，单片微波集成电路包括多种功能电路如低噪声放大器 LNA、功率放大器 PA、开关 SW 等电路，最终形成高性能的射频前端。

2.4.3 GaN 射频器件应用的整体技术路线

2.4.3.1 GaN 三种微波功率器件比较

Si 基 LDMOS 器件的缺点是工作频率比较低，具有大的输出功率，Si LDMOS 放大器的带宽会随着频率的增加而大幅减少，仅在不超过约 3.5 GHz 的频率范围内有效，但价格便宜，适合于 4G 基站应用。GaAs 器件工作电压低，工作结温低，输出功率较低，一般低于 50 W。GaAs 适用于移动终端设备射频前端等小功率市场。

SiC 衬底的 GaN 器件拥有较高的热导率及电子迁移率，可同时适用高功率和高频率。目前商用的 GaN 射频器件工作频率可达到 W 波段，产品输出功率达到几百瓦，适合于 5G 基站应用。

GaAs 材料热导率较低，散热能力较差。因此 GaAs 微波射频器

件的输出功率较低，一般低于 50 W。GaAs 适用于移动终端设备射频前端等小功率市场。Si 基 LDMOS 器件的缺点是工作频率比较低，Si LDMOS 放大器的带宽会随着频率的增加而大幅减少，仅在不超过约 3.5 GHz 的频率范围内有效，采用 0.25 μ m 工艺的 GaN 微波射频器件频率可以达到其 4 倍，带宽可增加 20%，功率密度可达 6-8W/mm。

GaN 拥有较高的热导率及电子迁移率。配合 SiC 衬底，GaN 器件可同时适用高功率和高频率。目前商用的 GaN 射频器件工作频率可达到 40GHz，进入 Ka 波段。

预计 2020 年，全球 5G 市场的批量发货将开启，在无线基站应用领域，GaN 射频器件凭借其高频段、高功率、大带宽的优势，市场份额将逐步提升，GaN 将逐步取代 Si LDMOS 和 GaAs 从而占据主导地位。在射频能量领域，之前 LDMOS 凭借其高功率低成本的优势，在行业内占据一定份额，但是在未来随着 GaN 功放管的成熟，也将抢占一部分射频能量市场。在低功率，特别是手机终端和小基站领域，依然主要是 GaAs 的市场，主要原因还是 GaAs 的高集成性和低成本特点，其在很长一段时期内，市场份额比较稳定。

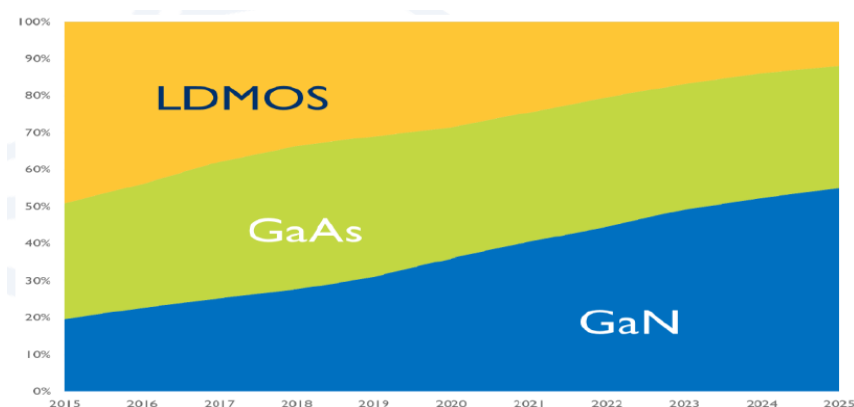


图 2-11 2015-2025 年射频功率市场不同技术路线的份额占比

资料来源: Yole, CSA Research

➤ 差异化发展

GaAs、GaN 均可面向毫米波通信应用，前者在工艺、芯片设计与应用等方面成熟度更高，Qorvo、ADI 已有大量的毫米波芯片供货和客户群。从成本上来看，6 英寸 GaAs 外延片价格仅为 4 英寸 GaN 的 1/10，这有可能成为 GaAs 产品有竞争力的重要因素之一。而由于 GaN 器件具有更高的功率密度和效率，可以有效减少系统链路通道数，就更便于 DPD 系统的引入，降低系统复杂度，对系统的性能优化更加有利。因此，研究 GaN 的 5G 高频系统方案目前是一种趋势。

表 2-2 GaN、GaAs 和 LDMOS 性能比较

材料体系	高功率	高效率	多频段	大带宽	小体积	轻重量	高可靠性	封装低成本
GaN	√	√	700MHz~100GHz	>500MHz	√	√	√	√
GaAs			<80GHz	500MHz~1GHz			√	
Si			<3.8GHz	<100MHz			√	

数据来源：CASA Research 整理

➤ 共性弱项

毫米波芯片工艺更为复杂，具有较高的技术门槛和技术壁垒，需要 Foundry 与设计公司在工艺、芯片设计与应用上长期合作携手打开市场，故工艺开发与固化的周期长。

2.4.3.2 不同衬底的 GaN 射频器件的竞争分析

目前 GaN 射频器件外延材料制备主要基于两种衬底材料，即 SiC 衬底和 Si 衬底，蓝宝石衬底主要应用于光电子领域，在此不做分析。

➤ 应用驱动

SiC 材料具有高热导率，并与 GaN 的晶格失配率最小，因此是目前主流 GaN 射频器件的衬底材料。国际上具备批量应用的射频器件供应商都采用 SiC 衬底的技术路线。4 英寸 SiC 衬底目前产业已经成熟，6 英寸 SiC 衬底也已经推出市场，国际上主要有美国的 Cree 和 II-VI 公司可批量提供。SiC 基 GaN 射频器件的优势在于优异的器件性能，能同时实现高频、高增益，适用于高性能驱动领域，如国防、宏基站等。

Si 衬底的制备工艺比较成熟，可扩展的晶圆尺寸较大，衬底价格较便宜，Si 基 GaN 微波射频器件规模生产后可以实现低成本。但是缺点在于 Si 基 GaN 的材料存在较高缺陷密度，并且 Si 衬底散热性能较差，Si 基器件适用于受成本驱动较大以及对输出功率要求相对较低的应用领域，如无线回传以及小基站、射频能量（例如微波炉加热功能）、有线电视（CATV）、卫星通信系统（VSAT）等领域。随着 5G 通信技术的发展，Si 基 GaN 器件因其兼容主流 6-8 英寸 CMOS 工艺平台和具有低成本、可量产优势，有望成为面向 5G 微基站小功率应用的首选微波功率器件技术。

➤ 差异化发展

从应用领域来看，Si 衬底的 GaN 射频器件目前无法满足对大功率以及高散热性的要求。目前民用通信领域，对大功率 GaN 功放的需求仍由基于 SiC 衬底 GaN 射频器件来满足。未来在高频领域内，随着器件功率的降低以及对散热的需求减小，Si 基 GaN 微波射频器

件而由于 Si 衬底的成本优势和规模优势，将获得巨大的市场空间。

➤ 共性弱项

基于以上两种衬底技术的发展，国内尚未形成成熟的产业。目前国产器件的产品性能有了一定提升，但是产品的良率仍是目前最主要的共性弱项。良率的提升是一个重要的技术难题，只有通过不断的外延材料制备研究、流片试验、工艺窗口改进研究、设计优化等，才能从根本上解决产品良率的问题。同时，新兴行业仍面临着产业人才短缺的问题。

2.4.4 民用通信领域技术路线

在 5G 通信中，宏基站+微基站是重要的组网架构，但又分别采用微波大功率管、毫米波芯片来实现 5G MIMO。以国内为例，2019 年国内部署的 5G 基站约 10 万站，而到 2020 年，国内将有 40-80 万个 5G 基站的建设需求。5G MIMO 天线阵列将达 64 通道，甚至是 128、256 通道，如此庞大的天线阵列在功耗、尺寸、成本等方面都面临前所未有的挑战。

➤ 应用驱动力

从 GaN 射频器件的需求来看，2019 年我国 5G GaN 射频器件市场规模为 23.7 亿元，成为射频市场主要拉动因素。

根据 CASA Research 和相关资料研究，目前 4G 宏基站单站成本大概是 15 万元，5G 基站中采用 MIMO、RRU 集成等技术，进一步提高了基站成本，预计单基站的平均成本将是 4G 的 1.25 倍，约 18.75

万元；结合 4G 单站价格变化情况，5G 基站价格每年以 3%到 4%幅度下降，未来 3-5 年内有可能与 4G 基站成本持平。

国内在 GaN 射频器件领域已经取得了突破，国产 GaN 射频器件已经成功应用在无线基站上。依靠国内巨大市场的优势，国内 GaN 射频企业拥有巨大的发展空间。

依据目前我国运营商对 5G 的商用测试情况，预计未来 64T64R 在宏基站中将成为主流方案。这意味着功率放大器的数量将大幅增长。以三个扇区计算，单基站功率放大器的需求量高达 192 只，较 4G 基站 4T4R 方案功率放大器使用量增加 16 倍,预计 2023 年 GaN 功率放大器需求量将达到 1.49 亿只。

随着 GaN 技术水平的提高，其规模化优势不断显现，加之移动通信要求的工作频率和带宽日益增加，GaN 射频器件的渗透率将不断提升。预计 2023 年，GaN 射频器件市场渗透率将有望达到 85%。2018-2022 年五年内，GaN 射频器件市场年均增速均超过 50%，到 2022 年 5G 所需 GaN 射频器件市场规模有望达到顶峰，预计将达到 115.24 亿元。

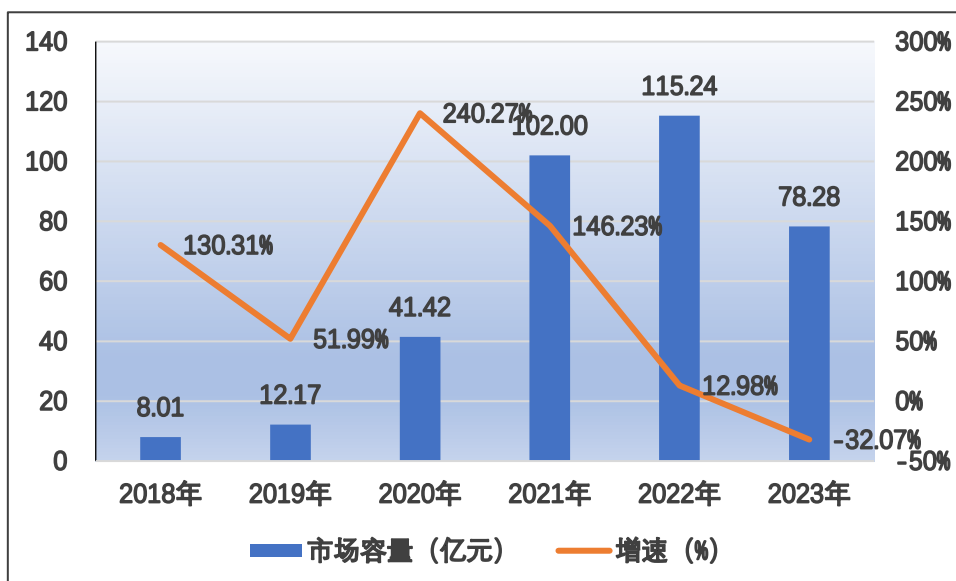


图 2-12 我国 5G 用 GaN 射频器件市场容量及预测

数据来源: CASA Research

➤ 对器件的要求

针对 5G 通信系统收发前端的应用领域，宏基站、微基站中的功率放大器均需在不同频率应用时达到高效率、高增益，还同时获得较好的线性等指标；另外，器件的工作频率、集成度要同时提升。面对产业发展的需求，良率的提升也是有效参与国际竞争的重要指标之一。

➤ 发展预测

国产 GaN 器件需要提升规模应用的能力，以及在未来毫米波领域内形成具有竞争优势技术的能力和产业能力。如何提升器件的集成度、提高产业化良率技术是目前中低频阶段需要解决的重要任务。大尺寸 Si 衬底在探索 GaN 小功率、高集成度的 MMIC，是未来技术发展方向之一。

2.4.5 射频能量技术路线

射频能量由功率放大器中的射频晶体管产生，频率为 2.45 GHz 的 ISM 频段，为各种应用提供能量。固态射频功率器件较磁控管具

有多种优势，如低压驱动、可靠性、较小尺寸，以及能对微波能量实现更为精确的控制，有望在微波炉、工业加热、汽车点火系统、医疗设备等应用中普遍使用。

➤ 应用驱动力

固态射频功率器件有望取代磁控管。现有的微波炉多数是以开/关的开环系统运作，无法对能量的反馈进行测量。而固态微波炉可以对负载本身直接测量，通过测量耦合器的反射损耗，调整射频加热信号的幅值、频率以及相位，使食物加热更加均匀。一旦价格降低，家庭烹饪应用的射频能量方案就可能拥有巨大市场。

在医疗领域，射频能量可应用于癌症治疗，通过把癌细胞加热至43℃从而杀掉癌细胞并保留好细胞。

➤ 对器件的要求

射频能量应用的首要目标是降低成本。低成本、百瓦级射频功率输出是微波炉加热源对固态射频功率器件的要求。因此，Si基射频器件有望在射频能量领域发挥作用。同时，功率放大器的有效散热是保证器件效率等性能的重要指标。

➤ 发展预测

Si基大栅宽 GaN 射频功率器件在上述应用中已被关注，但上述器件的效率、可靠性与稳定性是产品能否推向市场的重要因素之一。

2.4.6 军事国防领域技术路线

微波高频 GaN 器件主要应用于高精度制导、高精度探测与高精度成像。微波毫米波电路主要应用于攻击探测一体化雷达系统。

➤ 应用驱动力

小型化、高精度。

➤ 对器件要求

高频器件面向 W、D 波段的脉冲应用；微波毫米波电路面向 KW 发射机和百瓦超宽带 GaN 应用。

2.4.7 其他细分领域技术路线

目前低轨、高吞吐量、低延时的通信卫星的星座已进入全面实验组网阶段，而中轨高通量卫星的星座也进入快速发展期。

➤ 应用驱动力

卫星通信给 K-Ka 波段毫米波芯片带来巨大的发展机会，带来了新的客户市场。

➤ 对器件要求

与 5G 毫米波通信芯片指标相近，但需要具有抗辐照特性。

3 GaN 微波射频技术专利分析

3.1 专利数据简述

GaN 微波射频产业专利数据主要通过检索中国国家知识产权局专利数据库获得。

GaN微波射频产业技术主要包括：制备工艺，器件，电路设计、封装测试技术四个二级技术分支（如图3-1所示）。其中，制备工艺技术主要包括外延生长、外延设备、场终端技术、欧姆接触技术、栅技术、异质集成、无源元件等三级技术分支；器件技术主要包括金属氧化物半导体场效应管（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor，MOSFET）、金属半导体场效应管（Metal Epitaxial-Semiconductor Field Effect Transistor，MESFET）、高电子迁移率晶体管（High Electron Mobility Transistor，HEMT）、金属绝缘体半导体场效应晶体管（Metal-Insulator-Semiconductor Field-Effect Transistor，MISFET）、肖特基势垒二极管（Schottky Barrier Diode，SBD）等三级技术分支；电路设计技术主要包括射频发射电路、射频接收电路、单刀双掷开关（Single Pole Double Throw Switch，SPDT）等三级技术分支；封装测试技术主要包括散热技术、微波封装、筛选技术与可靠性保证、静电防护技术等三级技术分支。

另外，外延生长技术还可分为GaN衬底、蓝宝石衬底、SiC衬底、Si衬底，GaN、AlGaN、InGaN等外延材料，AlN、InAlN势垒，衬底减薄等四级技术分支；外延设备分为MOCVD系统和MBE系统等四级技术分支；异质集成可分为CMOS兼容欧姆接触、CMOS兼容GaN

HEMT、GaN Si CMOS异质集成等四级技术分支；无源元件可分为片上电阻、微带线等四级技术分支；射频发射电路可分为混频器、功率放大器等四级技术分支。

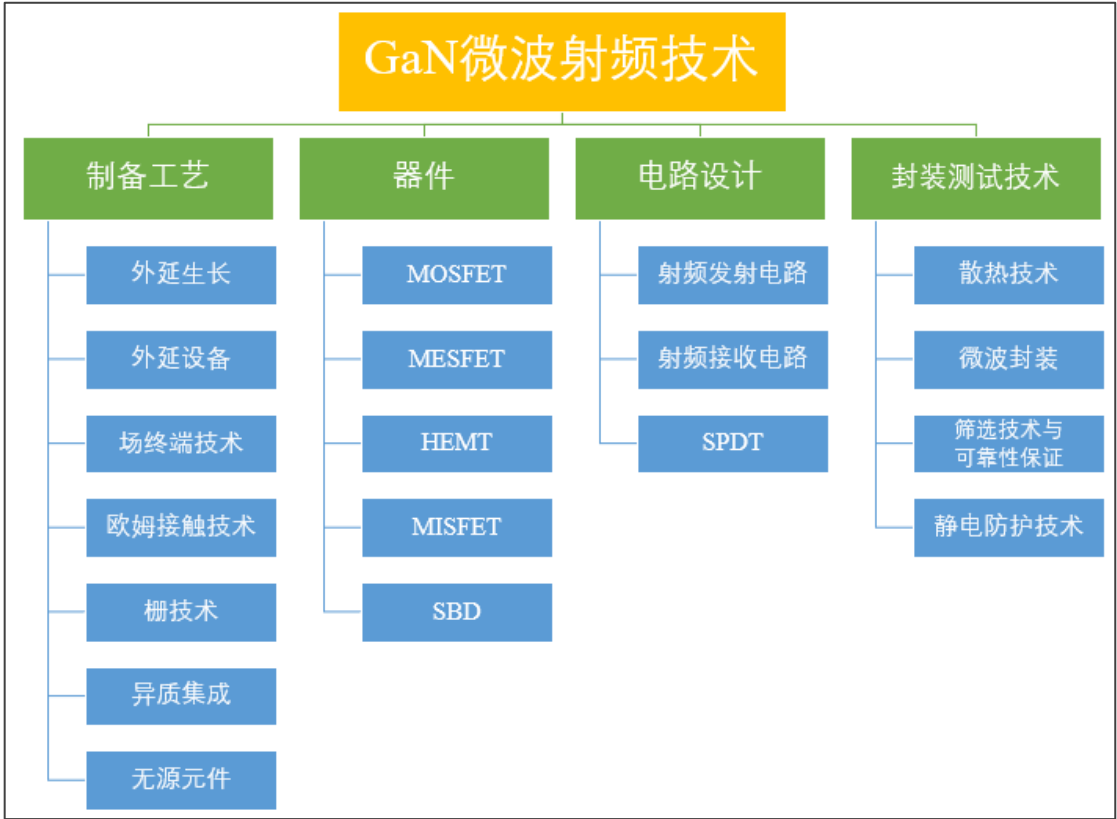


图 3-1 GaN微波射频技术框架

通过对1999-2019年专利检索结果显示，专利数共有4821项，对专利数据的处理过程如下：第一，为了便于准确理解各项专利的内涵，利用中国国家专利数据库检索平台，对4821项专利的摘要进行了逐项查询、下载，作为分析每一项专利的主要依据；第二，邀请GaN微波射频产业技术领域相关专家，对4821项专利进行分析，筛选出属于GaN微波射频产业技术专利3343项。

3.2 专利分析

专利分析主要是指通过对已公开的有关专利文献进行筛选、统计、

分析。本研究以3343项专利为基础，对GaN微波射频产业技术专利的总量、国别以及专利数量位居前10位的企业进行了分析。

3.2.1 专利态势分析

如图3-2所示，在3343项专利中，制备工艺1644项，约占49%；器件844项，约占25%；电路设计180项，约占6%；封装测试技术675项，约占20%。

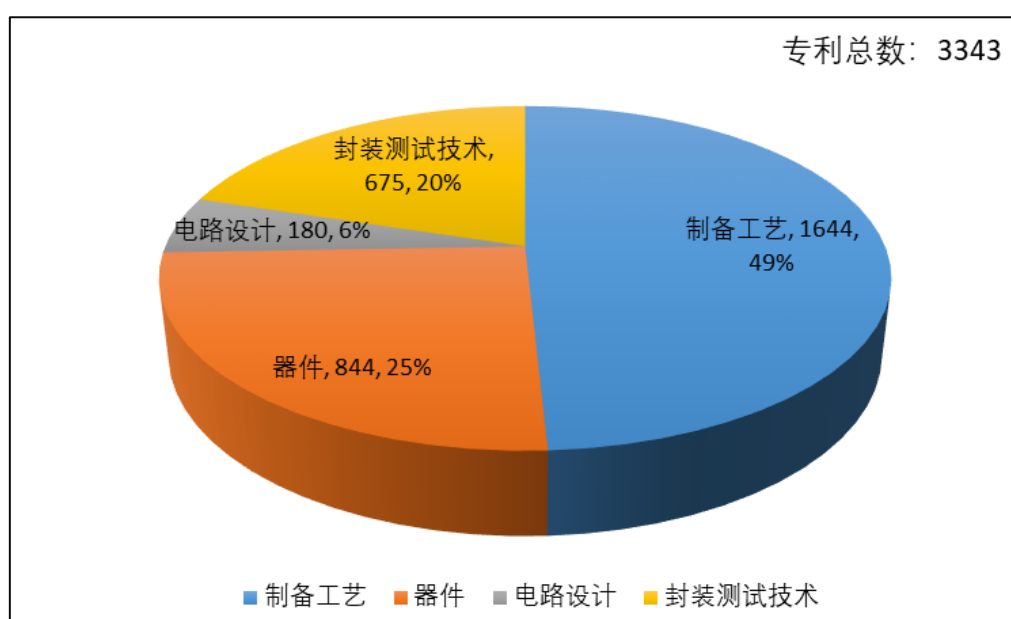


图3-2 GaN微波射频产业专利一级技术分类分布

在制备工艺中，外延生长专利到达了1351项，其中包含了GaN衬底、蓝宝石衬底、SiC衬底、Si衬底，GaN、AlGaN、InGaN等外延材料，InAlN势垒、AlN势垒技术，衬底减薄技术等；外延设备专利达到34项，其中MOCVD相关的23项，MBE相关的11项；场终端技术60项；欧姆接触技术117项，栅技术43项，异质集成24项；无源元件15项，其中GaN片上电阻3项，微带线12项。

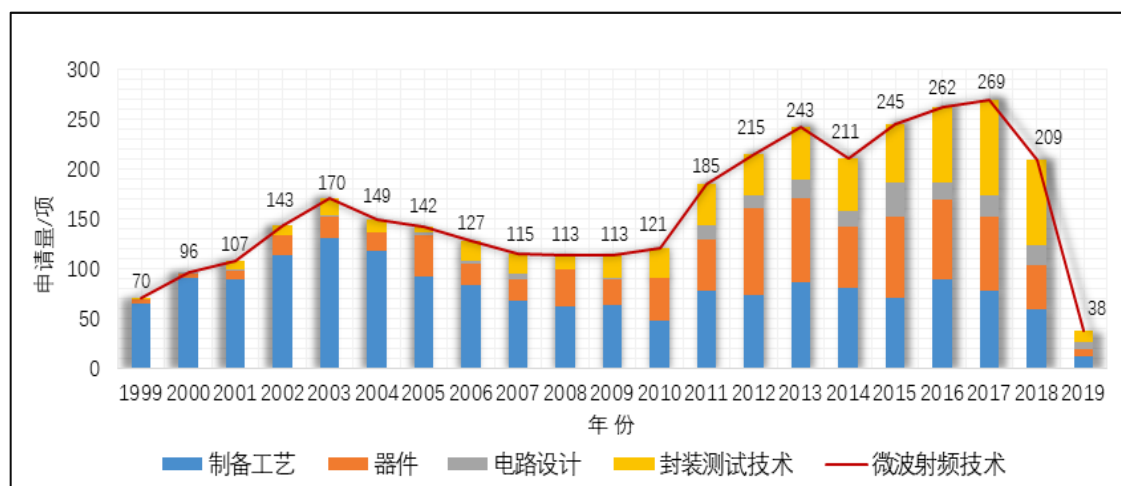


图3-3 GaN微波射频技术专利申请态势

如图3-3所示为近20年GaN微波射频技术专利申请态势，专利申请大多集中在从2011年至今的9年内，其间的专利数为1877项，约占总量的56.15%。2017年专利申请量为269项，按年度申请量排名第一，约占总量的8.05%；2016年专利数为262项，约占总量的7.84%。可见自2011起GaN微波射频产业专利申请又迎来自2003年后第二波热潮。

在制备工艺中，该领域关注的重点是GaN等外延材料的生长与制备，从图3-3可见，在经过2003年的顶峰之后，制备工艺专利申请降回到稳定发展的阶段，这也与外延制备工艺，投入大，回报周期长的特点密切相关。

在器件领域，在2011年及以前的年份里专利申请数量并不多，均不超过总量的6.05%。但从1999年开始，器件领域的专利申请从总体趋势上看，处于一个逐步上升的情况，随着计算机辅助仿真模拟软件和计算机性能的发展，器件设计的成本大幅度降低，不断有新材料、新结构的器件被提出，丰富着器件领域的专利储备。

在电路设计领域中，2015年申请量最多，为34项；其余的专利大

多处于2011年至今的年份区间内，2011年以前的专利申请总量约占该领域专利总量的10%。

在封装测试技术领域中，专利主要分布在2013年至今的时间区间内。从整体来看，封装测试领域一直处于稳步上升的发展趋势，随着器件尺寸缩小，芯片集成度的大大提升，与此同时，芯片可靠性问题也日益明显，发展封装测试技术是半导体产业发展的必然需求。

3.2.2 申请人分析

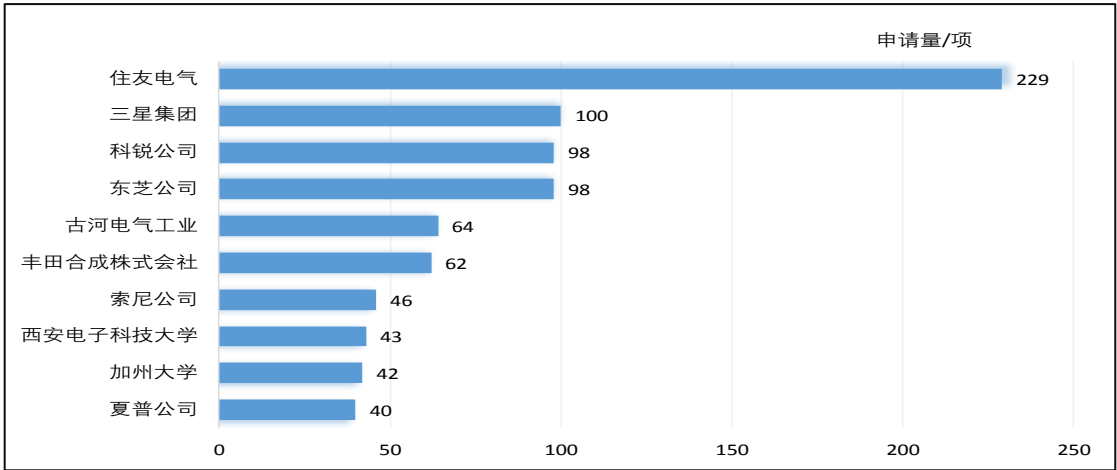


图3-4 GaN微波射频技术专利申请量排名前十的申请人

如图3-4所示为GaN微波射频技术专利申请量排名前十的申请人，可以看出，日本申请人占据前十申请人中的6位，其余4位分别是美国2位，韩国1位，中国1位。其中，日本申请人均为企业类型，美国申请人科锐公司为企业类型，加州大学为高校类型，韩国三星集团为企业类型，中国西安电子科技大学为高校类型。排名前10申请人在各技术分支的申请量如下表3-1所示。可见，在GaN微波射频技术领域，日本专利技术明显领先，且产业化应用较为成熟，中国整体较为薄弱，产业化应用有待完善。

表3-1 全球申请量排名前10的申请人在各技术领域的专利分布

专利技术	住友电气	三星集团	科锐公司	东芝公司	古河电气工业	丰田合成株式会社	索尼公司	西安电子科技大学	加州大学	夏普公司
HEMT	6	5	5	9	9		3	3	1	7
MESFET	1		8	4				1		1
MISFET				2	1			1		
MOSFET		1	3	1	2	3		1		1
SBD	41	12	26	11	25	3	1	12		4
场终端技术			4	8		2		9		2
功率放大器			3	3	1					
静电防护技术								3		
欧姆电极		5	2	1	2	10	3	6		3
散热技术		3	5	4				1	1	1
筛选技术与可靠性保证	29	2	1	7	2		1	1	1	2
射频发射电路			3							
外延生长	150	71	25	36	20	44	35	1	38	10
微波封装			8	9						
栅技术			5	2	2		3	3		3
合计	227	99	98	97	64	62	46	42	41	34

3.3 专利地图

编制GaN微波射频产业专利地图主要用于描述技术创新过程中各阶段的专利分布情况。如图3-5所示，主要是将筛选出的3343项专利，在GaN微波射频产业专利地图上，按照专利申请总量，技术类别，国别分布，核心专利等信息直观地在图上展示出来。

世界各国GaN微波射频产业相关技术的3343项专利中，主要集中在制备工艺、器件、封装测试技术三个主要技术领域，其中制备工艺1644项；器件844项；封装测试技术675项，总共占比达到约94%；在制备工艺中，外延生长专利到达了1351项，其中包含了GaN衬底、蓝宝石衬底、SiC衬底、Si衬底，GaN、AlGaN、InGaN等外延材料，InAlN势垒、AlN势垒技术，衬底减薄技术等；外延设备专利达到34项，其中MOVCD相关的23项，MBE相关的11项；场终端技术60项；欧姆接触技术117项，栅技术43项，异质集成24项；无源元件15项，其中GaN片上电阻3项，微带线12项。在器件技术中，MOSFET技术95项，MESFET技术52项，HEMT技术168项，MISFET技术57项，SBD技术472项。在封装测试技术中，散热技术201项，微波封装59项，筛选技术与可靠性保证176项，静电防护技术239项。在电路设计中，射频发射电路171项；射频接收电路7项，SPDT仅占2项，总共180项，仅仅占总数的约为6%。

从整个GaN微波射频产业来看，专利申请主要分布在韩国、法国、中国台湾、德国、英国、日本、中国、美国等八个国家或地区。日本的专利数1189项，中国的专利784项，美国的专利721项，韩国的专利

231项。在制备工艺领域中，日本的专利768项，美国的专利294项，中国的专利210项，韩国的专利170项。在器件领域中，日本的专利289项，美国的专利238项，中国的专利165项，韩国的专利41项。在电路设计领域中，中国的专利90项，美国的专利39项，日本的专利19项，以色列的专利9项。在封装测试领域中，中国的专利319项，美国的专利150项，日本的专利113项，韩国的专利18项。总体来看，GaN微波射频产业专利的竞争将是中、美、欧、日、韩之间的博弈。

3.4 结论

总体来看，GaN微波射频产业专利的竞争是中、美、欧、日、韩之间的博弈。欧美在GaN微波射频领域的学术研究和产品研发均起步较早，在专利布局上也相对要早。国内以西安电子科技大学、中国电子科技集团公司的研究所为代表，也较早意识到了SiC基GaN微波射频器件的重要性，在专利布局尤其是国内的专利布局方面奋起直追，取得了很大的成果。未来几年自主研发技术的突破方向包括Si基GaN的微波射频器件、金刚石基GaN的微波射频器件、手机等移动终端用GaN微波射频器件等。

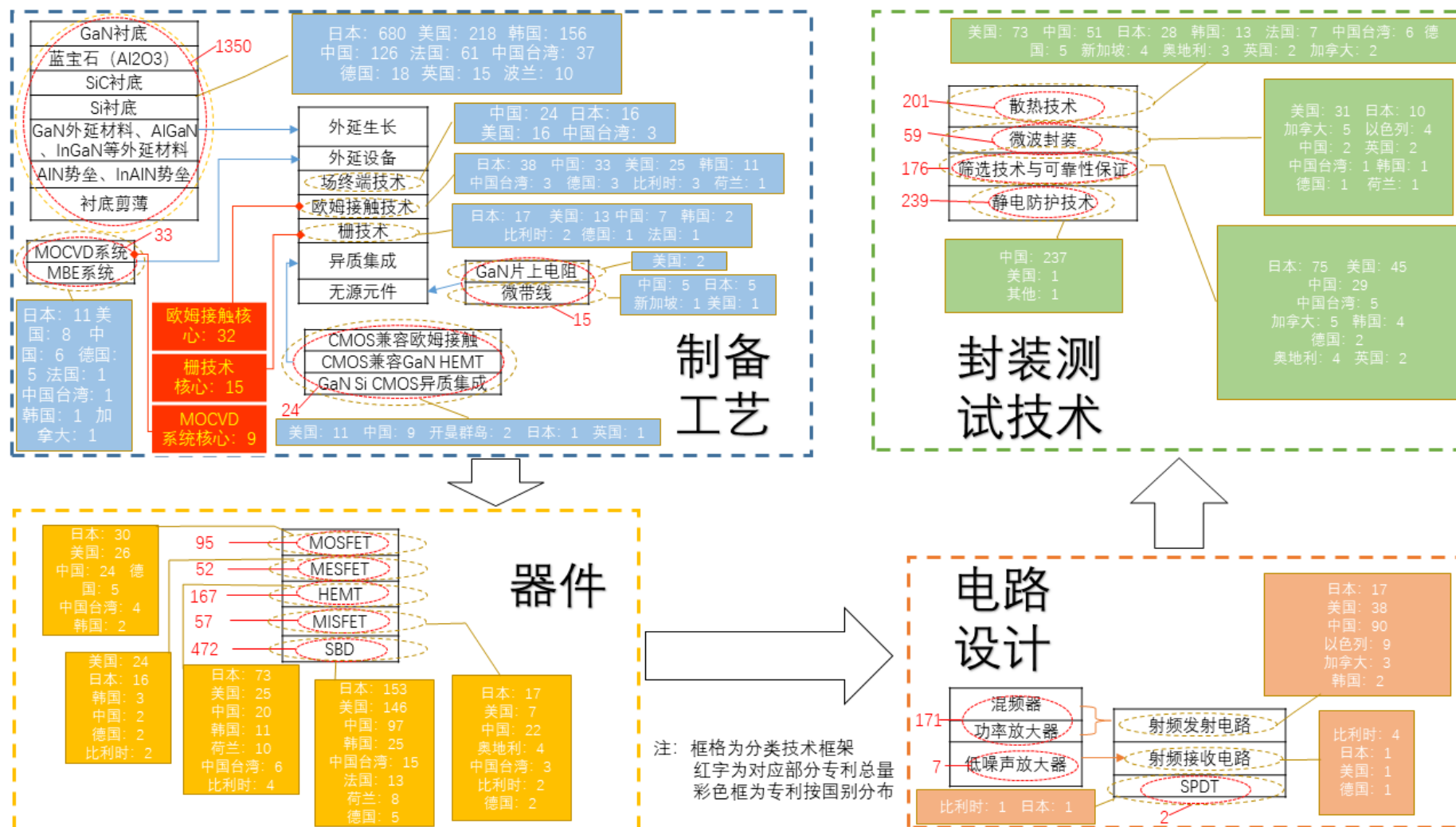


图3-5 GaN微波射频产业专利地图

4 产业技术路线图

4.1 市场发展路线图

目前在GaN射频器件的市场中，国防电子系统和无线通信基础设施占据绝大部分。据Yole数据，2019年在国防电子系统和无线通信基础设施领域应用的GaN射频器件占全部市场的90%以上。

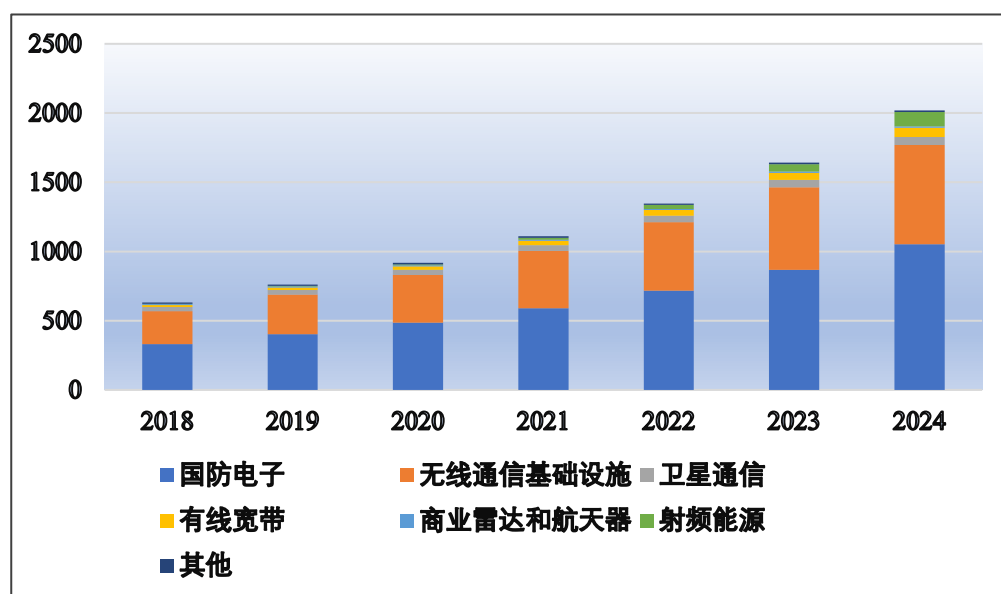


图4-1 2018-2024年GaN射频器件的市场容量增长和预测

数据来源:Yole Development

图4-1显示了未来5年内，GaN射频器件各类市场的容量的增长情况。未来5年内，这两个市场将分别以21%、20%的年复合增长率持续进行增长，在5年后仍将占全部市场容量的87.6%左右。

4.2 产品发展路线图

GaN 射频器件的主要产品是功率放大器，输出功率是其主要指标。图 4-2 显示了 GaN 射频功率放大器的产品的输出功率指标的发展现状和预期发展路线。射频功率放大器按照工作频段分类，大致有 UHF（100

MHz-1 GHz)、L 频段 (1-2 GHz)、S 频段 (2-4 GHz)、C 频段 (4-8 GHz)、X 频段 (8-12 GHz)、Ku 频段 (12-18 GHz)、K 频段 (18-26.5 GHz)、Ka 频段 (26.5-40 GHz)、Q 频段 (33-50 GHz)、U 频段 (40-60 GHz)、V 频段 (50-75 GHz)、E 频段 (60-90 GHz)、W 频段 (75-100 GHz)、F 频段 (90-140 GHz)、G 频段 (140-220 GHz) 和 R 频段 (220-325 GHz)。目前国际上在 UHF、L、S、C、X、Ku、K 频段的大功率 GaN 射频功率放大器,大部分用于雷达、电子战等和卫星通信,输出功率已达千瓦级别,未来几年仍然朝更大输出功率的方向发展。在 4G、5G 等移动通信基站领域所应用的射频功率放大器,在 sub-6 GHz 的应用场合,100W 级的功率放大器可以满足需求;在未来 26 GHz 和 39 GHz 的毫米波基站,10W 即可满足需求。

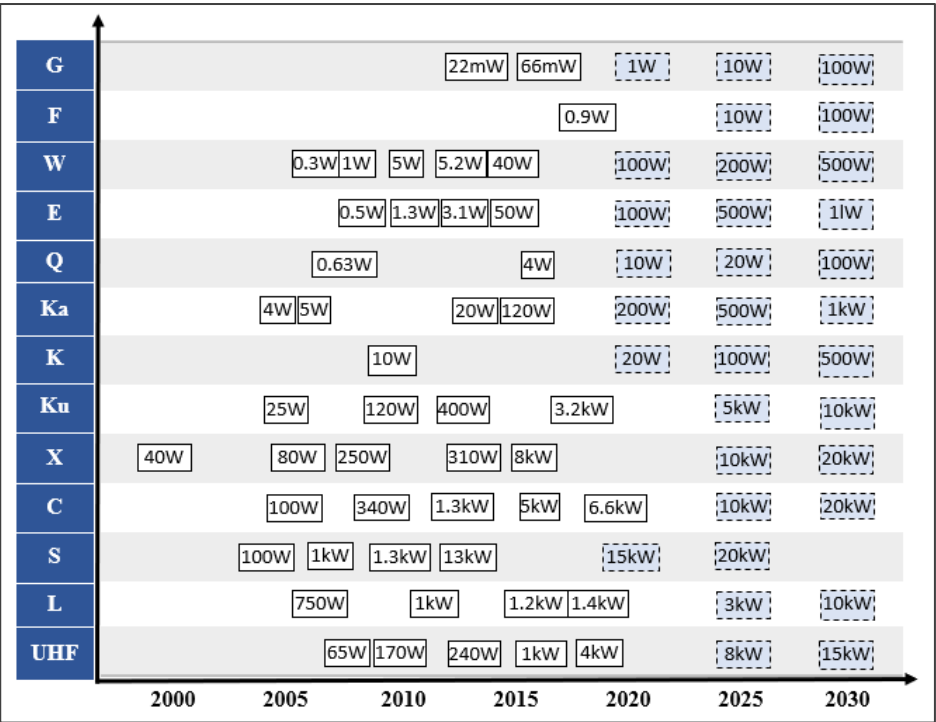


图4-2 GaN射频功率放大器的产品发展现状及路线图

目前由于 GaN 自支撑衬底技术不成熟、成本也比较高，GaN 材料

(包括同族的 AlGaN 材料) 主要外延生长于异质衬底之上。具体来讲, GaN 射频器件主要有三种衬底: SiC、Si 和金刚石。SiC 衬底的晶格常数与 GaN 相差比较小(晶格失配 3.5%)、热膨胀系数的差别比较小(GaN: $5.6 \times 10^{-6}/\text{K}$; SiC: $4.4 \times 10^{-6}/\text{K}$), SiC 衬底上的 GaN 外延材料的位错和缺陷密度小, 材料质量比较容易控制, 并且 SiC 衬底的热导率比较高(通常高于 $3.5 \text{ W}/\text{cm}\cdot\text{K}$), SiC 目前是 GaN 射频器件的主要衬底材料。Si 的晶格常数与 GaN 失配比较大(晶格失配达 17%)、热膨胀系数的差别也比较大(Si: $2.6 \times 10^{-6}/\text{K}$) GaN 外延材料的位错和缺陷密度比较高, 生长高质量的 GaN 外延材料技术门槛比较高。Si 的热导率低于 SiC (约 $1.5 \text{ W}/\text{cm}\cdot\text{K}$), 影响 Si 基 GaN 射频器件的散热性能。但是, Si 衬底有一个很大的优点, 即价格便宜, 尺寸也比较大, 并且可以使用现有成熟的 Si CMOS 生产线进行 GaN 射频器件的量产, 从而大幅降低 GaN 射频器件的成本。Si 基 GaN 的射频技术是未来几年高速发展的重点。金刚石材料的衬底成本比较高, 尺寸也比较小, 但是金刚石材料的热导率非常高, 有望应用于超大功率的 GaN 射频功率放大器, 因此金刚石基的 GaN 射频器件在未来几年内, 也将占据一定的市场份额。

图 4.3 总结了 SiC 基、Si 基和金刚石基 GaN 射频器件的现状和未来 10 年的增长趋势预测(数据参考了 Yole Development)。SiC 基射频器件的技术开发比较早。目前, 市场上的 GaN 射频器件, 主要是 SiC 基 GaN 技术。随着 Si 基 GaN 的大尺寸外延材料制备技术和制造工艺的逐渐成熟, Si 基 GaN 射频器件的成本进一步降低, 性价比进一步提高, Si 基 GaN 射频器件的市场份额将逐步增长。尤其是未来几年内, 5G 通信

网络在全球开始大规模部署。跟 4G 通信网络相比，5G 通信系统的基站数目大幅增加、对射频器件的需求大幅增加，因此对射频器件的成本控制要求很高。低成本、高性价比的 Si 基 GaN 技术在未来大规模 5G 通信网络的建设中将发挥大量作用。另外，面向移动终端领域的 Si 基 GaN 射频技术预计在 3 年后成熟，届时 Si 基 GaN 射频器件性能将超过目前使用的 GaAs 器件；并且得益于能够使用 Si 生产线以大规模量产 GaN 射频器件，Si 基 GaN 射频器件的成本将与 Si LDMOS 持平，优于 GaAs 的器件。

因此，预计 3-5 年后，由于大量的移动终端开始采用 Si 基 GaN 的射频技术，Si 基 GaN 射频器件的市场份额和销售量将大幅上升，并超过 SiC 基 GaN 的射频器件。金刚石基 GaN 射频器件目前还处于高校和研究院所中实验室里的技术开发阶段。金刚石基 GaN 的材料制备有几种可能的技术途径，未来产业界采用哪一条技术路线还未达成一致。但是在未来 3-5 年后，随着金刚石基 GaN 材料制备技术的成熟，随着金刚石基 GaN 的射频固态功率放大器将应用于部分超大功率的领域，比如雷达、电子战、卫星通信等。

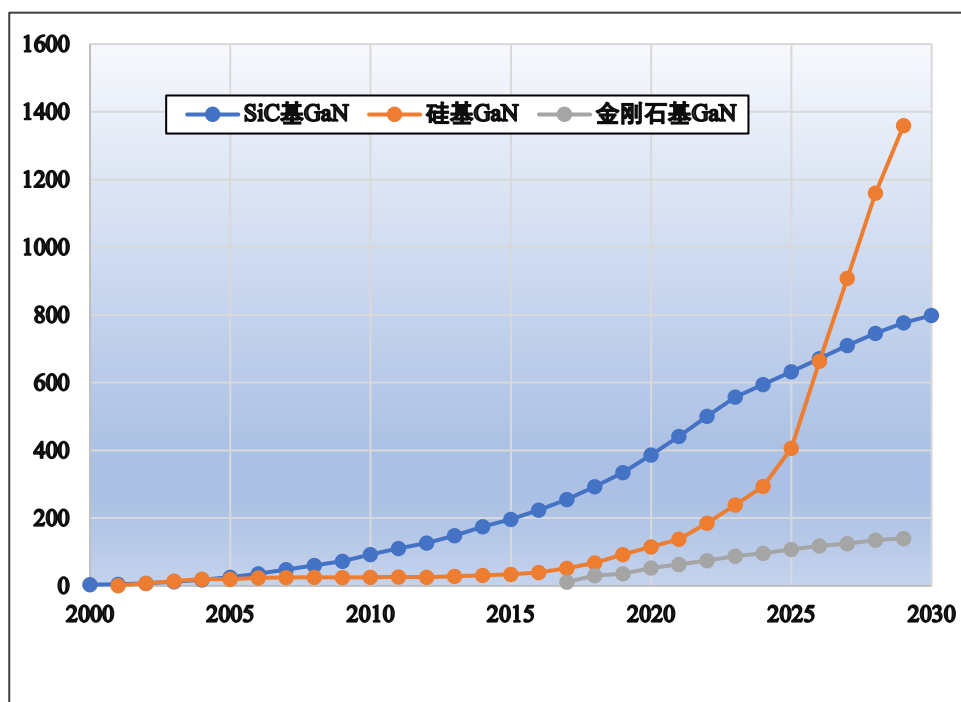


图 4-3 SiC 基、Si 基和金刚石基 GaN 射频器件的市场销售额及未来 10 年的增长预测 (M\$)

数据来源:Yole Development, CASA Research

4.3 技术发展路线图

目前 GaN 射频器件的产品主要有面向雷达、卫星通信等军用市场的产品和面向通信基站等民用市场的产品。如图 4-4 所示, 军用产品、微波炉等射频能源产品在未来几年内将急需持续发展; 面向通信基站领域的产品方面, 由于 4G 通信系统的成熟, 射频器件的重点逐渐转向 5G 通信系统。预计在未来 5 年内, 5G 通信系统所需的产品将大幅增加。在移动终端领域, Si 基 GaN 基射频器件的产品随着技术的发展和成本的进一步降低, 在大约 5 年后将开始大规模进入这一领域, 并逐渐占据主导地位。

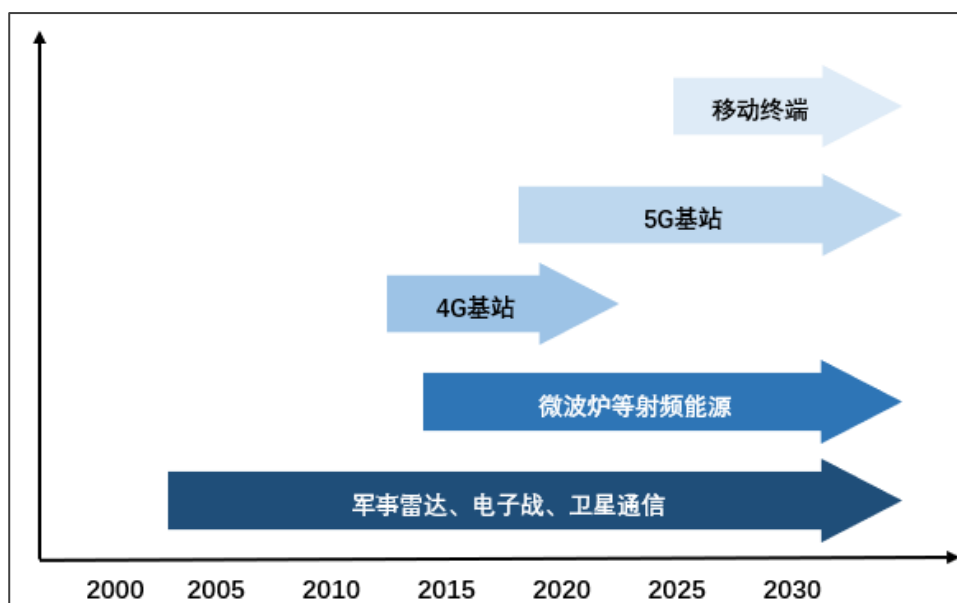


图 4-4 不同应用领域的 GaN 射频功率放大器的产品发展路线图

图 4-5 总结了 GaN 射频器件工艺平台技术发展路线。目前已经量产的 GaN 射频器件技术主要是 4 英寸 SiC 基 GaN，少部分为 4 英寸和 6 英寸的 Si 基 GaN。正在开发的技术包括 6 英寸 SiC 基、8 英寸 Si 基、2-4 英寸金刚石基的 GaN 射频器件和 GaN-Si CMOS 的异质集成芯片。预计在未来 3 年内，6 英寸的 SiC 基 GaN 和 8 英寸的 Si 基 GaN 技术将趋向成熟和实现量产。5 年后随着市场对 GaN 射频器件的低成本的要求越来越高，8 英寸的 SiC 基 GaN 技术、GaN 射频与 Si CMOS 数字电路的异质集成技术也将逐步走向成熟。金刚石基 GaN 的技术由于在超大功率器件方面的散热优势，未来 5-10 年内也将技术成熟并推出产品。

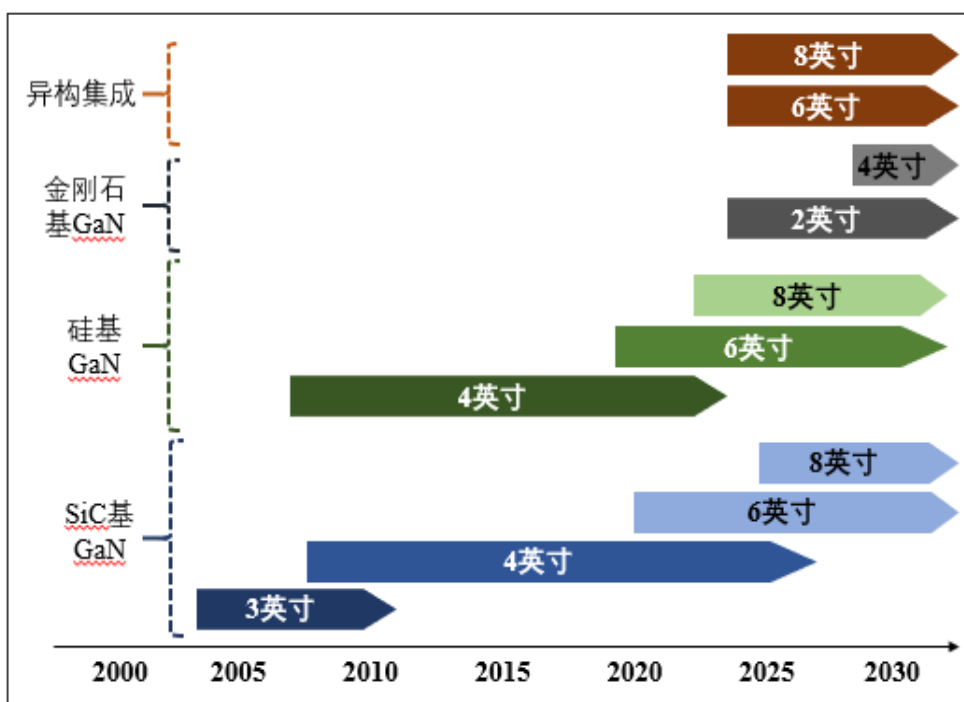


图 4-5 GaN 射频器件工艺平台技术发展路线图

GaN 技术路线呈现出多样化。在军事电子方面，以 4 英寸 SiC 基 GaN、以 2 英寸金刚石衬底的 GaN 晶圆为主来满足多功能化 T/R 组件方面应用，而我国的 5G 射频 GaN 技术的发展呈现出以下特点：

1、我国 5G 通信产业正得到各级政府的重点扶持和移动通信商的应用牵引，2020 年将是民用 GaN 射频器件快速发展的关键元年。

2、2020-2024 年 5G 宏基站 GaN 产品以大功率 SiC 基 GaN 器件与模块为主。随着低成本大尺寸 Si 基 GaN 晶圆工艺逐渐成熟，低功率 Si 基 GaN 及其多功能化 MMICs（单片、3D 异构）在小功率 5G 微基站应用中将成为重要的功放半导体产品系列。面向 5G 移动终端应用的低压 GaN 功放将是潜在的新产品方向。

4.4 GaN 射频技术路线图总图

		2020-2022	2023-2025	2026-2030
市场 需求	军用	雷达、电子战、卫星通信	雷达、电子战、卫星通信	雷达、电子战、卫星通信
	通信	通信基站	通信基站、移动终端	通信基站、移动终端
	射频能量	微波炉	微波炉、工业加热、汽车点火、医疗等	微波炉、工业加热、汽车点火、医疗等
工艺 平台	SiC 基	4 吋	4 吋、6 吋，开发 8 吋技术	4 吋、6 吋，开发 8 吋技术
	Si 基	6 吋、8 吋	6 吋，开发 8 吋技术	6 吋、8 吋，开发 12 吋技术
	金刚石基	小于 2 吋	2 吋，开发 4 吋技术	4 吋，开发 6 吋技术
	异构集成	技术开发	6 吋，开发 8 吋技术	6 吋、8 吋，开发 12 吋技术
微波 射频 关键 技术	军用 SiC 基	Ku 及以下频段：3.2-15kW；Ka-W 频段：10-200W；F、G 频段：1W；R 频段：100mW	Ku 及以下频段：5-20kW；Ka-W 频段：20-500W；F、G 频段：10W；R 频段：1W	Ku 及以下频段：10-20kW；Ka-W 频段：100W-1kW；F、G 频段：100W；R 频段：10W
	通信 SiC 基	26G、39GHz 功率达到 10 W，技术成熟并量产，E、W 频段研发	面向车载雷达和物联网应用，开发 E、W 频段功率放大器并量产，开发 F、G 频段技术	F、G 频段 SiC 基 GaN 功率放大器量产，开发面向 6G 的 R 频段 SiC 基 GaN 功率放大器
	通信 Si 基	sub-6 GHz、26 GHz 和 39 GHz 频段量产，在车载雷达和物联网应用，E、W 频段研发，8 英寸 Si 基 GaN 的射频技术开始量产	面向车载雷达和物联网等 5G 通信系统应用，开发 E、W 频段功率放大器并量产，开发 F、G 频段技术	F、G 频段 Si 基 GaN 功率放大器量产，开发面向 6G 的 R 频段 Si 基 GaN 功率放大器
	金刚石基	2 英寸金刚石基 GaN 的固态功率放大器 (SSPA)，进行研发	2 英寸金刚石基 GaN SSPA 量产；研发 4 英寸金刚石技术	4 英寸金刚石基 GaN SSPA 量产；研发更高输出功率的金刚石基 GaN 射频器件并量产
	异构集成	开发 GaN 射频器件与 Si CMOS 数字的异质集成技术	8 英寸 GaN 射频器件与 Si CMOS 数字的异质集成技术，进行量产。	面向移动通信终端，开发 Si 基 GaN 射频组件、GaN-Si CMOS 异质集成的 SOC 并量产

图 4-6 为 GaN 射频技术路线的发展总图

如图所示，从 2020 年开始到未来 10 年内，GaN 射频技术的发展大致可以分为三个阶段：

4.4.1 第一阶段（2022 年）

2020 年起到 2022 年，主要的发展目标包括：

1、面向雷达、电子战、卫星通信、航空航天通信、太空探测等应用领域的 SiC 基 GaN 大功率固态功率放大器，其工作频率逐步向 W 波段，甚至更高的频率发展，产品的输出功率将达到百瓦级，甚至达到千瓦级。

2、面向 26 GHz 和 39 GHz 毫米波频段的 5G 通信应用的 SiC 基 GaN 射频功率放大器，输出功率达到 10 W，技术达到成熟和量产，面向车载雷达、物联网等 5G 通信系统应用和后 5G 通信系统应用的 E、W 频段的 SiC 基 GaN 功率放大器，进行研发；

3、面向 sub-6 GHz、26 GHz 和 39 GHz 频段的 5G 通信应用的 Si 基 GaN 的射频功率放大器，技术成熟和进行量产；面向车载雷达、物联网等 5G 通信系统应用和后 5G 通信系统应用的 E、W 频段的 Si 基 GaN 的功率放大器，进行研发；8 英寸 Si 基 GaN 的射频技术开始量产；

4、面向国防电子系统应用领域的 2 英寸金刚石基 GaN 的固态功率放大器（SSPA），进行研发；

5、GaN 射频器件与 Si CMOS 数字的异质集成技术，进行研发。

4.4.2 第二阶段（2025 年）

从 2023 年到 2025 年，主要的发展目标包括：

1、面向雷达、电子战、卫星通信、航空航天通信、太空探测等应用领域的 SiC 基 GaN 大功率固态功率放大器，其工作频率将达到 THz 频

段，产品输出功率达到千瓦级；

2、面向车载雷达、物联网等 5G 通信系统应用和后 5G 通信系统应用的 E、W 频段的 SiC 基 GaN 功率放大器，进行量产；面向后 5G 通信系统应用的 F、G 频段的 SiC 基 GaN 的功率放大器，进行研发；

3、Si 基 GaN 射频器件：面向车载雷达、物联网等 5G 通信系统应用和后 5G 通信系统应用的 E、W 频段的 Si 基 GaN 的功率放大器，进行量产；面向后 5G 通信系统应用的 F、G 频段的 Si 基 GaN 的功率放大器，进行研发；

4、金刚石 GaN 射频器件：面向国防电子系统应用领域的 2 英寸金刚石基 GaN 的固态功率放大器（SSPA），进行量产；4 英寸金刚石的技术，进行研发；

5、8 英寸 GaN 射频器件与 Si CMOS 数字的异质集成技术，进行量产。

4.4.3 第三阶段（2030 年）

从 2026 年到 2030 年，主要的发展目标包括：

1、面向雷达、电子战、卫星通信、航空航天通信、太空探测等应用领域的 SiC 基 GaN 的大功率固态功率放大器工作频率将突破 1THz，输出功率达到几千瓦，甚至达到万瓦级；

2、SiC 基 GaN 射频技术：面向后 5G 通信系统应用的 F、G 频段的 SiC 基 GaN 功率放大器，进行量产；面向 6G 通信系统应用的 R 频段和 SiC 基 GaN 功率放大器，进行研发；

3、Si 基 GaN 射频技术：面向后 5G 通信系统应用的 F、G 频段的

Si 基 GaN 功率放大器，进行量产；面向 6G 通信系统应用的 R 频段和 Si 基 GaN 的功率放大器，进行研发；

4、金刚石基 GaN 射频技术：面向国防电子系统应用领域的 4 英寸金刚石基 GaN 固态功率放大器（SSPA），进行量产；金刚石基 GaN 射频器件面向更高输出功率，进行研发和量产；

5、Si 基 GaN 射频技术：面向移动通信终端，包括手机、平板电脑等应用领域的 Si 基 GaN 射频组件、GaN-Si CMOS 异质集成的 SOC（片上系统），进行大规模量产。

4.5 发展建议

2020 年是 5G 发展的关键年。2020 年 3 月，工信部发布了《关于推动 5G 加快发展的通知》，全力推进 5G 网络建设、应用推广、技术发展和安全保障，充分发挥 5G 新型基础设施的规模效应和带动作用，支撑经济高质量发展。我国在 5G 应用端已走在国际前列，但芯片等核心电子材料掌握在美日欧等发达国家手里，部分材料的核心技术和供应链仍然受制于人，技术和产业正处于补短板的攻坚阶段。中兴事件、华为事件敲响了自主可控的警钟，目前基站功率器件、终端射频前端等领域核心材料、芯片需求明确，为我国 GaN 射频核心材料和器件国产化提供了难得的机遇。由于半导体材料行业具有技术门槛高、成本占比低的特性，当前，我国 GaN 射频材料及器件产业主要有五个问题：（1）我国产业基础薄弱，核心材料和器件国产化率低，加工技术和工艺水平与国际领先厂商差距较大。（2）由于起步较晚，我国缺乏熟悉硬件、软件、工艺加工等多领域的复合型骨干人才。（3）

半导体材料门槛较高、验证周期长，导致国内产品难以打入代工企业供应链。（4）产业链上下游联动不足，材料与制造企业的协同研发较差，产业化能力不足。（5）国内材料企业普遍分散、规模体量小、技术产品单一，难以形成规模效应、研发投入不足，无法与国际巨头相抗衡。

GaN 射频微波器件与集成电路经过多年发展，形成了区别于其他半导体技术的三个重要特点：

（1）材料-器件-制造-设计高度耦合，难解难分，材料结构的微小变化也会引起器件和电路性能的显著变化，因此 IDM 模式和 Foundry 模式不可偏废；

（2）各国均形成了各自独立的技术路线，难以直接借鉴或依靠，我国 GaN 射频微波器件已经走出了自身特色的技术路线，因此未来之路需要我们自己去摸索；

（3）产品-技术-理论仍遵循线性支撑模型，理论突破会带来技术跨越，技术跨越会带来产品的飞跃，因此政产学研用各方共同支持 GaN 微波射频器件研发体系的构建是面向未来的必由之路。

因此，为加速我国 GaN 射频材料和器件国产化进程，短期解决进口替代，长期通过应用端拉动建立全产业链发展优势，建立长效的上中下游、产学研用紧密结合的技术开发体系，提出如下建议：

1、GaN 微波射频器件已经迈上了摩尔定律之路，第一代 AlGaIn/GaN HEMT 射频器件研发我国处于了有利位置，但是第二代以及第 N 代 GaN 射频器件技术如何定义、如何推动需要业内专家尽快形成共识，共同推

动。针对下一代甚至下下一代 GaN 射频微波器件的研发，亟待超前部署，加大基础研究和应用基础研发的投入，完善我国完全自主的氮化物半导体微波毫米波器件与集成电路基础研究和应用基础研究支撑体系，以便使我国在该领域能够保持当前的有利地位并早日实现超越引领。

2、围绕产业链核心环节形成自主保障能力，进一步完善我国 GaN 微波射频器件产业创新生态体系。形成高校的学术研究与科研院所、企业的工程化并举的互信度高、转化效率高的发展模式，学术研究以体现原创性、前沿性为目标，重点以原创性的射频新器件机理与原型为探索方向。科研院所、企业面向雷达与 5G 通信的应用需求，结合现有的模拟类 IDM 平台，以非尺寸依赖的特色工艺为核心，开展可实用化的射频功率晶体管与 GaN MMICs 芯片研制与生产。在借鉴国外同期射频 GaN 器件技术路线之际，尽快掌握并突破更高性能 GaN 射频器件的新机理线性化整套技术，探索手机终端应用的高效率 GaN 射频器件及低噪声放大器，突破 GaN 芯片与其他技术结合的 3D 异构集成工艺，培育大尺寸兼容 CMOS 工艺的 Si 基 GaN 射频器件方向与多功能 GaN 芯片新业务，争取尽快形成更为丰富的产品链，并掌握差异化的两用高端射频 GaN 器件技术体系。

3、需求牵引，协同创新推动本土闭环产业链形成。围绕半绝缘衬底、GaN 外延材料、芯片、封装及系统应用，梳理各环节关键基础材料、工艺辅料和耗材、配套材料，通过典型应用示范，补齐产业链空白和短板，拉动全产业链协同发展，形成本土产业链闭环，降低对外依存度。依托第三方专业机构，利用市场化手段组织产业链企业，建立上中下游互融

共生、分工合作、利益共享的一体化组织新模式，推进产业链协作。通过 5G 新基建建设，引导以龙头企业为核心，培育和发展协同设计、协同制造、供应链协同的合作网络和新型制造模式。确保在技术研发、成果转化、示范推广、标准检测认证等市场培育的过程中，形成持续、配套的政策合力。

4、加强以产品为目标的基础材料、设计、工艺、装备、封测、标准等国家体系化能力建设。通过政府有效引导，充分带动地方和社会资本，共同建设跨建制的平台，解决产业化共性关键技术问题，同时为企业提供工程化验证服务、检测认证服务等，建立起支撑工程化、产业化技术持续创新的条件和能力。加强技术标准研制与应用对接，构建有序开放的技术标准与检测认证服务体系。采取“错位竞争、补充短板”的知识产权战略，完善关键技术薄弱环节布局，关注产品应用类高价值专利，提升专利布局质量。建立知识产权运营和协同运用机制，鼓励上中下游企业共享知识产权收益。

5、建立第三代公立的测试评价和应用示范平台。建立面向 5G 通信基站及终端的 GaN 微波射频材料和器件国家级测试验证和生产应用示范平台，降低中小企业创新应用门槛，高效整合研发设计、生产制造等资源，推动企业模式创新。完善材料、器件测试评价方法和标准，推动研制国产化测试设备，提高测试评价仪器、装备和设施的能力，开展第三代半导体材料测试、质量评估、模拟验证、数据分析、应用评价和认证计量等服务，探索形成具有第三代半导体行业特色“技术咨询+团体标准+工艺设计+样品开发+测试评价+认证（商标授权）”的测试评价体系。



共创、共建、共享、共赢

第三代半导体产业技术创新战略联盟
CHINA ADVANCED SEMICONDUCTOR INDUSTRY INNOVATION ALLIANCE

地点：北京海淀区清华东路甲35号中科院半导体所5号楼5层（100083）

No.A35, QingHua East Road, Haidian District, Beijing P R China(10008)

Tel：86-010-82388680

E-mail：casa@casa-china.cn

www.casa-china.cn