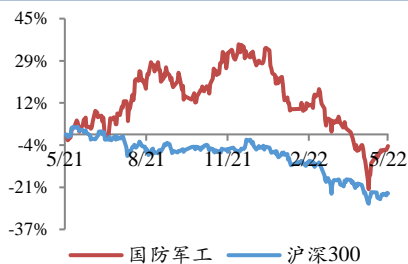


第三代半导体，能源转换链“绿芯”材料

行业评级：增持

报告日期：2022-05-18

行业指数与沪深300走势比较



分析师：郑小霞

执业证书号：S0010520080007

电话：13391921291

邮箱：zhengxx@hazq.com

联系人：邓承佺

执业证书号：S0010121030022

电话：18610696630

邮箱：dengcy@hazq.com

相关报告

主要观点：

● 第三代半导体可有效降低能源损耗

第三代半导体主要是指氮化镓和碳化硅、氧化锌、氧化铝、金刚石等宽禁带半导体，它们通常都具有高击穿电场、高热导率、高迁移率、高饱和电子速度、高电子密度、可承受大功率等特点。

宽禁带半导体契合了电力电子、光电子和微波射频等领域的节能需求。在电力电子领域，碳化硅功率器件相比硅器件可降低50%以上的能源损耗，减少75%以上的设备装置，有效提升能源转换率。在光电子领域，氮化镓具有光电转换效率高、散热能力好的优势，适合制造低能耗、大功率的照明器件。在射频领域，氮化镓射频器件具有效率高、功率密度高、带宽大的优势，带来高效、节能、更小体积的设备。

● 新能源及通讯市场将为第三代半导体创造百亿市场规模

和Si、GaAs等第一、二代半导体材料相比，碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)拥有击穿电压高、禁带宽、导热率高、电子饱和速率高、载流子迁移率高等优点，是制作高频、高温、抗辐射器件的优异材料。SBD器件领域，碳化硅基SBD器件相较硅基SBD器件具有耐高压、高温不易失控及损耗小等特点；MOSFET器件领域，碳化硅基MOSFET器件相较硅基IGBT器件具有损耗小、导通电阻低及耐高压等特点。

碳化硅衬底可以制作成半绝缘型衬底及导电型衬底，分别外延碳化硅及氮化镓制作成功率器件或微波射频器件。功率电器领域，碳化硅器件可大幅降低能耗及可耐高压高频，被广泛应用于电动汽车/充电桩、光伏新能源、轨道交通及智能电网领域，2025年市场规模将超100亿；射频器件领域，碳化硅的高导热性能能够满足5G通讯对高频性能和高功率处理能力的要求，2025年市场规模将超100亿。

● 成本端依然是考量第三代半导体大规模应用的关键因素

受制于碳化硅长晶速度、加工难度及缺陷密度，碳化硅的成本一直居高不下成为其扩大应用的难题。

根据CASA的调研数据，2020年SiC电力电子器件价格同比进一步下降，但部分器件实际成交价与等同规格的Si器件价差已经缩小至2-2.5倍之间。目前市场上降低成本的主要方式有扩大晶圆尺寸、改进碳化硅长晶工艺及改进切片工艺等，未来其价差有望进一步缩小。

● 衬底及外延端价值高，国内外差距小，或可实现弯道超车

根据CASA Research数据，第三代半导体产业链中，衬底成本占器件

总成本的 47%，外延成本占器件总成本的 23%，二者合计约 70%，为碳化硅器件成型流程最具投资价值的环节。相较之下，12 寸硅片的衬底与外延价值总计约占 11%，因而碳化硅领域衬底及外延更具投资价值。

竞争格局方面，从海内外公司业务布局、专利布局、盈利能力、技术实力及发展环境等角度来看，国内公司仅起步时间稍微落后，差距极小。考虑到行业整体处于产业化初期，受益于国内 5G 通讯、新能源等新兴产业的技术水平、产业化规模的世界领先地位，国内碳化硅器件巨大的应用市场空间将持续驱动上游半导体行业快速发展，国内碳化硅厂商有望成长为具有国际竞争力的企业。

● 投资建议

基于国防军工及新能源行业的高景气度，考虑到碳中和催动能源转型降低能耗，我们预计碳化硅行业将迎来快速发展期。建议关注中瓷电子、凤凰光学、亚光科技、海特高新、赛微电子、天岳先进、斯达半导、露笑科技、扬杰科技、三安光电等。

● 风险提示

SIC 成本降低不达预期；SIC 器件稳定性可靠性指标不及预期；国内 SIC 产业链跟国外差距进一步拉大的风险；宏观经济导致行业景气下降的风险。

正文目录

1 新材料:高新技术基础及先导.....	7
2 第三代半导体:能源转换链中的革命	11
2.1 碳化硅是功率器件的优质衬底材料	12
2.2 新能源及通讯将支撑市场稳步发展.....	21
2.3 价格及可靠性仍是扩大应用的难点	31
2.4 衬底及外延成未来弯道超车的关键.....	45
3 投资建议	55
风险提示:	55

图表目录

图表 1 新材料推动社会进步.....	7
图表 2 工艺及设备是新材料的“源”和“流”.....	8
图表 3 新材料技术和生物技术、软件等商业化时间及成本对比.....	8
图表 4 技术成熟度及切中行业痛点是新材料应用关键.....	9
图表 5 1997-2010 年半导体芯片的晶体管密度变化.....	9
图表 6 新材料技术翻“新”或下沉市场速度主宰企业的未来.....	10
图表 7 海外及中国碳化硅产业链全景.....	11
图表 8 半导体产业链结构.....	12
图表 9 功率半导体产品范围示意图.....	13
图表 10 各代半导体材料的主要用途.....	14
图表 11 功率半导体材料重要物理性能的比较.....	14
图表 12 碳化硅与其他半导体材料本征性质的比较.....	15
图表 13 碳化硅器件可在高压下使用.....	15
图表 14 SiC 器件、GAN 器件及 Si 器件适用的频段.....	16
图表 15 碳化硅器件耐受温度高.....	16
图表 16 碳化硅 (SiC) 器件可降低碳化硅 (SiC) 器件可降低导通损耗.....	17
图表 17 采用碳化硅 (SiC) 器件可将电力驱动系统体积减小 3~5 倍.....	17
图表 18 Si 和 SiC 的耐压等级 (二极管).....	18
图表 19 SiC 肖特基二极管与快速硅二极管的 TRR 温度特性.....	18
图表 20 SiC 肖特基二极管与快速硅二极管的反向恢复特性.....	19
图表 21 晶体管开通损耗和关断损耗.....	19
图表 22 硅材料与碳化硅材料的器件损耗对比.....	20
图表 23 25°C 下各器件的正向导通特性.....	20
图表 24 150°C 下各器件的正向导通特性.....	20
图表 25 Si 和 SiC 的耐压等级电压范围.....	21
图表 26 碳化硅衬底、外延及器件产业链示意图.....	22
图表 27 2020 年我国 SiC 电力电子器件应用市场结构.....	22
图表 28 基于碳化硅 (SiC) 的驱动系统可搭载更轻、更小的电池且续航里程更长.....	23
图表 29 全碳化硅模块具备更高电流输出能力, 支持逆变器达到更高功率.....	24
图表 30 英飞凌碳化硅产品在汽车中的应用.....	24
图表 31 罗姆碳化硅产品在汽车中的应用.....	25
图表 32 新能源汽车市场 SiC 晶圆需求预测 (万片).....	25
图表 33 西门子推出首款采用碳化硅晶体管的 155/165KW 组串型光伏逆变器.....	26
图表 34 中车株洲所自主研发的搭载全碳化硅牵引逆变器的列车.....	26
图表 35 引入 SiC 器件以提高太阳能升压电路的转换效率.....	27
图表 36 光伏逆变器中碳化硅功率器件占比预测.....	28
图表 37 光伏逆变器中碳化硅功率器件占比预测.....	28
图表 38 使用氮化镓可以满足 5G 应用需求.....	28
图表 39 GAN 为 5G 提供单片前端解决方案.....	29
图表 40 GAN 射频功率晶体管可作为新的固态能量微波源替代传统的 2.45GHz 磁控管.....	29
图表 41 不同类型射频器件在高频高功率下应用对比.....	30

图表 42 不同类型射频器件市场份额预测.....	30
图表 43 全球碳化硅衬底氮化镓射频器件 2025 年市场规模将达 20 亿美金.....	30
图表 44 我国 5G 宏基站 4 英寸 GAN 晶圆需求量 (万片)	31
图表 45 碳化硅晶片制造流程.....	32
图表 46 碳化硅晶体生长主流工艺比较.....	32
图表 47 碳化硅外延生长机理示意图.....	33
图表 48GAN/SiC 及 GAN/AlN/SiC 外延生长模式示意图.....	33
图表 49SiC 器件不同电压对于 SiC 外延层厚度和掺杂浓度的要求.....	33
图表 50SiC 外延生长基本工艺曲线.....	34
图表 51 外延层三种方式优缺点对比.....	35
图表 52 不同切割工艺的性能对比.....	35
图表 53 超声振动辅助磨削.....	36
图表 54 在线电解修整辅助磨削.....	36
图表 55SiC 精抛工艺对比.....	37
图表 56 碳化硅单晶抛光片加工标准.....	38
图表 57 SiC 单晶中微管闭合及短微管形成的图片和示意图.....	38
图表 58 4H-SiC 单晶外延过程中常见的几种缺陷.....	39
图表 59 2 英寸、3 英寸、4 英寸和 6 英寸微管密度逐年降低.....	39
图表 60 碳化硅晶锭重复 A 面工艺示意图.....	40
图表 61 碳化硅晶锭总位错密度与 A 面生长阶段数间的关系.....	40
图表 622017-2020 年 650V 的 SiC SBD 价格 (元/A)	41
图表 632017-2020 年 1200V 的 SiC SBD 价格 (元/A)	41
图表 64 SiC MOSFET 2020 年平均价格 (元/A)	41
图表 65WOLFSPEED 晶圆尺寸增加芯片数量从而降低成本.....	42
图表 66 住友 MPZ (多参数和区域控制) 溶液生长技术.....	43
图表 67 住友 6 英寸 EPIERA 所构成的器件.....	43
图表 68COOL SPLIT 技术切割晶圆的步骤.....	44
图表 69COOL SPLIT 技术切割出的晶圆.....	44
图表 702020 年碳化硅功率半器件价值拆分.....	45
图表 712020 年 12 寸硅功率器件价值拆分.....	45
图表 72 海外企业碳化硅领域布局时间线.....	46
图表 73 国内企业碳化硅领域布局时间线.....	46
图表 74 排名前十的第三代半导体器件相关专利来源地申请数量、授权数量与授权比.....	47
图表 75 排名前十的第三代半导体器件相关专利受理地申请数量、授权数量与授权比.....	47
图表 76 中国第三代半导体器件专利申请排名前十机构.....	48
图表 77 山东天岳、天科合达与海外可比公司经营情况对比.....	48
图表 78 近两年科锐公司、贰陆公司与山东天岳在半绝缘型碳化硅衬底领域按金额统计的市场份额情况.....	49
图表 79 全球半绝缘型碳化硅衬底领域市场份额情况.....	49
图表 80 国内外公司碳化硅相关专利数量 (2020 年底)	49
图表 81 国内外碳化硅公司 2020 年研发投入情况.....	49
图表 824 英寸半绝缘型碳化硅衬底技术参数对比.....	50
图表 836 英寸半绝缘型碳化硅衬底技术参数对比.....	50
图表 844 英寸半导电型碳化硅衬底技术参数对比.....	50
图表 85 行业内各公司不同尺寸 SiC 晶片的推出对比.....	51

图表 86 国内外部分企业 8 英寸衬底研发及量产时间表.....	51
图表 87 国内碳化硅衬底尺寸演进.....	51
图表 88 海内外碳化硅衬底及外延企业产品布局时间线.....	52
图表 89 国内部分厂商产能情况.....	53
图表 90 近五年我国颁发的行业部分法律法规政策.....	54

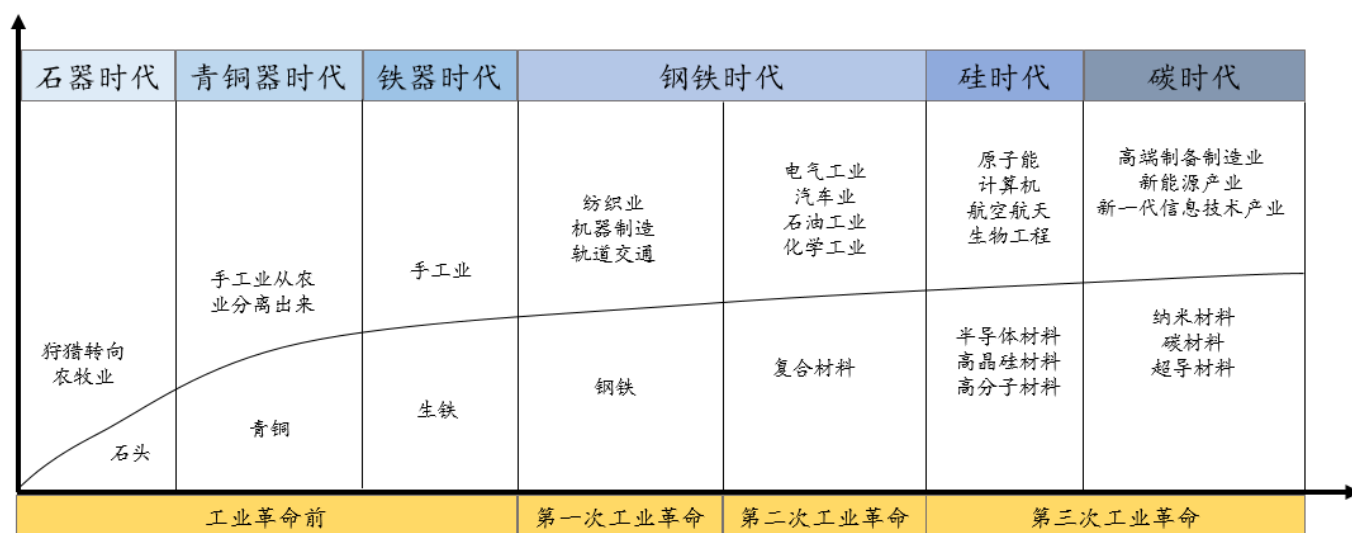
1 新材料: 高新技术基础及先导

当前, 我国新材料产业发展面临着重大战略机遇, 以新一代信息技术、航空航天、物联网、新能源汽车和轨道交通等代表的战略性新兴产业快速发展对材料产业提出了更高要求, 新材料研发的迫切性前所未有。《中国制造 2025》、《新材料产业发展指南》、《重点新材料首批次应用示范指导目录(2019 年版)》等政策文件相继出台, 为我国新材料产业发展指引方向。

我们认为, 相较于自然资源及终端应用材料, 位于产业链中游的材料以其能深远影响下游产业发展及决定自然资源使用方式, 是最具投资价值的赛道。

新材料是传统产业升级和战略性新兴产业发展的基石。新材料是指新出现的具有优异性能和特殊功能的材料, 及传统材料改进后性能明显提高或产生新功能的材料。新材料技术高度密集, 不仅对电子信息、生物技术、航空航天等高新技术产业的发展起着支撑和先导的作用, 也推动着机械、能源、化工、轻纺等传统产业的技术改造和产品结构的调整。因而新材料的创新能力, 将在相当程度上决定未来中国制造业的整体水平, 决定中国在产业价值链上的高度。

图表 1 新材料推动社会进步



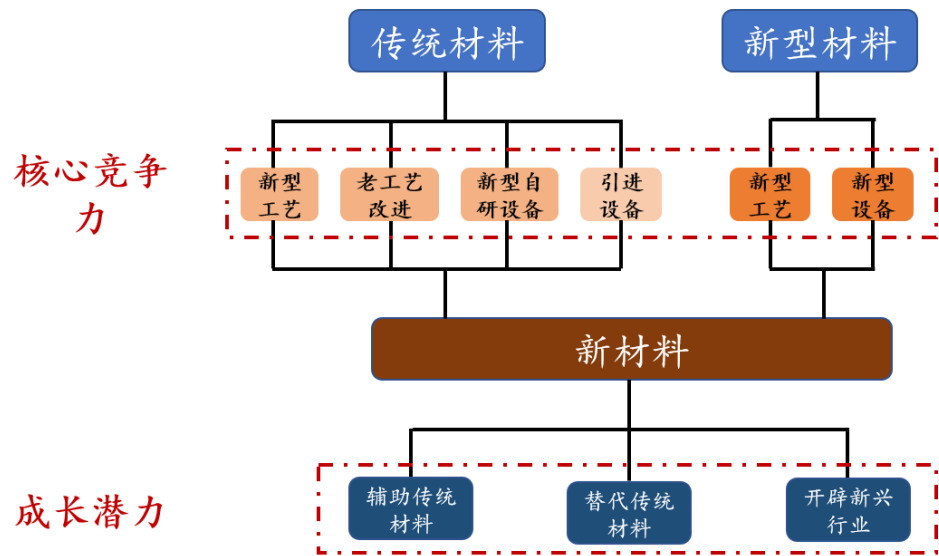
资料来源: 东滩智库, 华安证券研究所

新材料公司的内在价值, 我们认为取决于核心竞争力、市场拓展、未来发展潜力及估值等四大因素。

- 新材料自身并非宝藏, 生产流程中的工艺或设备才是新材料公司的核心竞争力。

新材料的“新”是指相较传统材料某些性能有明显提升或出现了某些新功能, 其是决定能否取代传统材料甚至替代传统材料, 抑或是开辟新兴行业的首要因素。从新材料的出现途径来看, 新材料大致可分为两大类: 一类是由传统材料经过新工艺或新设备改性而来, 一类则是完全自主研发的新型材料。考虑到新材料的上游均为基础的原料, 因而生产流程中的工艺或者设备的优劣是决定其性能或功能的关键所在。

图表 2 工艺及设备是新材料的“源”和“流”



资料来源：华安证券研究所整理

- 技术成熟程度定义坡点，切中行业痛点铺就长坡。一直以来，对于新材料企业的投资价值的思考，主要在于新材料的技术成熟度及下游应用市场的开拓：

技术成熟度方面，Maine 于 2016 年在《nature materials》上发表论文指出，新材料技术研发周期较长，实现商业化的时间平均 10 年以上，与生物科技相近，远多于软件技术，因而新材料技术的成熟度很大程度上决定着新材料企业的投资价值。工信部在 2019 年发布的《GB/T37264-2018 新材料技术成熟度等级划分及定义》中将新材料的技术成熟度划分为实验室、工程化和产业化三个阶段九个等级。其中产业化阶段表明企业生产工艺成熟，可批量生产并能实现全部功能完全满足预期使用目标的实物，预示着新材料技术真正可以直面市场的考验。

图表 3 新材料技术和生物技术、软件等商业化时间及成本对比

	Development time (years)	Research and development costs* (US\$ millions)	Commercialization costs† (US\$ millions)	Technology uncertainty	Market uncertainty
Software	0-2	0-3	1-10	Low	Medium
Biotechnology	10-15	5-10	300-900	Very high	Medium
Advanced materials	5-15	2-20	50-500	High	High

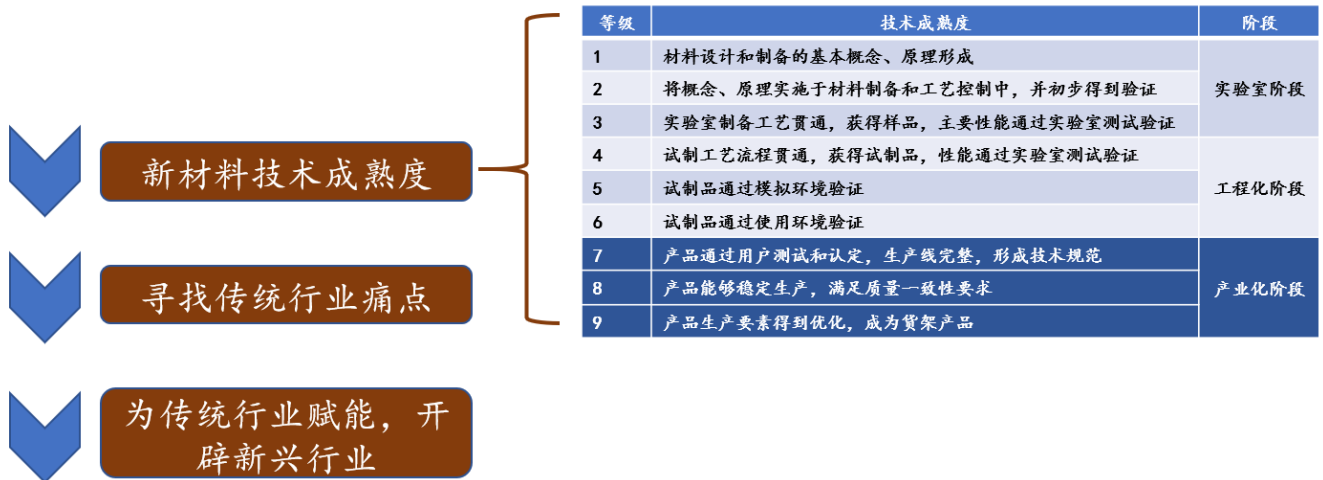
The reported development times and research and development (R&D) costs are based on interviews and our experience, as well as on published case studies involving advanced materials^{2,5,10,34,38}, biotechnology³⁹⁻⁴² and software development⁴³⁻⁴⁷. *R&D costs refer to software development costs up to a first commercial release, to the cost of preclinical trials and to lab-scale R&D costs for a new material and its potential applications. †Commercialization costs refer to the necessary investment to commercialize an invention, which can involve pilot plants, iterative development, process scale-up, clinical trials, regulatory approval, marketing and distribution.

资料来源：《Accelerating advanced-materials commercialization》，华安证券研究所

下游应用市场的开拓方面，新材料市场具有一定的不确定性，其主要原因有三点：(1) 新材料企业在行业价值链中处于上游，它们往往远离最终消费者，不易评估消费者的需求，因此市场的直接反馈较少；(2) 新材料在商业应用之前往往需要其他技术的跟进，这种对互补性创新的需求增加了市场的不确定性；(3) 最有潜力的新材料创新往往是不连续的，客户不易理解或观察到，这种创新不可见性增加了市场的不确定性。选择目标市场并进行技术-市场匹配对新材料领域至关重要，能否把

握住传统行业的痛点是其市场开拓的关键。

图表 4 技术成熟度及切中行业痛点是新材料应用关键



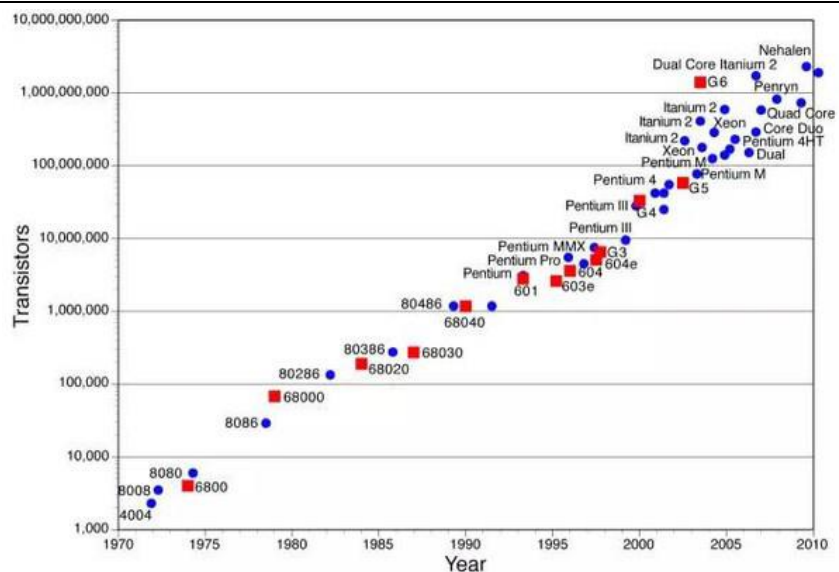
资料来源：工信部，华安证券研究所

- 新兴产业快速发展促使新材料产品不断更新换代，新材料翻“新”或下沉市场的速度决定着企业的未来。

近年来，高端装备、电子信息、新能源、生物医用、3D 打印及节能环保等新兴产业领域保持较快发展势头，这对关键基础材料提出新的挑战和需求，新材料翻“新”或下沉市场的速度无疑主宰了企业的未来。

新材料翻“新”方面，计算机第一定律的摩尔定律指出 IC 上可容纳的晶体管数目，约每隔 18 个月便会增加一倍，性能也将提升一倍。其背后折射的无疑是半导体材料快速的推陈出新速度，短短五十年半导体材料就完成了三代跨越，同时也推动了化合物材料、石墨烯等新式材料在半导体中的应用。

图表 5 1997-2010 年半导体芯片的晶体管密度变化

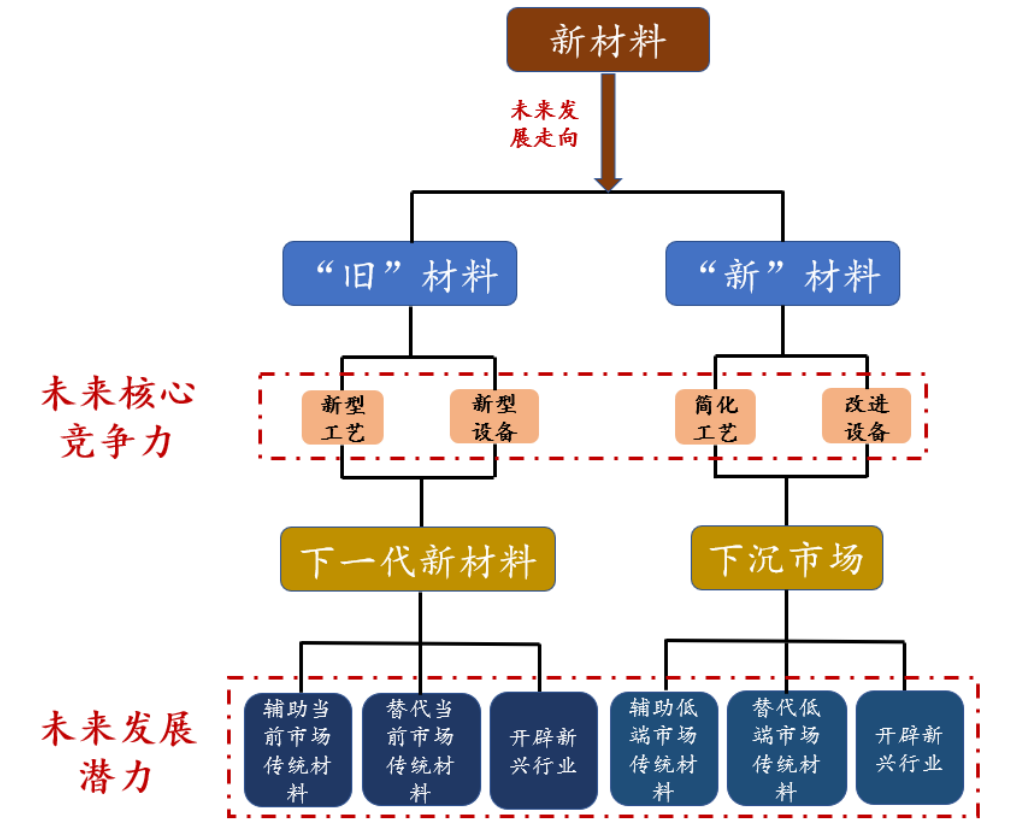


资料来源：搜狐网，华安证券研究所

下沉市场方面，特种材料罗杰斯公司在 70 年代中期主打的短玻纤增强型的覆铜

板是军工、航空等领域通讯系统不可或缺的新材料；进入 20 世纪以来，罗杰斯将改进的高频覆铜板成功应用到 5G 基站中，市占率达到 70%，市值近四年来屡创新高，增幅一度达到 376%，几乎再造了 4 个罗杰斯。

图表 6 新材料技术翻“新”或下沉市场速度主宰企业的未来



资料来源：华安证券研究所整理

- 新材料企业实际成长路径可能是初期、业绩成长期、成熟期、业绩波动期等多个阶段的组合，适用的估值方法也会随之变动。

海外新材料企业大多于上个世纪 50 年代左右成立，整体上已处于较为成熟的阶段，但国内多数新材料企业均诞生于 21 世纪初期，发展周期落后于同类海外公司，因而选择合适的海外公司进行对标可提供相对准确的估值参考。

初期：处于发展初期阶段的企业产品规模小，需要大量研发投入，净利润不稳定，因而更适用 PS 或者市研率估值

成长期：快速成长期的企业已经形成了较为完整的商业模式，业务规模不断扩张，因此我们需要重点关注该类型企业的盈利增速和盈亏平衡点。对仍处于亏损但业绩处于快速增长状态的企业可以按照 PS 或者市研率进行价值评估，对于已经跨过盈亏平衡点，盈利进入高速增长阶段，可使用 PEG、EV/EBIDTA 法进行估值。

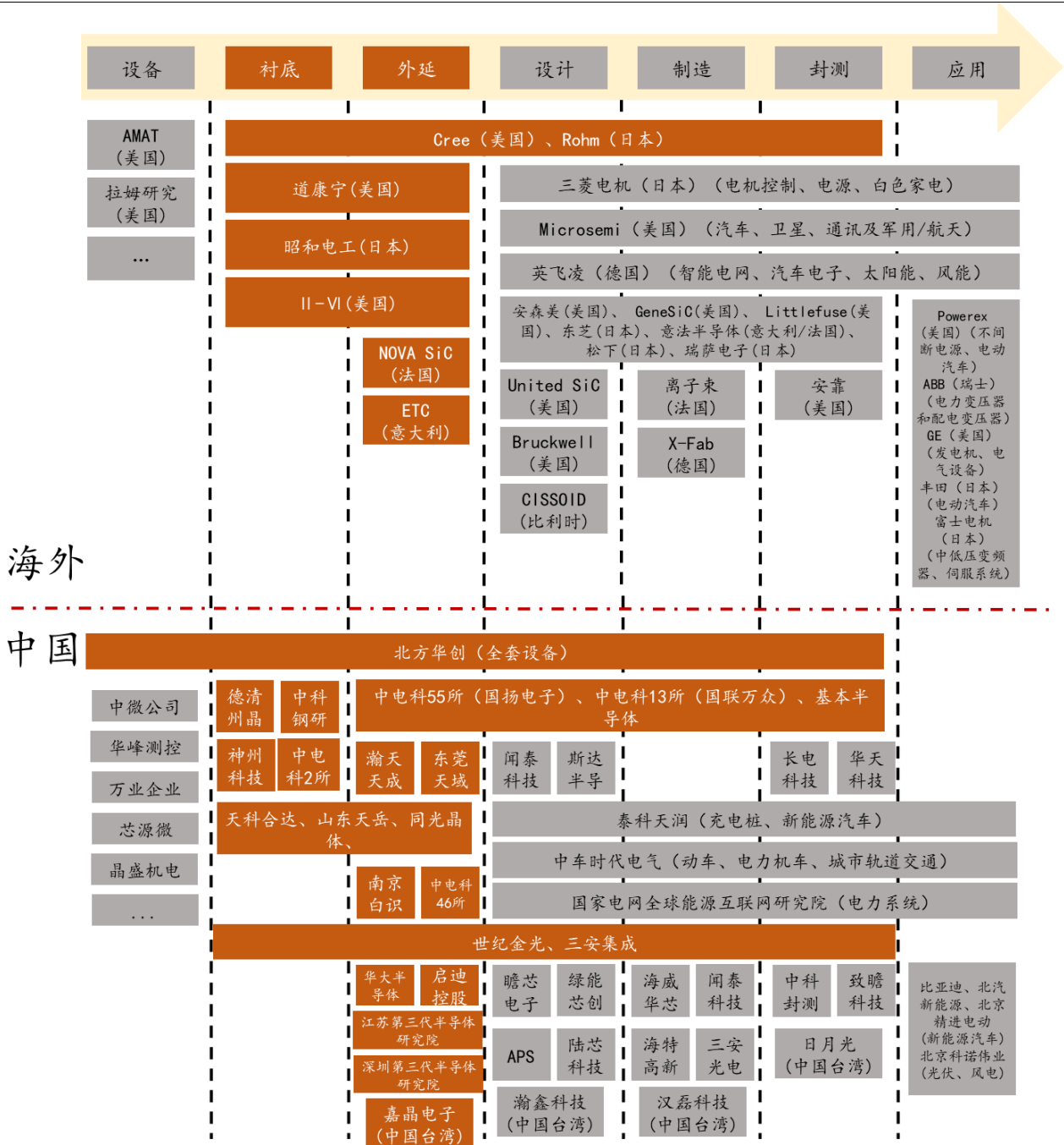
成熟期：处于成熟期的企业形成了完整的产品结构，拥有持续稳定的盈利能力和现金流，营收增速趋于平稳，常采用主流方法进行价值评估，包括 PE 估值、PB 估值、EV/EBITDA 估值等。

业绩调整期：业绩出现波动时，可根据资产变动或营收情况使用 P/B 或 P/S 提供短期估值参考，并在企业经营恢复时逐步切换回基于盈利预期的估值方法。

2 第三代半导体:能源转换链中的革命

英飞凌科技电源与传感事业部大中华区应用市场总监理程文涛在接受《中国电子报》记者采访时指出：“在整个能源转换链中，宽禁带半导体的节能潜力可为实现长期的全球节能目标作出贡献。宽禁带技术将推动电力电子器件提高效率、提高密度、缩小尺寸、减轻重量、降低总成本，因此将在数据中心、智能楼宇、个人电子设备等应用场景中为能效提升作出贡献。”

图表 7 海外及中国碳化硅产业链全景



资料来源：华安证券研究所整理

2.1 碳化硅是功率器件的优质衬底材料

半导体材料指常温下导电性能介于导体与绝缘体之间的材料，是半导体行业中必不可少的核心部分。物质通常被人们分为三类：金属材料，如金、银、铜、铁、锡等，因其具有良好的导电、导热性被称之为导体；塑料、橡胶、陶瓷、金刚石、人工晶体、琥珀等导电、导热性差的材料被称之为绝缘体；而半导体则是一种在常温状态下导电能力优于绝缘体但不如导体的物质。纯净的半导体在绝对零度环境下满带中被电子填满，而在导带中没有电子，此时在外电场的作用下，如果满带仍是被电子填满的状态，外电场不能增加电子的动量，也不能使满带中电子的能量状态产生变化，因而不能使电子产生定向的运动，也就不会产生电流。此时若通过增加热量、光照射或者增强外电场等方式激发满带中电子，使满带中的电子得到足够多能量，使其越过禁带宽度 E_g 而跃迁到导带上去，此时半导体就能够导电。

图表 8 半导体产业链结构

半导体支撑行业	半导体支撑行业		半导体终端应用	
半导体设备	工艺过程	按产品分类		
半导体材料 单晶炉 刻蚀机 气相沉积 光刻机 涂胶显影 检测设备 清洗机 引线键合	芯片设计	集成电路	移动通信 个人电脑	
	↓ 芯片制造	存储器	逻辑芯片 微处理器 模拟芯片	云计算 大数据
		分立器件	IGBT	汽车电子 物联网
	↓ 芯片封测	传感器	MOSFET 二极管 晶闸管	工业电子 军事太空
		MEMS 图像传感器	人工智能 虚拟现实	
		光电子器件	LED OLED	

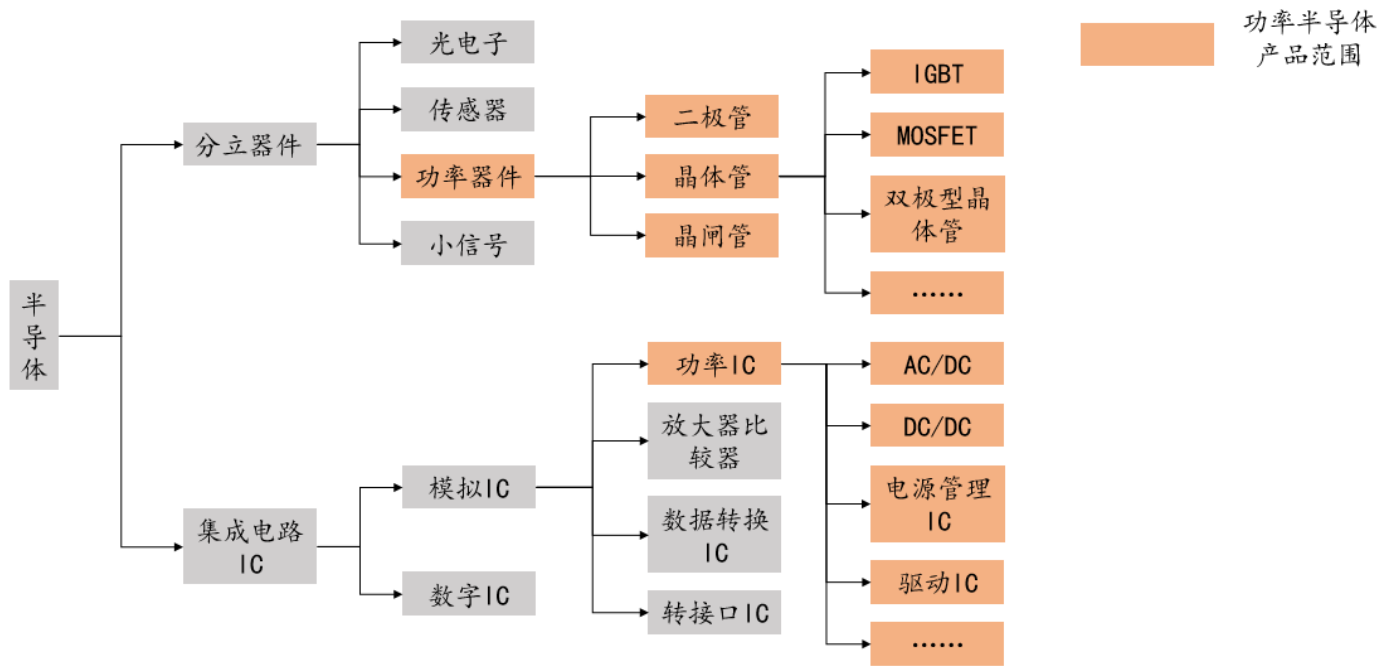
资料来源：《国内半导体产业的发展研究》，华安证券研究所

半导体产业作为电子元器件产业中最重要的组成部分，根据不同的产品可分为分立器件、集成电路、其他器件等，分立器件可进一步分为功率器件、晶闸管、晶体管等，其中功率器件是电子装置中电能转换与电路控制的核心，主要用于改变电子装置中电压和频率、直流交流转换等。半导体分立器件是电力电子产品的基础之一，也是构成电力电子变化装置的核心器件之一，主要用于电力电子设备的整流、稳压、开关、混频等，具有应用范围广、用量大等特点，在消费电子、汽车电子、电子仪器仪表、工业及自动控制、计算机及周边设备、网络通讯等众多国民经济领域均有广泛的应用。功率半导体是电子装置电能转换与电路控制的核心，本质上是利用半导体的单向导电性实现电源开关和电力转换的功能，来实现变频、变相、变压、逆变、整流、增幅、开关等，被广泛应用于汽车、通信、消费电子和工业领域。

功率半导体可以分为功率 IC 和功率分立器件两大类，其中功率分立器件主要包

括二极管、晶闸管、晶体管等产品。常见晶体管主要有 BJT、IGBT 和 MOSFET。MOSFET 和 IGBT 逐渐成为主流，而多个 IGBT 可以集成为 IPM 模块，用于大电流和大电压的环境。功率 IC 是由功率半导体与驱动电路、电源管理芯片等集成而来的模块，主要应用在小电流和低电压的环境。

图表 9 功率半导体产品范围示意图



资料来源：《碳化硅技术基本原理》，华安证券研究所

碳化硅材料是制作高频、高温、抗辐射及大功率器件的优异材料。和 Si、GaAs 等第一、二代半导体材料相比，碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 拥有击穿电压高、宽禁带、导热率高、电子饱和速率高、载流子迁移率高等优点。

目前 Si 是最常见的功率器件用半导体衬底材料，在经过功率 MOSFET 和 IGBT 的开发，Si 功率开关器件的性能得到了显著的提升。然而，目前 Si 基功率器件技术由于材料自身的性能，已经很难再有所突破了。因而近年来，第二代半导体材料及第三代半导体材料应运而生。

- 第一代半导体材料从首次通过直拉法成功制备出来至今已有百年历史，为现代半导体行业的发展做出巨大贡献，因其储量较为丰富，制备工艺成熟，在现阶段仍然被很多领域广泛应用，在整个行业中 95% 以上的半导体器件由硅材料制成。硅材料是集成电路的核心，硅材料产业的发展也与集成电路产业的发展紧密相关。随着人们对科学技术的不断探索，半导体硅材料因其自身特性的原因在高压、高频器件方面的应用有一定的局限性。
- 第二代半导体材料在物理性能上与第一代半导体材料相比有了明显的进步，比如带隙较宽，电子迁移率较高，更适合高压、高频器件的工作环境，而且其性能也更符合现代通讯业的需求。但第二代半导体材料也有着明显的弊端。禁带宽度虽然比第一代半导体材料大，但击穿电压仍旧不够高，在高温、高功率的情况下应用，效果并不理想。另外，砷化镓的原材料有毒，对环境不够友好，制备过程中的风险偏高。

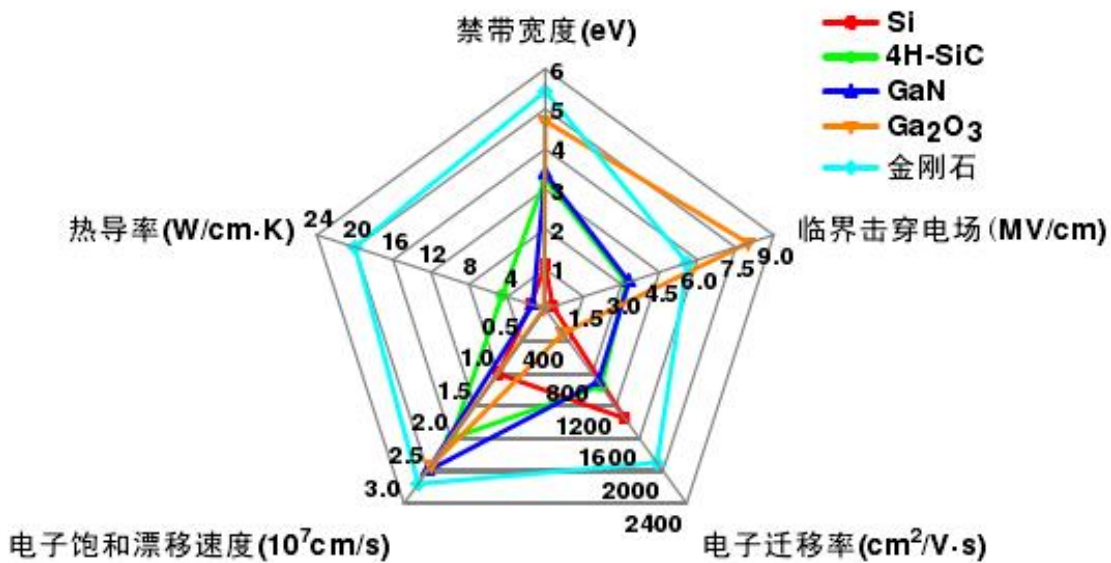
- 第三代半导体材料随着智能时代的来临而备受青睐，禁带宽度明显增加，击穿电压较高，抗辐射性强，电子饱和速率、热导率都很高。基于上述特性第三代半导体材料不仅能够在高压、高频的条件下稳定运行，还可在较高的温度环境下保持良好的运行状态，并且电能消耗更少，运行效率更高。

图表 10 各代半导体材料的主要用途

材料类别	器件	器件用途
第一代半导体材料	晶体管、二极管	通讯、雷达、电视、广播
	集成电路	计算机、自动控制、仪表
	整流器	整流
	晶闸管	设备自控、超声波振荡器
	射线探测器	光量子检测、原子能分析
	太阳能电池	太阳能发电
第二代半导体材料	各种微波管	雷达、移动通讯
	激光管	光纤通讯
	红外发光管	小功率红外光源
	霍尔元件	磁场控制
	激光调制器	激光通讯
	高速集成电路	高速计算机
	太阳能电池	太阳能发电
第三代半导体材料	激光器件	激光打印机、光学存储
	发光二极管	视频显示、信号灯、移动电话
	集成电路	电子开关、内存、卫星、激光电路

资料来源：《国内半导体产业的发展研究》，华安证券研究

图表 11 功率半导体材料重要物理性能的比较



资料来源：《碳化硅超级结肖特基二极管的理论和工艺研究》，华安证券研究所

SiC的绝缘击穿场强是Si的10倍，因此与Si器件相比，能够以更高的掺杂浓度并且膜厚更薄的漂移层制作出600V~数千V的高压功率器件。高压功率器件的电阻成分主要由该漂移层的电阻所组成，因此使用SiC材料可以实现单位面积导通电阻非常低的高压器件。理论上当耐压相等时，SiC在单位面积下的漂移层电阻可以降低到Si的1/300。对于Si材料来说，为了改善由于器件高压化所带来的导通电阻增大的问题，主要使用例如IGBT等少数载流子器件，但是却存在开关损耗较大的问题，其结果是所产生的发热问题限制了IGBT的高频驱动应用。SiC材料能够以具有快速器件结构特征的多数载流子器件实现高压化，因此可以同时实现“高耐压”、“低导通电阻”、“高频”这三个特性。

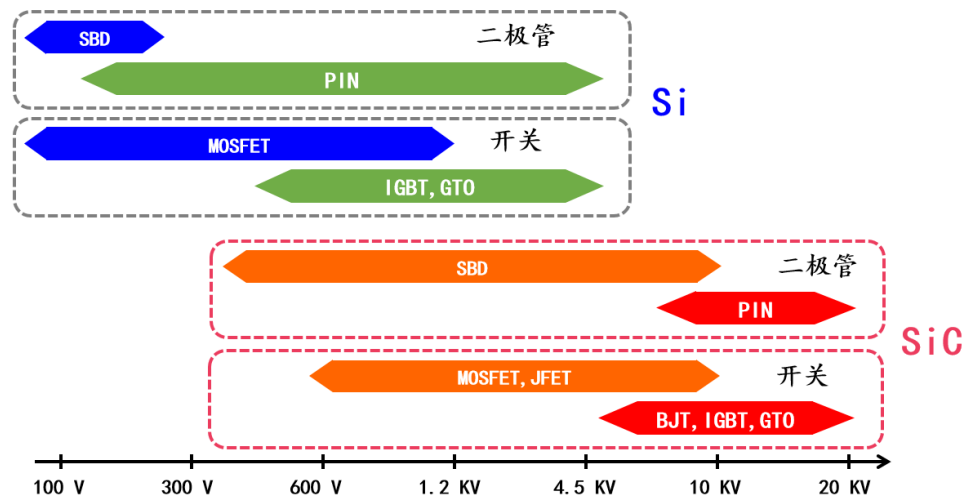
图表 12 碳化硅与其他半导体材料本征性质的比较

性质/材料	4H-SiC	6H-SiC	GaN	GaAs	Al ₂ O ₃	AlN	Si
热导率/[W/cm. K]	4.9	4.9	1.3	0.5	0.3	2.0	1.3
带隙/eV	3.2	3.0	3.44	1.42	>8.5	6.2	1.12
可用掺杂	n, p	n, p	n, p	n, p	绝缘	绝缘	n, p
本征材料是否透明	是	是	是	否	是	是	否
Eb/MV/cm	9.7	10.0	12.2	12.8	9.4	8.9	11.8
电子迁移速率/cm ² . V. S ⁻¹	1000	600	900	8500	-	-	1450
饱和电子速率/10 ⁷ . S ⁻¹	2.0	2.0	2.7	2.0	-	-	1.0
与 GaN 的晶格失配/%	3.8	3.5	0	-22	16	2.5	-17
与 GaN 的晶格失配/%	-0.11	-0.12	0	0.11	0.3	0.01	-0.17

资料来源：《中国战略新兴产业-新材料-第三代半导体材料》，华安证券研究所

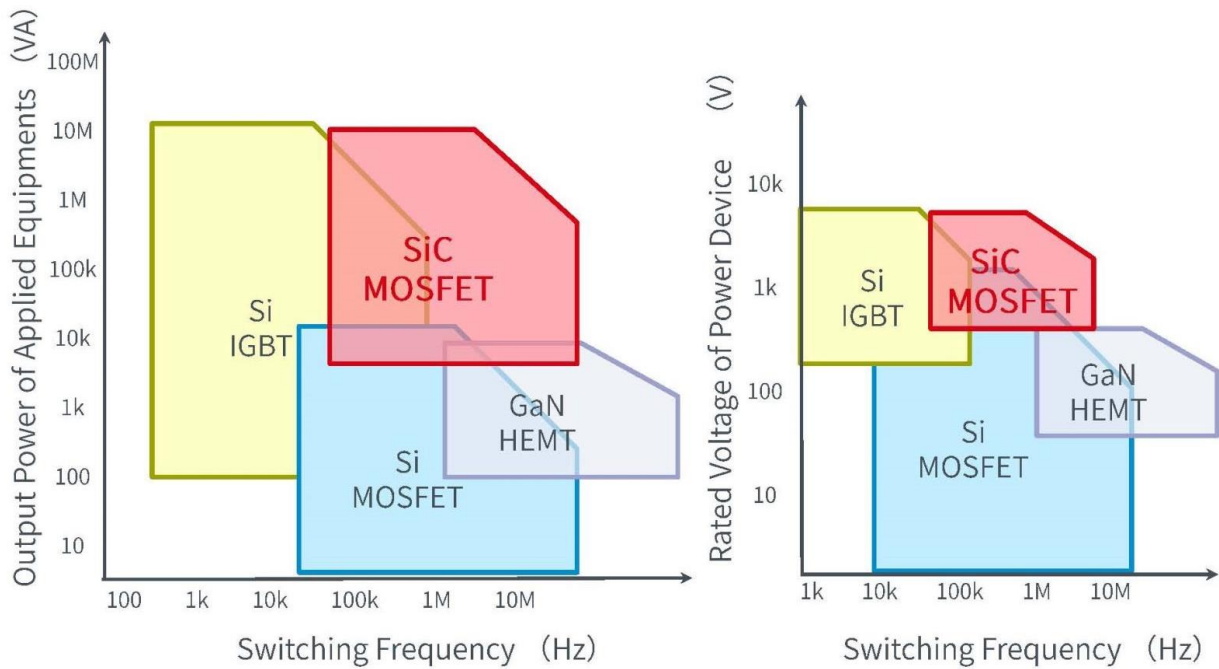
- **可在高频段高压段工作。** 高频高压是第三代半导体材料器件的最大特性，最早被应用的第三代半导体材料器件包括碳化硅(SiC)、高频和短波器件，目前应用市场已成熟，同时碳化硅(SiC)器件也适用于极端的工作环境。42GHz 碳化硅 CMESFET 在军用雷达和通信领域的应用成为各国角逐的领域。

图表 13 碳化硅器件可在高压下使用



资料来源：面包馆，华安证券研究所

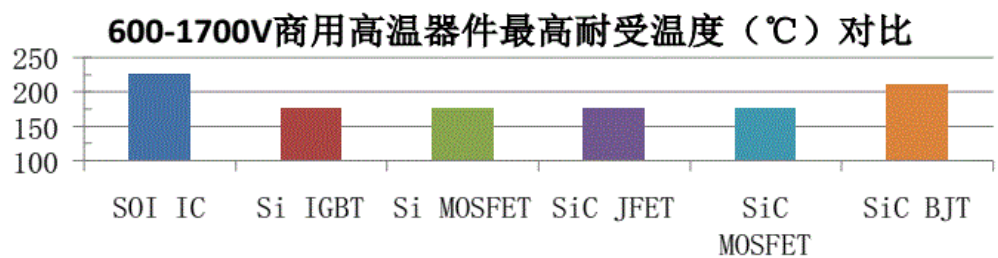
图表 14 SiC 器件、GaN 器件及 Si 器件适用的频段



资料来源：中国电子商情，华安证券研究所

- **可在较高温度下工作。** SiC 材料及其器件结构有天生的耐高温能力，在真空条件下甚至可耐达 400 至 600℃ 的高温。在实际应用中，为防止接触空气而产生氧化，SiC 器件必须采用耐高温的封装。150℃ 结温是业界目前的最高标准，175℃ 结温等级刚刚开始展露，有标准化封装可以采用，而 200℃ 乃至更高温的封装对封装材料和工艺要求十分严苛，而且必须根据裸片特征进行定制设计，以保证导热和散热性能要求。

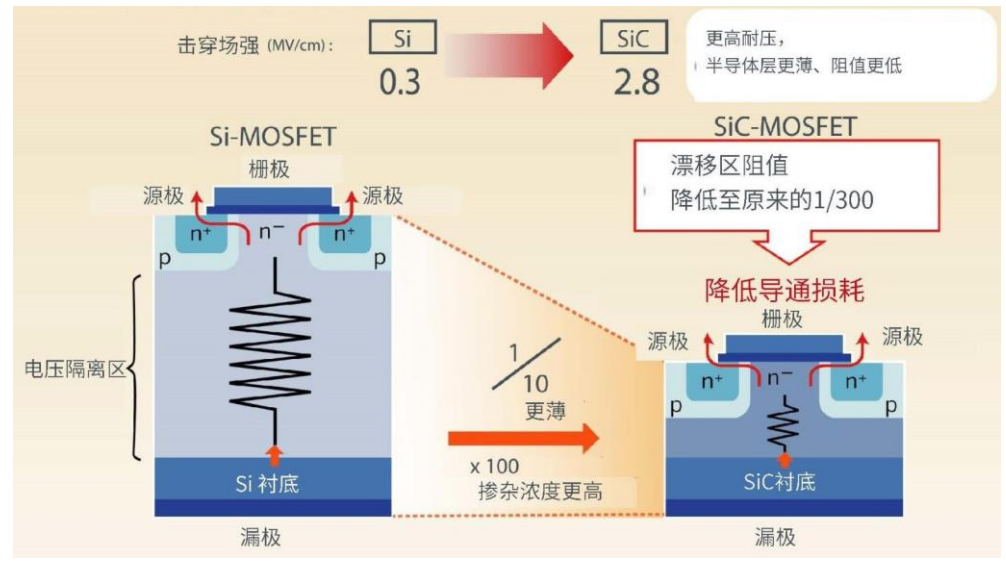
图表 15 碳化硅器件耐受温度高



资料来源：产业信息网，华安证券研究所

- **实现高效率的能源传输与利用。** 传统的硅基材料不能提供较低的导通电阻，在进行电力传输或转移的过程中会造成能量的大量损耗，而碳化硅 (SiC) 元件则可以避免这样的损耗。碳化硅 (SiC) 元件具备高导热特性，材料又有宽能隙、耐高压和承受大电流的特性，可以降低导通时的损耗，更符合高温作业环境和高能效利用的要求。

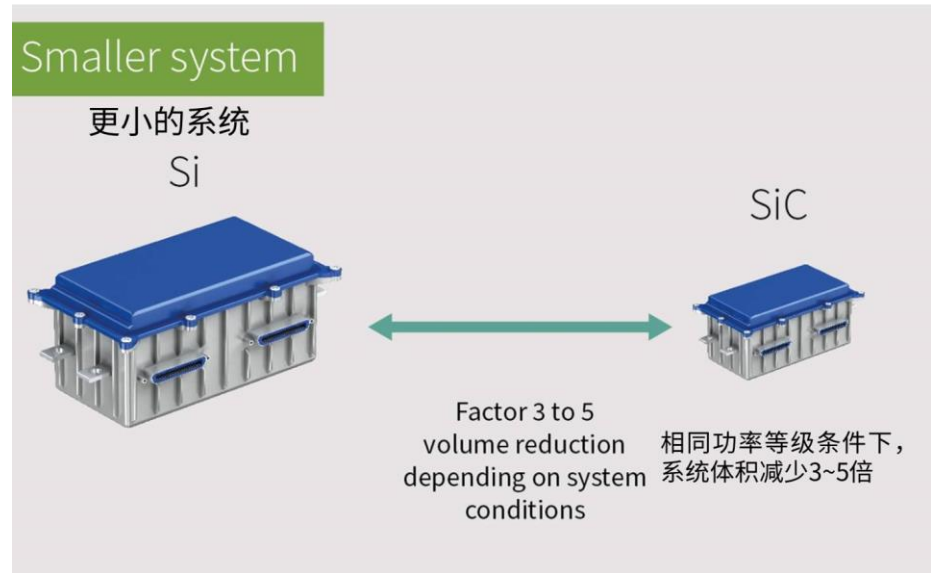
图表 16 碳化硅 (SiC) 器件可降低碳化硅 (SiC) 器件可降低导通损耗



资料来源: 产业信息网, 华安证券研究所

- 有助于产品实现小型化。使用碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 材料制备的功率元器件具备高速开关动作和耐热性较高两个特性, 开关频率越高, 构成电力转换器的电感器等部件实现小型化就越容易。另外, 耐高温、电能利用率高也是电力转换器小型化的必要条件。

图表 17 采用碳化硅 (SiC) 器件可将电力驱动系统体积减小 3~5 倍

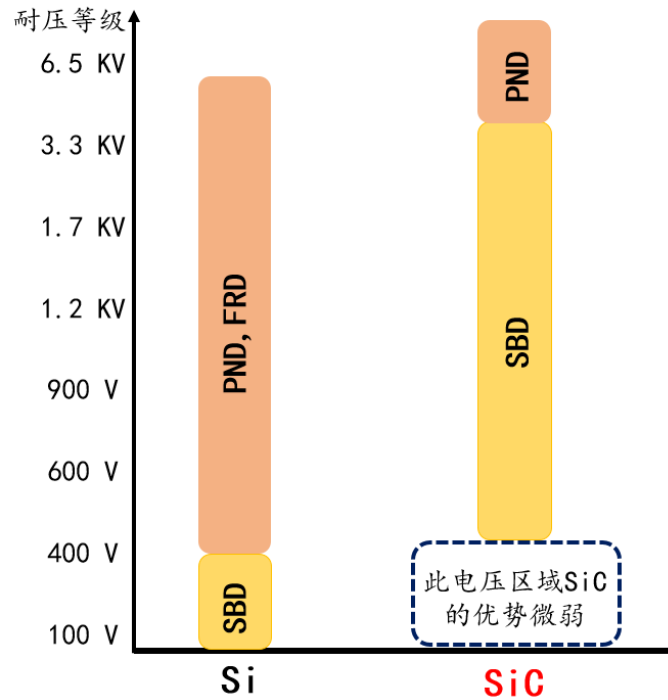


资料来源: 电子头条网, 华安证券研究所

SBD 器件方面, 碳化硅基 SBD 器件相较于硅基 SBD 器件具有耐高压、高温不易失控及损耗小等特点。

- SiC-SBD 和 Si-SBD 均具有高速性的特征, SiC-SBD 不仅拥有优异的高速性且实现了高耐压, 部分公司已经开始量产 1200V 的产品, 同时在推进 1700V 耐压的产品。

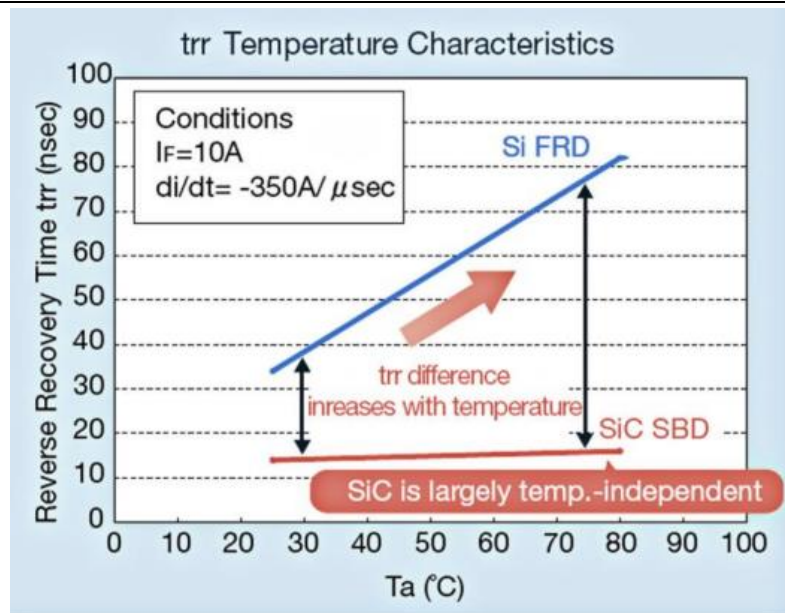
图表 18 Si 和 SiC 的耐压等级 (二极管)



资料来源：面包板，华安证券研究所

- SiC 材料的温度特性变动比 Si 小，在高温条件下特性更稳定。快速硅二极管的 trr 随温度上升而增加，而 SiC 肖特基二极管则能够保持几乎恒定的 trr，因此，在高温工作时，开关损耗几乎没有增加。。

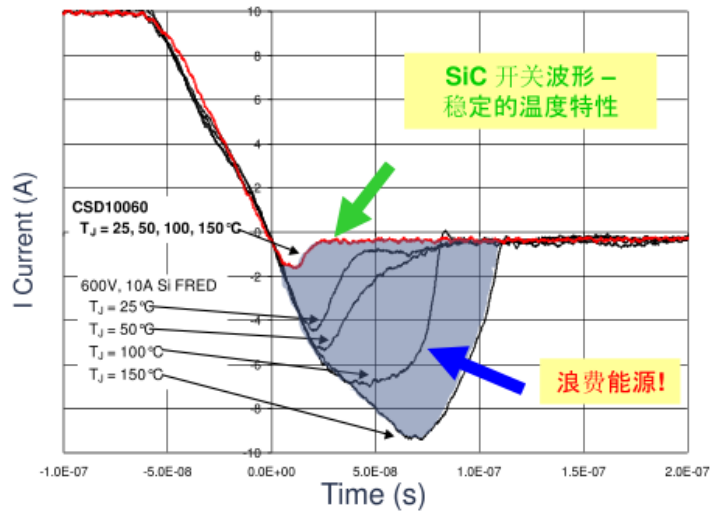
图表 19 SiC 肖特基二极管与快速硅二极管的 trr 温度特性



资料来源：泰科天润官网，华安证券研究所

- SiC 肖特基二极管相对于传统硅二极管的反向恢复电流 IRRM 降低了 50%以上，反向恢复电荷 QRR 及关断损耗 Eoff 降低了 90%以上。可以看出 SiC 肖特基二极管的动态损耗极低，可以显著减少功率模块的开关损耗，节约用于冷却的开支并提升模块的功率密度。

图表 20 SiC 肖特基二极管与快速硅二极管的反向恢复特性

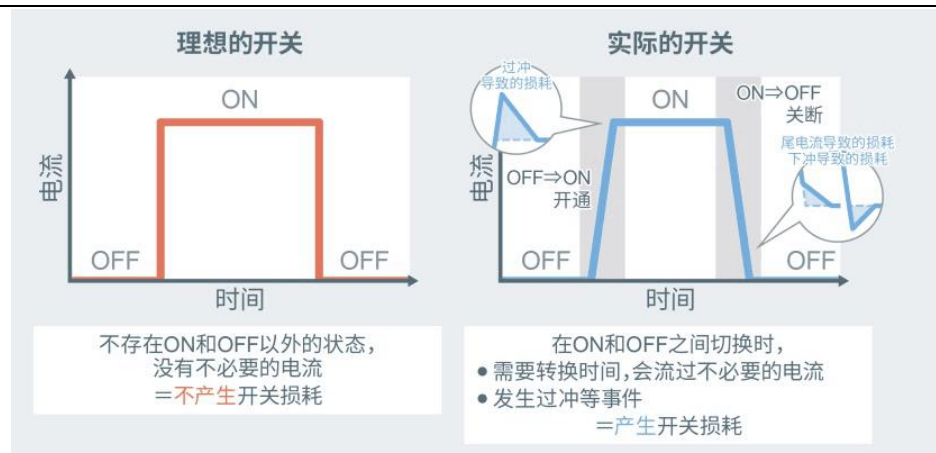


资料来源：《基于碳化硅器件小型化大功率高压电源的研究》，华安证券研究所

MOSFET 器件方面，碳化硅基 MOSFET 器件相较硅基 IGBT 器件具有损耗小、导电电阻低及耐高压等特点。

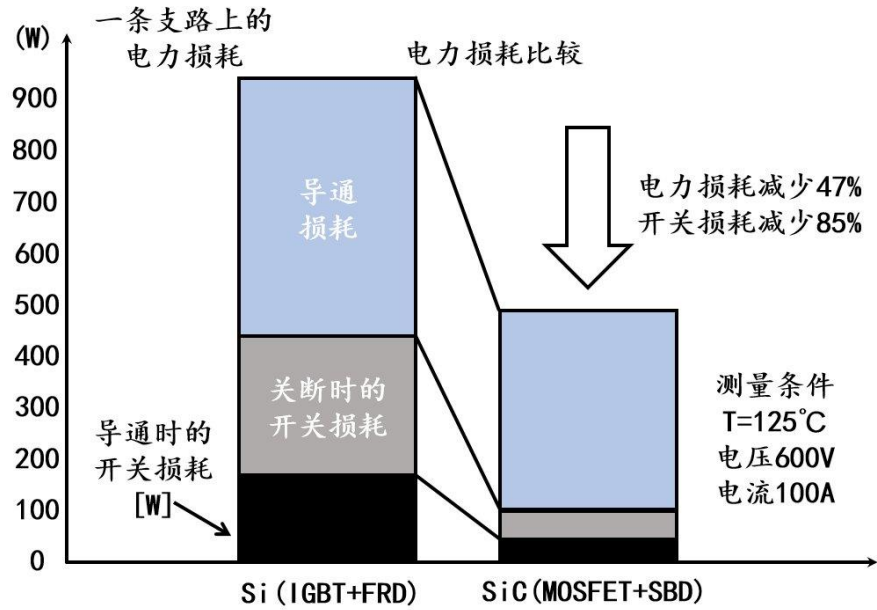
- 开通损耗和关断损耗均为晶体管等半导体元件开关时产生的损耗。开通损耗是在元件 ON 时产生的损耗，关断损耗是在元件 OFF 时产生的损耗。理想情况下，这些损耗应该为零，但实际上，由于结构上的缘故，在 ON 和 OFF 之间切换时，不可避免地会流过不必要的电流，从而产生损耗，因此对于功率半导体来说，设法减少这些损耗是非常重要的工作。

图表 21 晶体管开通损耗和关断损耗



资料来源：车榜神，华安证券研究所

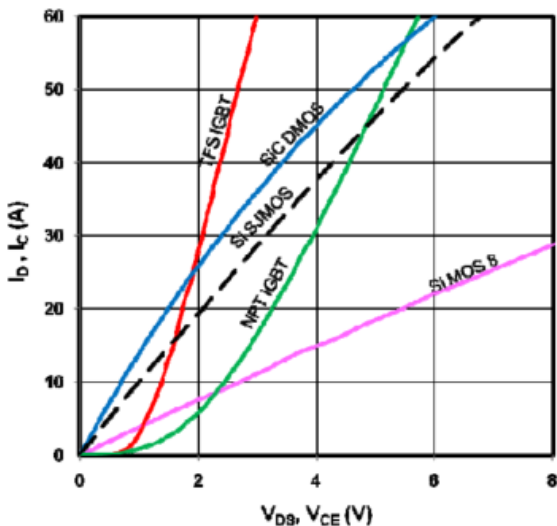
图表 22 硅材料与碳化硅材料的器件损耗对比



资料来源：《基于碳化硅器件小型化大功率高压电源的研究》，华安证券研究所

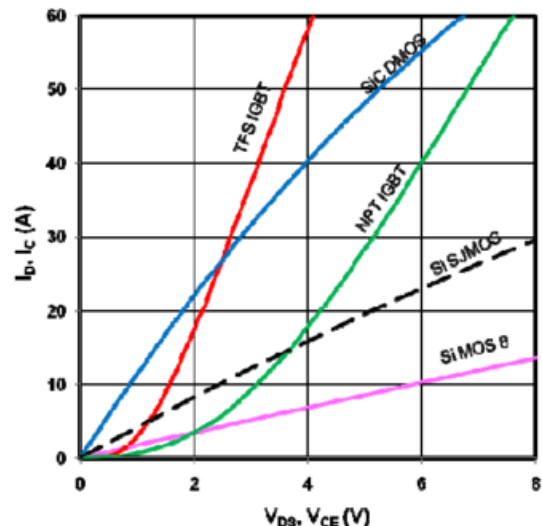
- 根据欧姆定律，相对 I_d , V_d 越低导通电阻越小，特性曲线的斜率越陡，导通电阻越低。25°C时，SiC 及 Si MOSFET 的 I_d 相对 V_d (V_{ds}) 呈线性增加，但由于 IGBT 有上升电压，因此在低电流范围 MOSFET 元器件的 V_{ds} 更低。150°C时，SiC、Si-MOSFET 的特性曲线斜率均放缓，因而导通电阻增加。但是，SiC-MOSFET 在 25°C时的变动很小，在 25°C环境下特性相近的产品，差距变大，温度增高时 SiC MOSFET 的导通电阻变化较小。

图表 23 25°C下各器件的正向导通特性



资料来源：《SiC MOSFET 功率晶体管的电学特性研究》，华安证券研究所

图表 24 150°C下各器件的正向导通特性

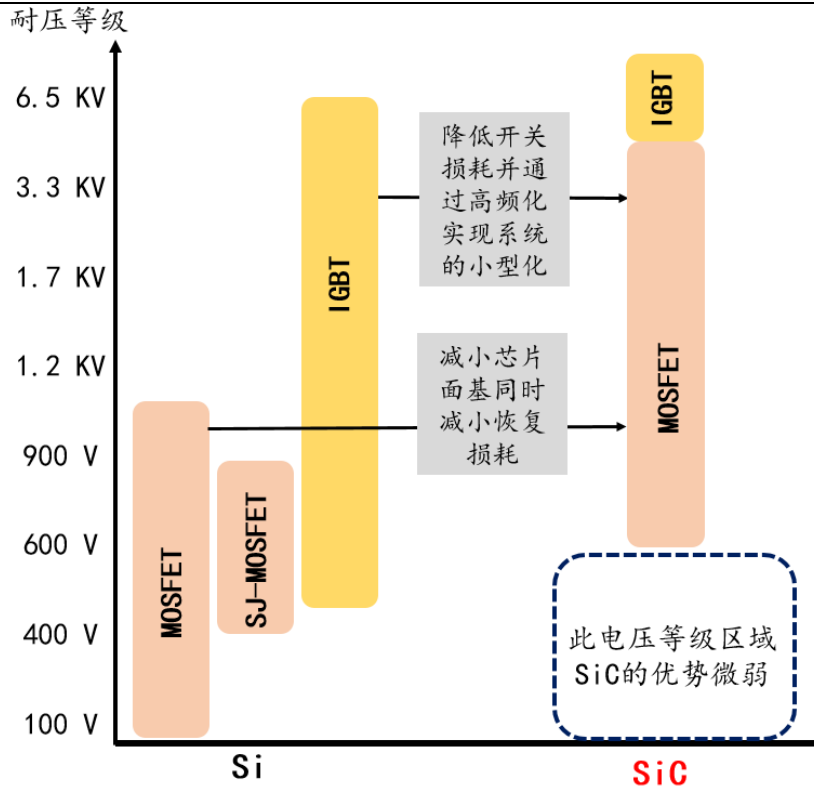


资料来源：《SiC MOSFET 功率晶体管的电学特性研究》，华安证券研究所

- 目前 SiC-MOSFET 有用的范围是耐压 600V 以上，特别是 1kV 以上。相对于 IGBT，SiC-MOSFET 降低了开关关断时的损耗，实现了高频率工作，有助于

应用的小型化。

图表 25 Si 和 SiC 的耐压等级电压范围



资料来源：《SiC MOSFET 器件设计与可靠性研究》，华安证券研究所

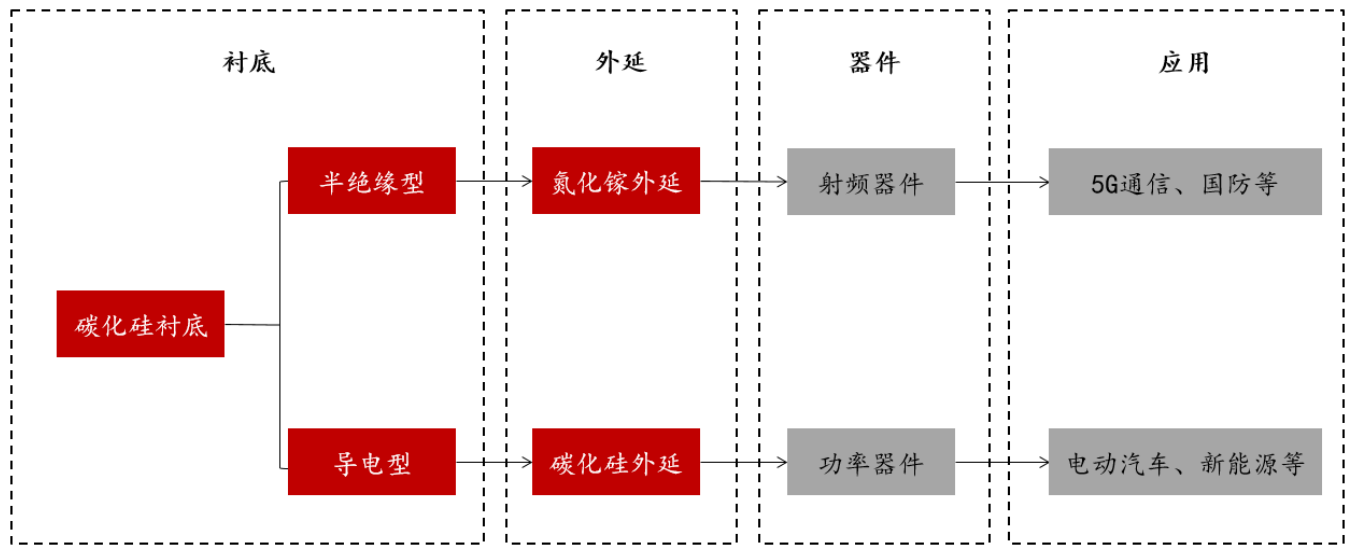
2.2 新能源及通讯将支撑市场稳步发展

提高能量效率、减少能量消耗及损耗是功率器件面临的基本问题。世界上电能消耗占据总能量消耗的平均比例已经高于 20%，不管电能如何产生，将电能经济而有效的传递到负载的过程需要用到电能的调节和变换，据《碳化硅技术基本原理》一书数据，超过 50%的电流经电能变换。一般而言，电子电力的效率受限于半导体器件、电容、电感及封装的性能，特别是作为限制电能变换器性能和尺寸的关键部位，高性能功率半导体器件受到越来越多的关注。开发高电压和低损耗的功率器件势必成为未来绿色能源及智能电网的基础。电子电力学的概念由 Newell 在 1973 年引入，他设计利用功率半导体器件和电路进行电能变换。通过调节和变换电能使电能可以以最佳形式供给负载，电能变换包括直流-直流 (AC-DC)、直流-交流 (DC-AC)、直流-直流 (DC-DC)、交流-交流 (AC-AC)。基于现有的技术，典型的电能变换效率仅有 85%-95%，在常见的直流-直流 (AC-DC)、直流-交流 (DC-AC) 变换中，变换的效率甚至可以低至 80%。

碳化硅衬底可以制作成半绝缘型衬底及导电型衬底，分别外延碳化硅及氮化硅制作成功率器件或微波射频器件。碳化硅材料为衬底的产业链主要包括碳化硅衬底材料的制备、外延层的生长、器件制造以及下游应用市场。在碳化硅衬底上，主要使用化学气相沉积法 (CVD 法) 在衬底表面生成所需的薄膜材料，即形成外延片，进一步制成器件。其中，在导电型碳化硅衬底上生长碳化硅外延层制得碳化硅外延片，可进一步制成功率器件，应用于新能源汽车、光伏发电、轨道交通、智能电网、航空航天等领域；在半绝缘型碳化硅衬底上生长氮化镓外延层制得碳化硅基氮化镓

(GaN-on-SiC) 外延片, 可进一步制成微波射频器件, 应用于 5G 通讯、雷达等领域。

图表 26 碳化硅衬底、外延及器件产业链示意图

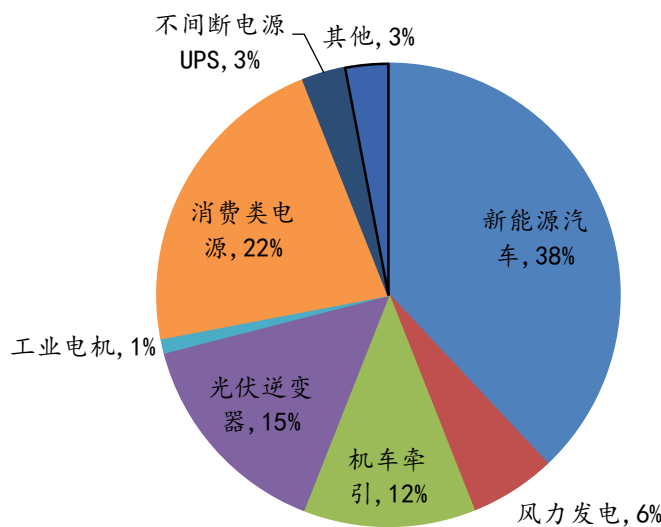


资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

(1) 功率电器领域，碳化硅器件可大幅降低能耗及可耐高压高频，被广泛应用于电动汽车/充电桩、光伏新能源、轨道交通及智能电网领域，2025 年市场规模将超百亿。

与传统技术相比，碳化硅电力芯片能减少高达 75% 的能耗，还能够大幅度减小电力设备体积和重量。

图表 27 2020 年我国 SiC 电力电子器件应用市场结构



资料来源：CASA Research，华安证券研究所

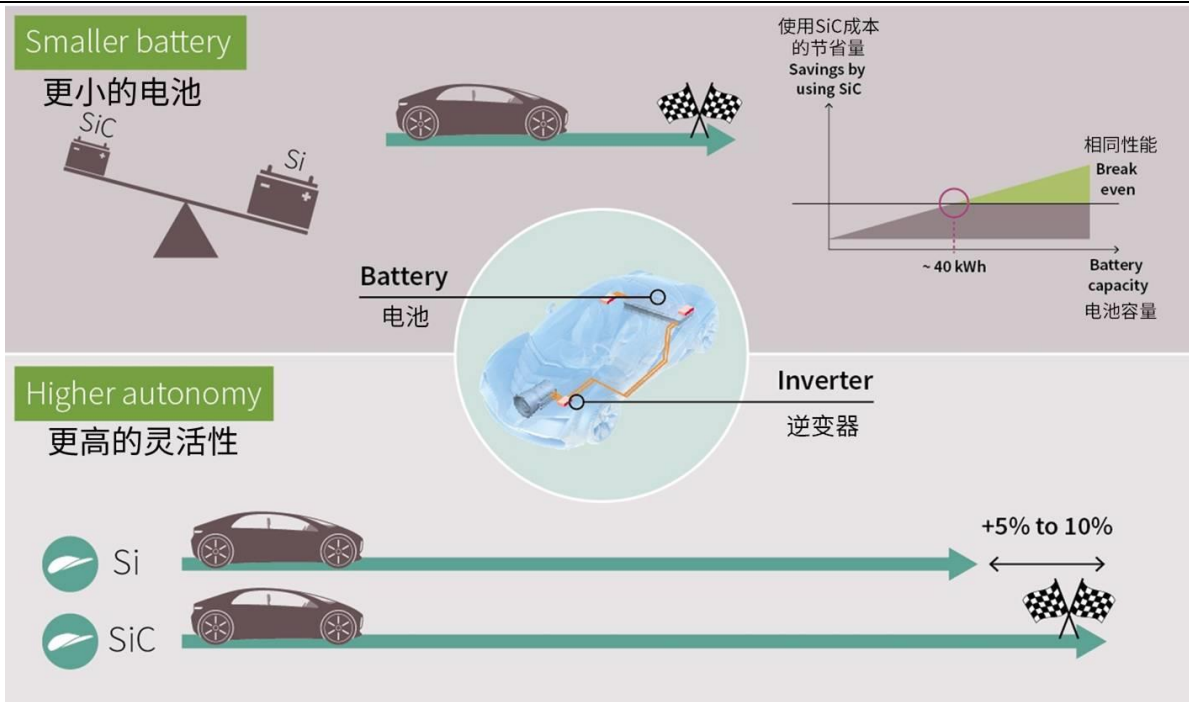
据 CASA Research 统计，2020 年国内 SiC 电力电子器件市场规模约为 46.8 亿元，较上年同比增长 90%。据中国半导体行业协会数据显示，2020 年我国功率半导体分立器件市场规模约为 3002.6 亿元，SiC 电力电子器件整体渗透率约为 1.56%。市场规模增长的主要驱动因素是新能源汽车市场的快速渗透的爆发；而 2020 年光伏市场是有国家补贴的最后一年，装机量出现恢复性增长。其中，SiC 器件占据的市场规模有所回升。

未来五年，SiC、GaN 电力电子器件应用市场将以 45% 的年复合增长率增长至近 300 亿元。在中高压领域，SiC 电力电子器件将继续渗透，新能源汽车仍将是最大应用领域。在低压、小功率电源领域，包括 LED 驱动电源、电动工具电源、消费电源、D 类音频，GaN 电力电子器件将是主角，成为驱动市场的新力量；在中压领域，GaN、SiC 电力电子器件在数据中心服务器、路由器和网络交换机中的应用正呈现不断增长的趋势。我国在“十四五”科技计划中将建设“面向大数据中心应用的 GaN 基高效功率电子，应用于数据中心电源的 GaN 电力电子器件”提上日程。预计，未来这个市场复合年均增长率将达到 66.5%；以此为契机，有条件的企业要加快储备相关技术和完善专利布局，产业链相关的“政产学研用金”各方也加强协同，共同建立良好的产业生态。

- 新能源汽车领域，国内 2020 年新能源汽车市场 6 英寸 SiC 晶圆需求量超过 4 万片，预计到 2025 年需求量将增长到近 30 万片。

新能源汽车行业是市场空间巨大的新兴市场，全球范围内新能源车的普及趋势逐步清晰化。在相同的续航能力下，基于碳化硅 (SiC) 的驱动系统解决方案所需的电池重量和体积更小。同样，在相同的电池容量下，基于碳化硅 (SiC) 的驱动系统使电动车续航里程更长。当电池容量超过 40-kWh 时，电池容量越大，使用碳化硅 (SiC) 带来的成本节省越显著。

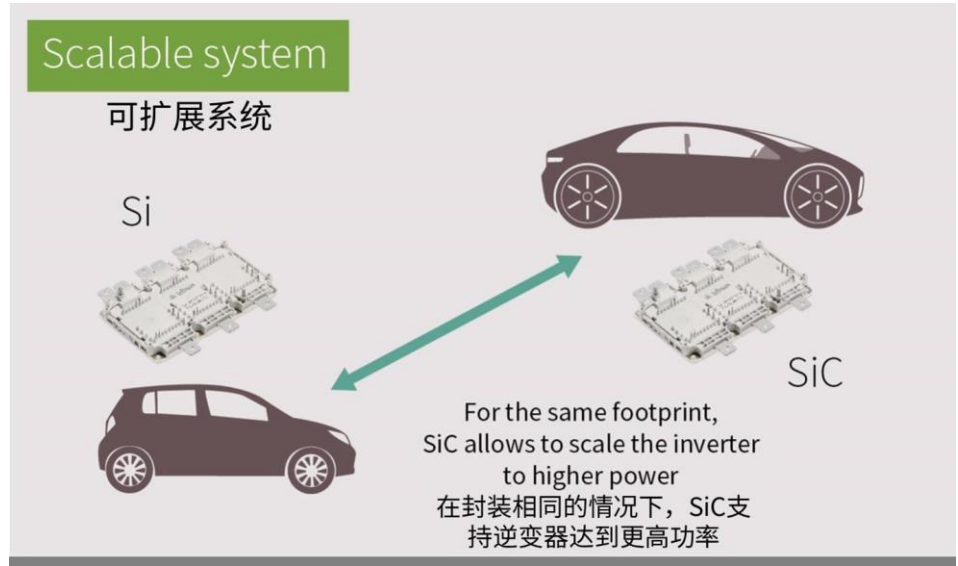
图表 28 基于碳化硅 (SiC) 的驱动系统可搭载更轻、更小的电池且续航里程更长



资料来源：电子头条网，华安证券研究所

此外，IGBT 模块是混合动力汽车和纯电动汽车中逆变器的关键元件，功率密度越高，电力驱动系统的设计则越紧凑。在相同功率等级下，全碳化硅（SiC）模块的封装尺寸显著小于硅（Si）模块；在相同封装下，全碳化硅（SiC）模块具备更高电流输出能力，支持逆变器达到更高功率。

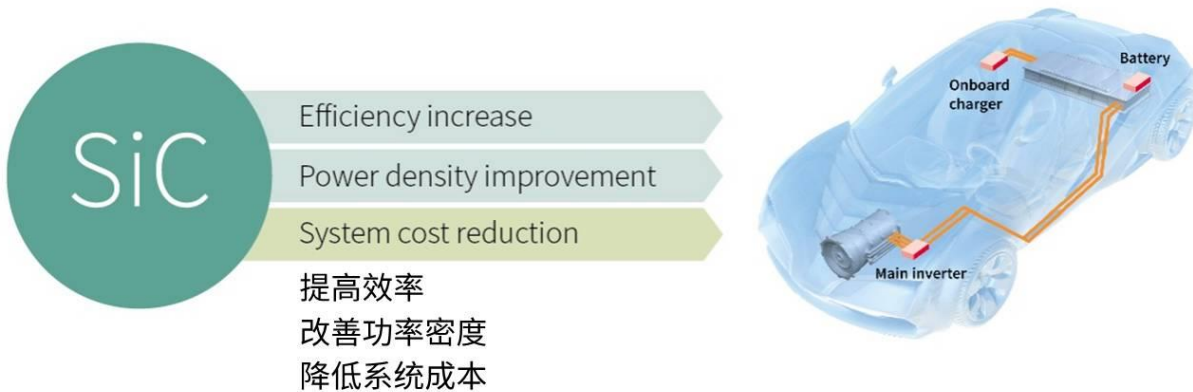
图表 29 全碳化硅模块具备更高电流输出能力，支持逆变器达到更高功率



资料来源：电子头条网，华安证券研究所

目前，碳化硅功率器件已被国际知名车企应用在其电动汽车上。电动驱动系统中，主逆变器负责控制电动机，是汽车的关键元器件，特斯拉 Model 3 的主逆变器采用了意法半导体生产的 24 个碳化硅 MOSFET 功率模块，是全球第一家将碳化硅 MOSFET 应用于商用车主逆变器的 OEM 厂商。2020 年 12 月，丰田汽车推出并公开发售“Mirai”燃料电池电动汽车，是丰田汽车首次开始使用碳化硅功率器件。根据碳化硅器件特点和电动汽车的发展趋势，碳化硅器件是未来电动汽车的必然之选。

图表 30 英飞凌碳化硅产品在汽车中的应用



资料来源：电子头条网，华安证券研究所

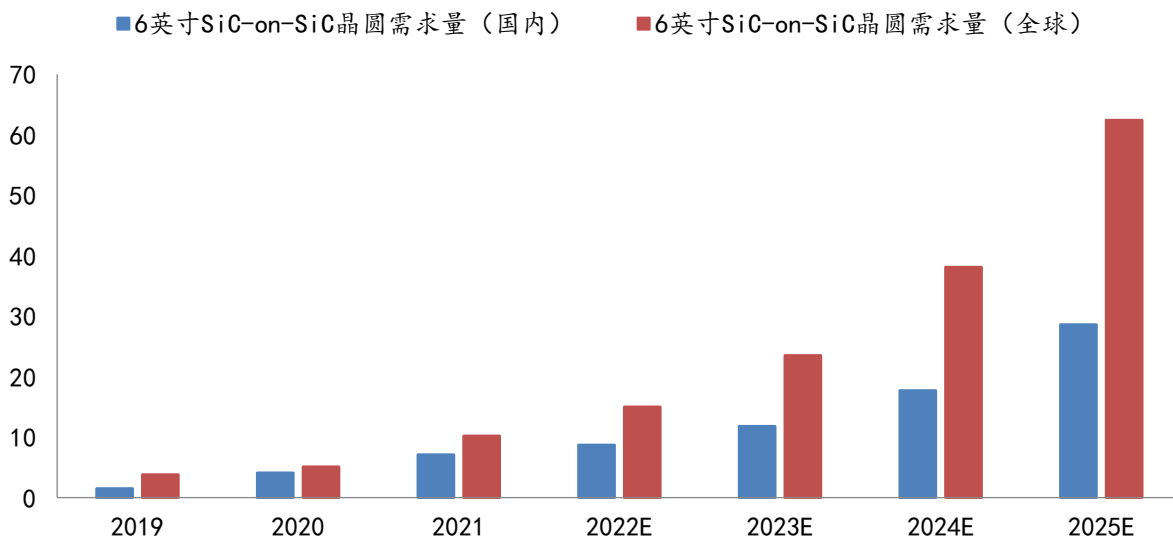
图表 31 罗姆碳化硅产品在汽车中的应用



资料来源：产业信息网，华安证券研究所

CASA Research 预计国内 SiC 汽车市场将以 30.6% 的复合年增长率增长，2020 年市场规模 15.8 亿元，到 2025 年将超过 45 亿元。预计国际 SiC 汽车市场将以 38.0% 的复合年增长率增长，到 2025 年将超过 100 亿元 (Yole 预计 SiC 汽车市场将以 38% 的复合年增长率增长，到 2025 年将超过 15 亿美元)。折算成晶圆，国内 2020 年新能源汽车市场 6 英寸 SiC 晶圆需求量超过 4 万片，预计到 2025 年需求量将增长到近 30 万片。国际 2020 年新能源汽车市场 6 英寸 SiC 晶圆需求量超过 5 万片，到 2025 年需求量超过 60 万片。

图表 32 新能源汽车市场 SiC 晶圆需求预测 (万片)



资料来源：CASA Research，华安证券研究所

- 光伏及轨道交通领域，碳化硅器件可大幅降低能耗，预计渗透率持续提升。

在光伏发电应用中，基于硅基器件的传统逆变器成本占系统 10%左右，却是系统能量损耗的主要来源之一。使用碳化硅 MOSFET 或碳化硅 MOSFET 与碳化硅 SBD 结合的功率模块的光伏逆变器，转换效率可从 96%提升至 99%以上，能量损耗降低 50%以上，设备循环寿命提升 50 倍，从而能够缩小系统体积、增加功率密度、延长器件使用寿命、降低生产成本。高效、高功率密度、高可靠和低成本是光伏逆变器的未来发展趋势。在组串式和集中式光伏逆变器中，碳化硅产品预计会逐渐替代硅基器件。

图表 33 西门子推出首款采用碳化硅晶体管的 155/165KW 组串型光伏逆变器



资料来源：索比光伏网，华安证券研究所

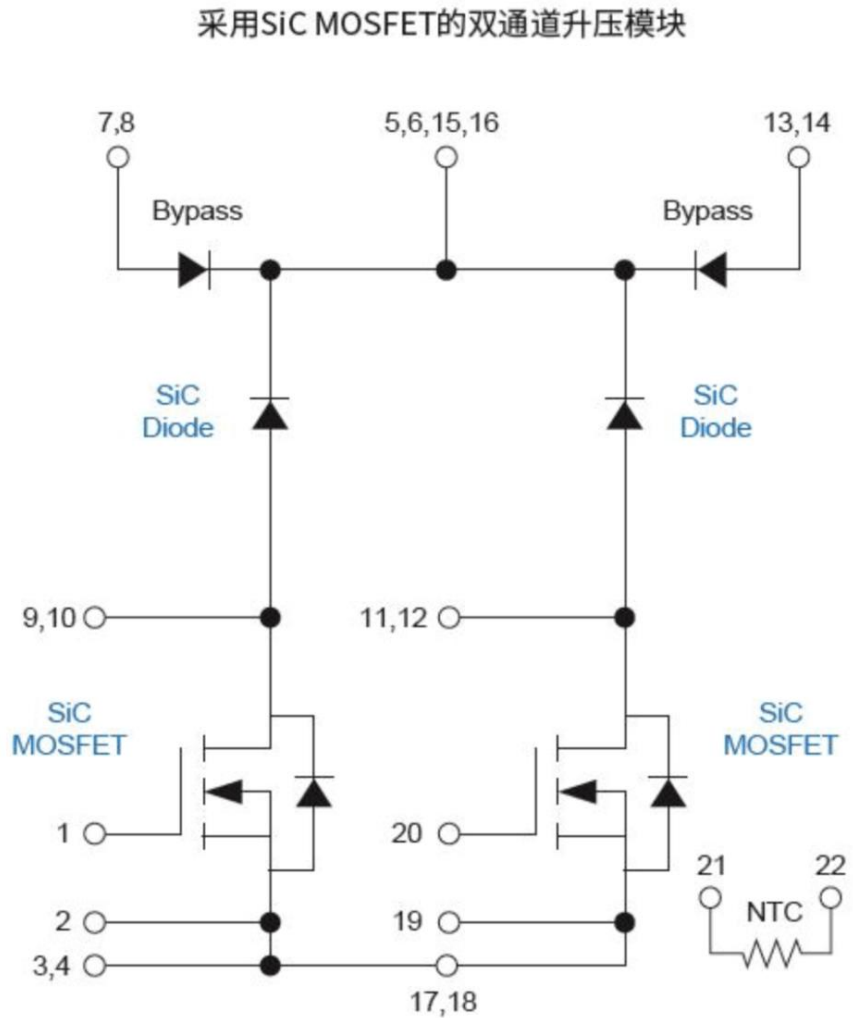
图表 34 中车株洲所自主研发的搭载全碳化硅牵引逆变器的列车



资料来源：腾讯新闻，华安证券研究所

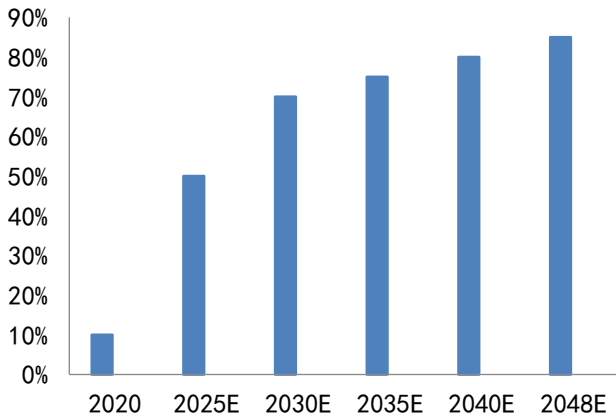
轨道交通车辆呈现多样化发展,从运行状态上可分为干线机车、城市轨道车辆、高速列车,其中城市轨道车辆和高速列车是轨道交通未来发展的主要动力。轨道交通车辆中大量应用功率半导体器件,其牵引变流器、辅助变流器、主辅一体变流器、电力电子变压器、电源充电机都有使用碳化硅器件的需求。其中,牵引变流器是机车大功率交流传动系统的核心装备,将碳化硅器件应用于轨道交通牵引变流器,能极大发挥碳化硅器件高温、高频和低损耗特性,提高牵引变流器装置效率,符合轨道交通大容量、轻量化和节能型牵引变流装置的应用需求,提升系统的整体效能。2014年,日本小田急电铁新型通勤车辆配备了三菱电机 3300V/1500A 全碳化硅功率模块逆变器,开关损耗降低 55%、体积和重量减少 65%,电能损耗降低 20%至 36%。

图表 35 引入 SiC 器件以提高太阳能升压电路的转换效率



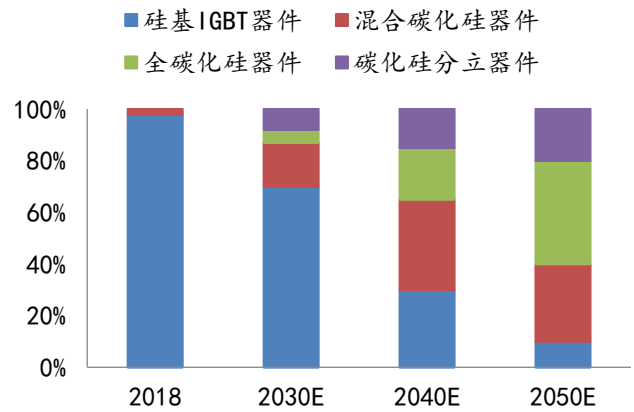
资料来源: 搜狐新闻, 华安证券研究所

图表 36 光伏逆变器中碳化硅功率器件占比预测



资料来源：天科合达招股说明书，华安证券研究所

图表 37 光伏逆变器中碳化硅功率器件占比预测



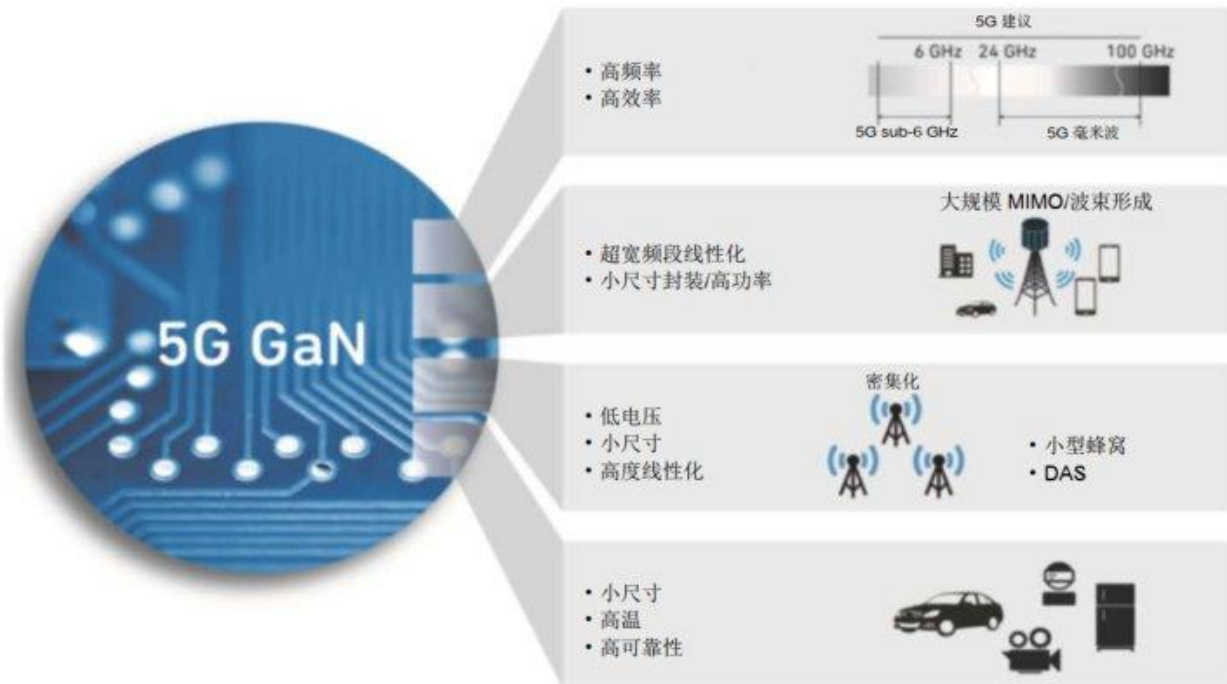
资料来源：天科合达招股说明书，华安证券研究所

(2) 射频器件领域，碳化硅的高导热性能能够满足 5G 通讯对高频性能和高功率处理能力的要求，2025 年市场规模将超百亿。

射频器件在无线通讯中扮演信号转换的角色，是无线通信设备的基础性零部件，主要包括功率放大器、滤波器、开关、低噪声放大器、双工器等。半绝缘型碳化硅衬底制备的氮化镓射频器件主要为面向通信基站以及雷达应用的功率放大器。目前主流的射频器件有砷化镓、硅基 LDMOS、碳化硅基氮化镓等不同类型。

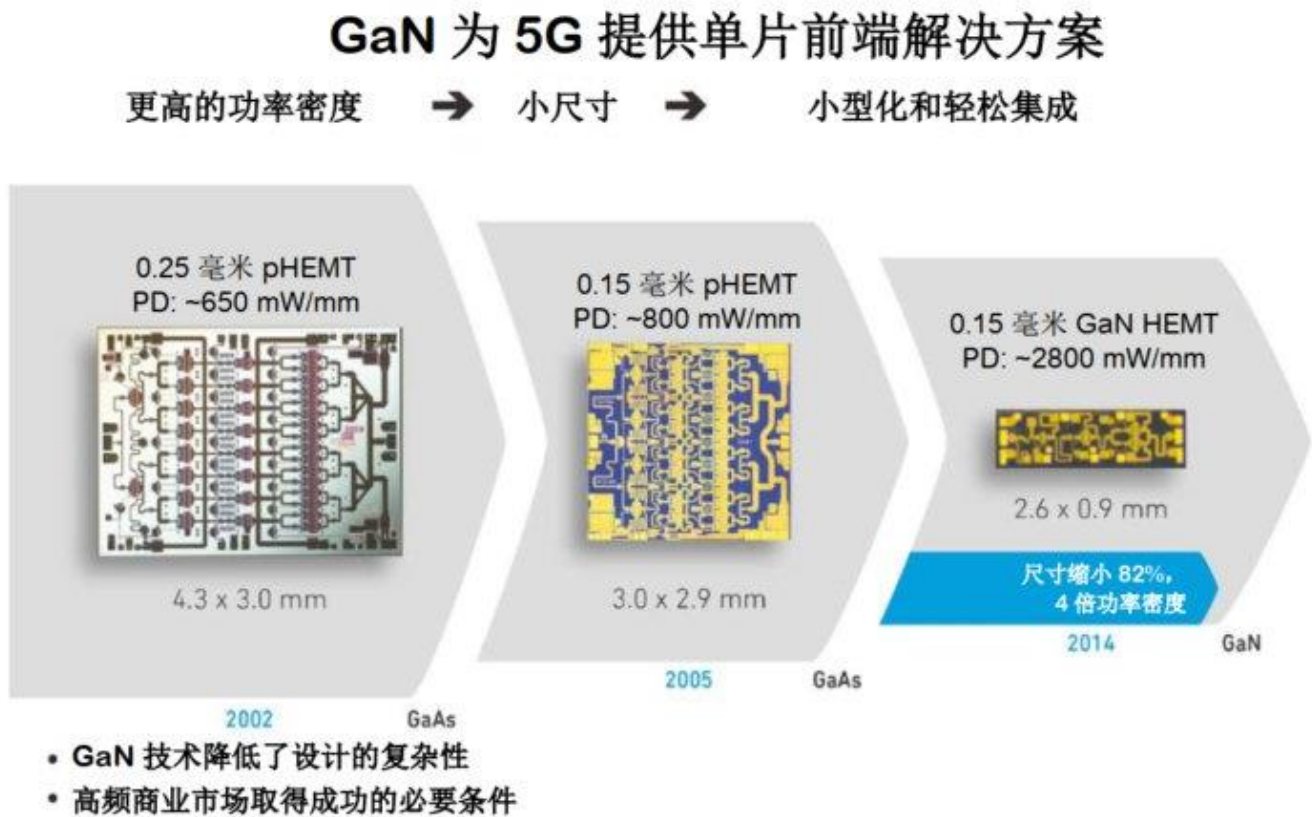
图表 38 使用氮化镓可以满足 5G 应用需求

使用 GaN 满足 5G 应用需求



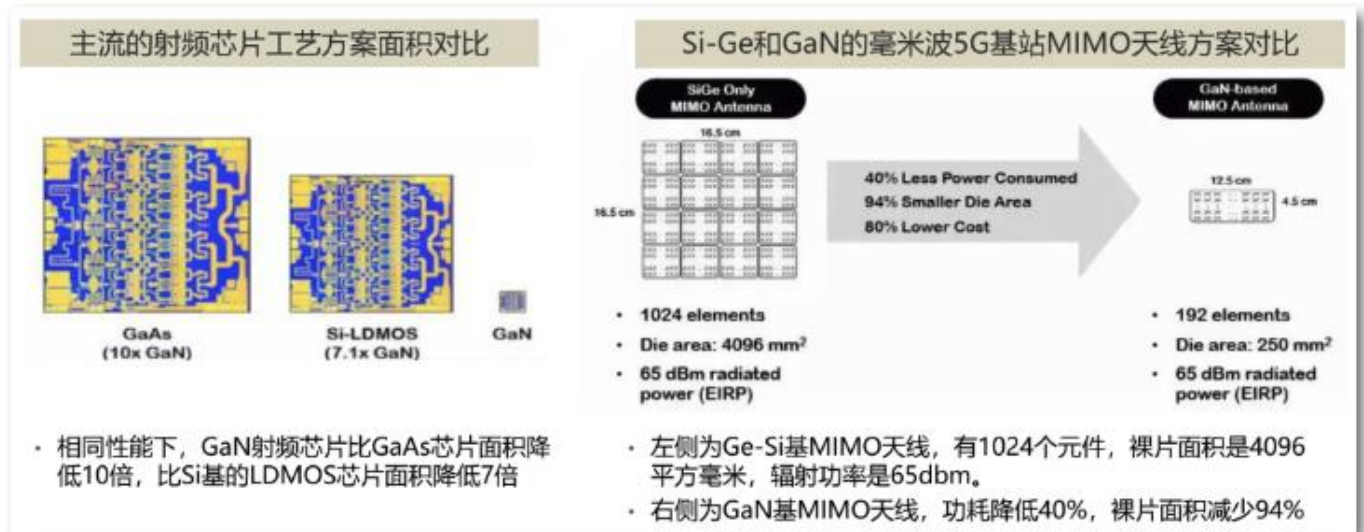
资料来源：电子头条网，华安证券研究所

图表 39 GaN 为 5G 提供单片前端解决方案



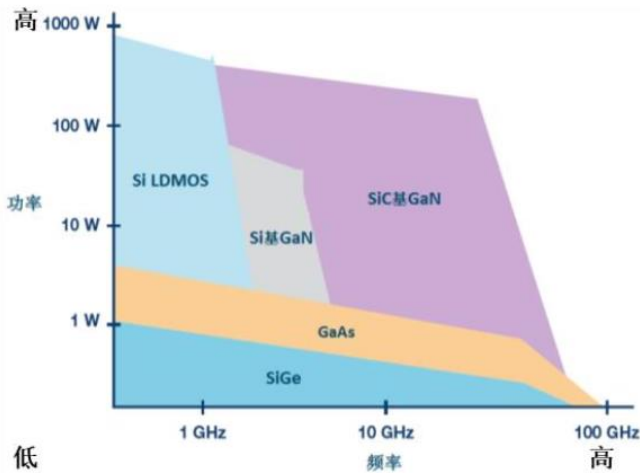
资料来源：面包板，华安证券研究所

图表 40 GaN 射频功率晶体管可作为新的固态能量微波源替代传统的 2.45GHz 磁控管

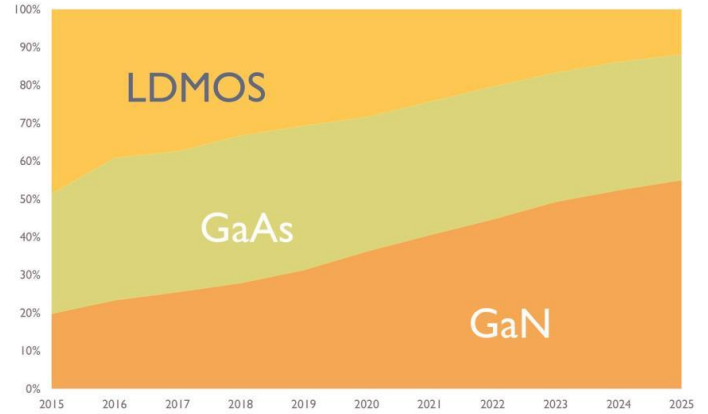


资料来源：得仪国际（贸易）公司官网，华安证券研究所

图表 41 不同类型射频器件在高频高功率下应用对比



图表 42 不同类型射频器件市场份额预测

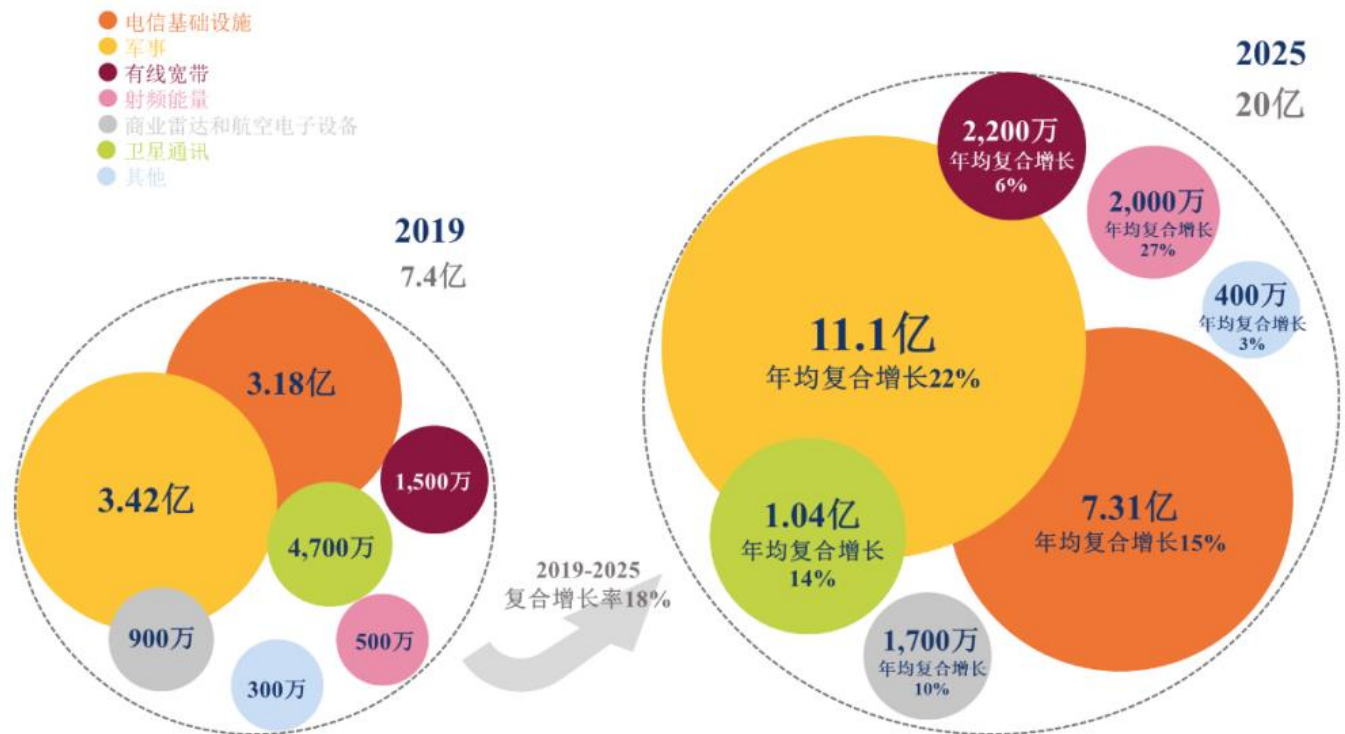


资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

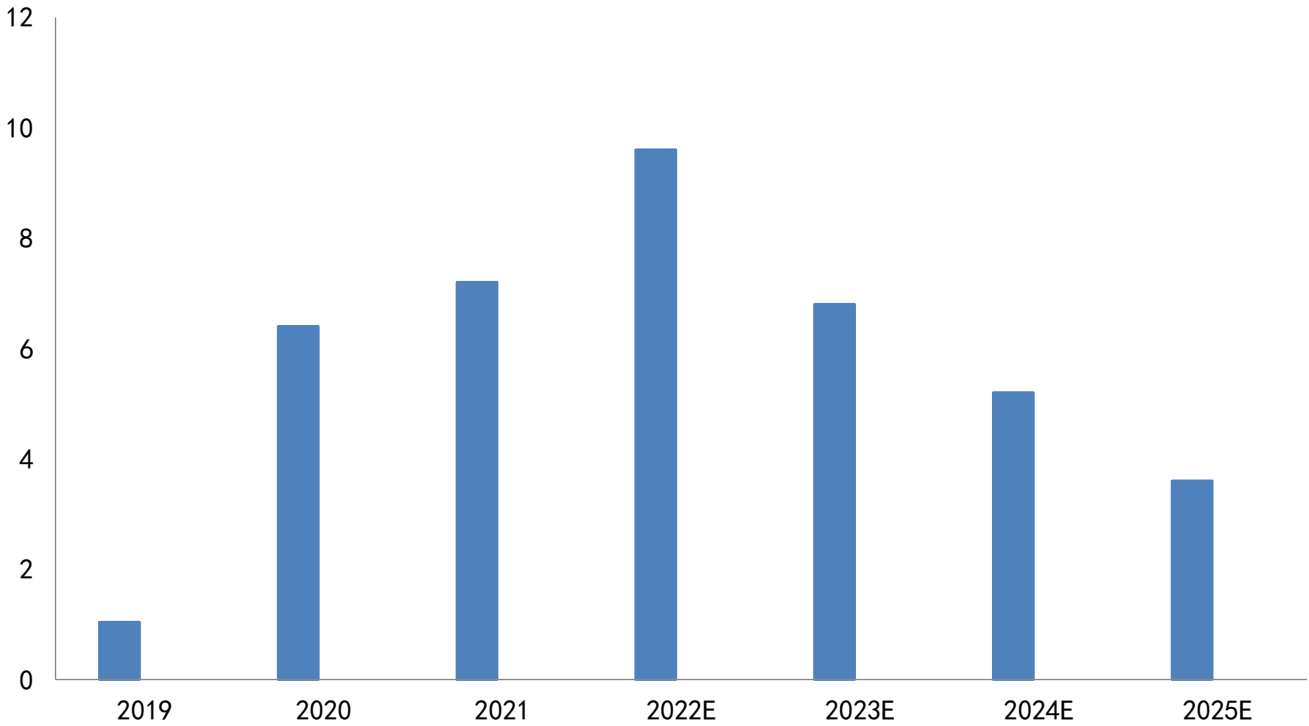
据 CASA Research 统计，2020 年国内 GaN 微波射频器件市场规模为 66.1 亿元，较上年同比增 57.2%。5G 基站建设是影响 GaN 微波射频器件市场规模变化的主要因素，预计 2022 年我国 5G 基站建设将达到高峰，带动国内 GaN 微波射频器件市场规模迅速扩张。而 2023 年以后，我国 5G 基站建设规模将有所回落，但 2023 年开始，毫米波基站将有望开始大规模部署，成为拉动市场的主要力量，带动国内 GaN 微波射频器件市场规模成倍数增长。

图表 43 全球碳化硅衬底氮化镓射频器件 2025 年市场规模将达 20 亿美金



资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

图表 44 我国 5G 宏基站 4 英寸 GaN 晶圆需求量 (万片)



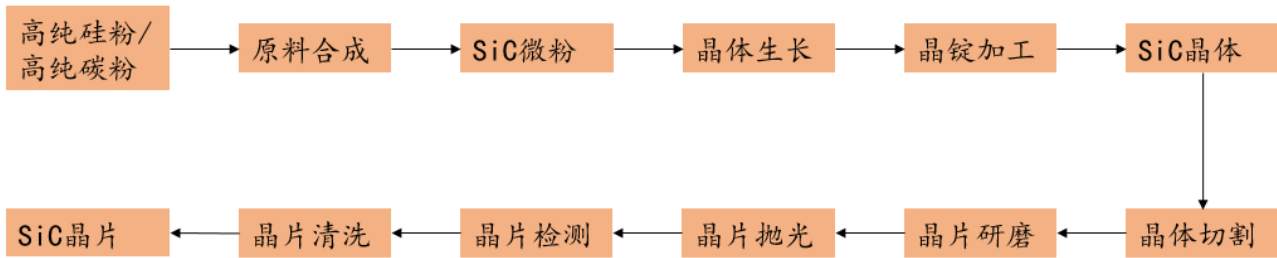
资料来源：CASA Research, 华安证券研究所

据公开数据显示，2020 年三大运营商宣布共完成 80 万站 5G 基站建设，2025 年前我国 5G 宏基站预计将建设超过 500 万站。国外 5G 基站建设情况慢于国内，截至 2020 年底，国外共完成 5G 基站建设 30-40 万站，未来几年建设总量将超过 300 万站。而未来几年，GaN 射频器件在 5G 基站市场渗透率逐步攀升到 70%。2020-2022 年是我国 5G 主频段部署高峰。2020 年我国 5G 宏基站 GaN PA 市场规模 73 亿元，到 2022 年市场规模接近 100 亿元，复合增长率达到 17.5%。2023 年毫米波基站将开始部署，预计 PA 市场规模将有 5-10 倍的增长需求。整体来看，5G 基站、微基站及毫米波基站带来的 GaN PA 市场规模将超过 1000 亿元。折算成晶圆来看，我国 5G 宏基站 4 英寸 GaN 晶圆总需求量约为 40 万片，2020 年需求量为 6.4 万片，2022 年需求量进一步增长至 10 万片。若毫米波基站开始部署，其 4 英寸 GaN 晶圆总需求量约为 200-400 万片。

2.3 价格及可靠性仍是扩大应用的难点

受制于碳化硅长晶速度、加工难度及缺陷密度，碳化硅的成本一直居高不下，其成本成为器件应用的难题。从最上游的碳粉、硅粉制备成碳化硅圆晶，在进行外延，最后制备成 SBD、MOSFET、IGBT 等器件，圆晶及外延是整个环节最关键的一环。他决定着上游原材料制备的方式及相关参数，同时也决定着下游器件的性能。

图表 45 碳化硅晶片制造流程



资料来源：山东天岳招股说明书，天科合达招股说明书，华安证券研究所

● 碳化硅衬底外延生长环节特点就是“慢”

碳化硅单晶方面主要存在三点难点：对温度和压力的控制要求高，其生长温度在 2300°C 以上；长晶速度慢，7 天的时间大约可生长 2cm 碳化硅晶棒；晶型要求高、良率低，只有少数几种晶体结构的单晶型碳化硅才可作为半导体材料。

图表 46 碳化硅晶体生长主流工艺比较

	物理气象传输/PVT	高温化学气相沉积/HTPVD	液相外延/LPE
装置示意图			
晶型	4H&6H	4H&6H	4H&6H
生长温度 (°C)	2200-2500	2200	1460-1800
生长速度 (mm/h)	0.2-0.4	0.3-1.0	0.5-2.0
优点	最成熟最常用	可持续的原料、可调整的参数、一体化的设备	类似提拉法
缺点	半绝缘制造困难、生长厚度受限、没有一体化设备	速率个缺陷控制	金属杂质、硅溶液碳的溶解度有限
主要厂商	Wolfspeed、贰陆、道康宁、Sicrystal、天岳、天科	Norstel、日本电装	住友等

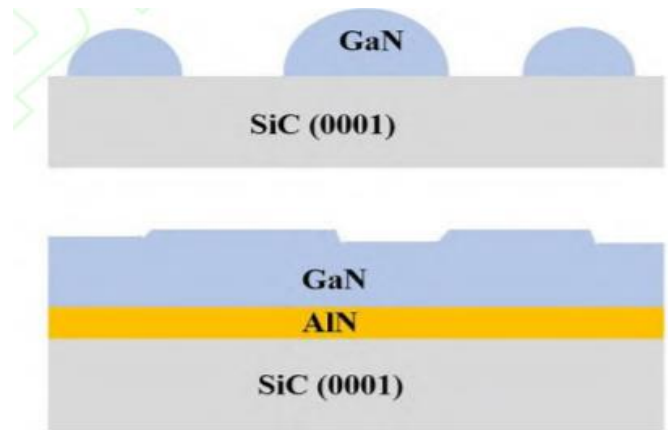
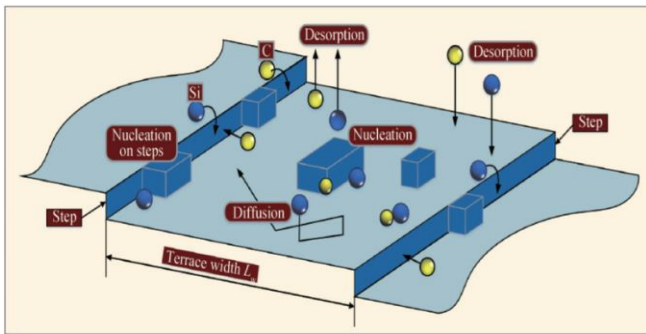
资料来源：行家说，华安证券研究所

目前商业的 SiC 晶圆的合成方法为 PVT 法。通过熔融状态或溶液状态结晶的方式可以制备出来大部分半导体单晶，但由于碳化硅自身性质的原因利用这两种方法无法生长出单晶。只有当压力 > 100GPa、温度 > 3200°C 时 C 和 Si 才能融化。而且当温度在 1412~2830°C 之间时，C 在融化的 Si 中溶解度仅为 0.01%~19%。当温度超过

1750°C时，通过在熔体里加入其它金属（Pr、Tb、Sc 等）作为助溶剂，C 的溶解度也仅能达到 50%，但此时会产生大量 Si 蒸汽，无法完成生长过程。另外，碳化硅晶片 中会混入大量金属助溶剂，不能用于制造半导体器件。直到 1955 年制备技术才有了突破性的进展，菲利普实验室的科学家们制备出了尺寸可控、质量较高的碳化硅单晶，其杂质浓度较低且可控，被称之为“Lely 法”。这种方法是在反应器中持续通入氩气，同时加热装满碳化硅颗粒的反应器到 2550°C，碳化硅在气相中成核并逐渐生长成晶体。这种方法的优点是：气相自发成核，产率高而且污染少。其缺点是：不能长出大尺寸的碳化硅单晶。

图表 47 碳化硅外延生长机理示意图

图表 48 GaN/SiC 及 GaN/AlN/SiC 外延生长模式示意图



资料来源：《碳化硅邻晶面外延生长机制的动力学蒙特卡罗模拟》，华安证券研究所

资料来源：《基于碳化硅衬底的宽禁带半导体外延》，华安证券研究所

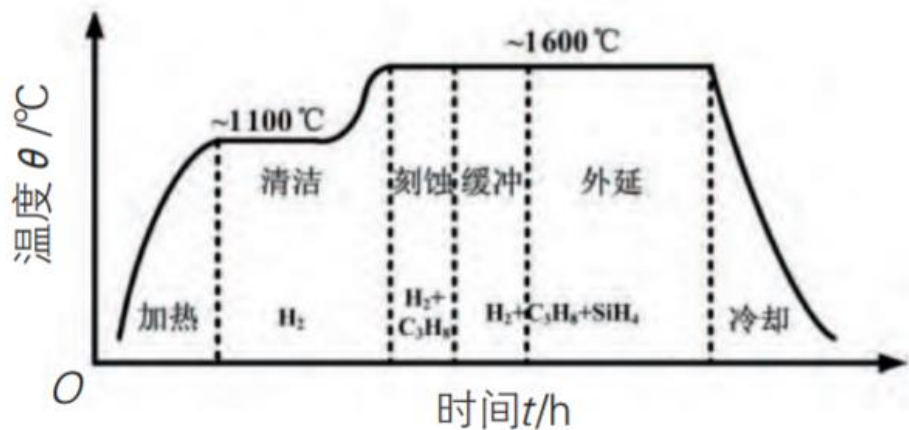
外延部分，有别于硅基器件，碳化硅器件不能直接制作在碳化硅单晶材料上，外延必不可少，当前 CVD 法制备是应用最为广泛的方式。制备 SiC 外延层我们熟知的方法有：液相外延法、分子束外延生长法、磁控溅射法、升华外延法、和 CVD 法等。其中，液相外延法、分子束外延生长法、CVD 法是制备半导体器件所需 SiC 外延层的方法中较为成熟的方法。对比以上三种方法，MBE 法制备的 SiC 外延层的质量最好，缺陷最少，但是生长速率较慢。在工业化生产方面考虑，由于 MBE 法和 LPE 法生长的速率比较小，无法满足工业化生长的需求，而 CVD 法的生长速率较高，满足条件。同时，CVD 法能够直接制备出复杂的半导体器件且 CVD 系统比较简单易操作，成本较低。

图表 49 SiC 器件不同电压对于 SiC 外延层厚度和掺杂浓度的要求

	外延层厚度 d/μm	氮原子掺杂浓度 n/(个·cm ⁻³)
600V 器件	4	1.0×10 ¹⁶
1200V 器件	12	8.0×10 ¹⁵
3300V 器件	55	2.3×10 ¹⁵
10kV 器件	100	8.0×10 ¹⁴

资料来源：《SiC 外延衬底研究现状及其应用前景》，华安证券研究所

图表 50SiC 外延生长基本工艺曲线



资料来源：《SiC 外延衬底研究现状及其应用前景》，华安证券研究所

- 液相外延法 (Liquid Phase Exptxy, LPE): 液相外延法是以低熔点金属为溶剂, 以待生长材料和掺杂剂为溶质, 其中溶质为饱和或过饱和状态。通过降温使得溶质在衬底上生长成一层材料, 实现晶体的外延层生长, 其中包括同质外延层和异质外延层。这种方法能生长磁性材料和半导体材料的晶体外延层, 广泛光电器件、磁泡器件和半导体激光器等。LPE 是一种相对较为简单的低廉的生长方法, 最初 SiC 外延层制备是在利用过饱和的溶解 C 和 Si 的熔融硅条件下发生的, 其中生长温度大约在 1650°C, 其中外延层的生长速度为 2-5um/h 左右。由于 SiC 和 C 都没有固定的熔点, 因此生长速率受 Si 的溶解度的影响。LPE 法的不足在于当外延层与衬底的晶格常数超过 1%, 制备的外延层表面均匀性较差, 持此之外, 由于分凝系数的差异, 除了生长较薄的涂层外, 在生长方向上生长和掺杂复合涂层的均匀性比较难, 没有气相外延法容易。
- 分子束外延生长法 (Molecular Beam Exptaxy, MBE): 分子束外延法是 50 年代用真空蒸发技术制备半导体薄膜发展而来的一种新的晶体生长技术, 方法为在超高真空的腔体和喷射炉 (也在腔体中) 中分别放置半导体衬底和源材料, 在这种条件下, 源材料蒸发为分子束的形式进行运输, 最后, 源材料在预热过的衬底上外延生成薄膜。随着超高真空技术发展, 由于分子束外延法开拓发展了很多超晶格器件, 拓展了半导体科学的新邻域。分子束外延法的优点是能够制备出超薄的半导体薄层, 其生长速率约为 0.15nm/min; 制备的外延层表面形貌好, 均匀性好且面积大; 可以制成不同结构或者不同掺杂剂的多层结构; 外延生长温度不高, 有利于提高外延层完整性和纯度; 利用元素之间的粘附性的差异能够制成化学配比好的化合物半导体薄膜。
- 法 (Chemical Vapor Deposition, CVD): 化学气相沉积法是将化学气相沉积体或者蒸汽在基质表面合成涂层或纳米材料的一种方法, 是在工业中应用较为广泛的沉积材料的一种技术, 包括大范围的绝缘材料, 大部分的金属材料, 和金属合金材料等。CVD 法制备 SiC 通常是以 C 或者 SiC 为基地, 在低压真空的条件下进行, 源气体通过载气运输到反应室当中, 随后在反应室中迅速热解成中间气体扩散到基底的表面, 被基底吸附后发生

一系列的非均相反应生成 Si 外延层。

图表 51 外延层三种方式优缺点对比

	液相外延法/LPE	分子束外延生长/MBE	化学气相沉积/CVD
优点	设备需求简单、成本较低	可在低生长温度下生长不同的晶型外延层	生长厚外延层时能够对生长速率精确控制
缺点	很难控制好外延层的表面形貌、设备不能同时外延多片晶圆限制批量生产	设备真空要求度高、成本高昂、生长外延层速率慢	外延层仍存在各种缺陷、外延生长工艺仍需不断优化

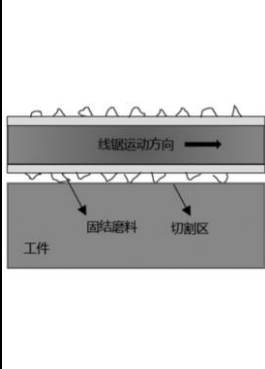
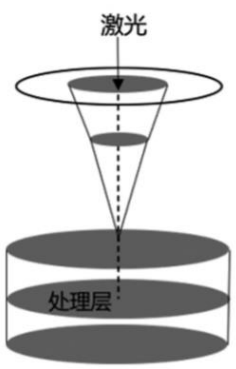
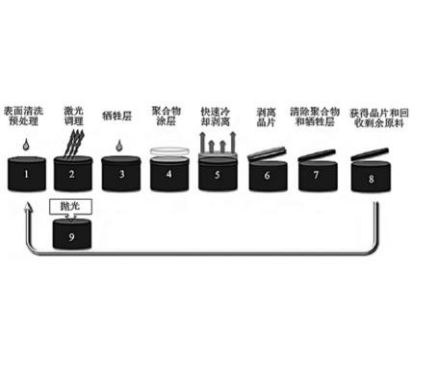
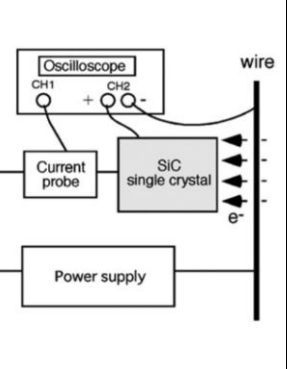
资料来源：启迪半导体官网，华安证券研究所

《SiC 外延衬底研究现状及其应用前景》一文指出，国内从事高速外延生长 SiC 厚膜研究的单位较少，鲜见 100 μm/h 以上外延速率工艺报道。随着国家节能减排任务的加重，采用高效、节能电子元器件将成为必然趋势，厚膜 SiC 外延层在高压输电、轨道交通、智能电网等领域将广泛使用，因此研究开发高速外延生长工艺对于国内经济发展的意义重大。

● 碳化硅衬底加工环节特点就是“难”

碳化硅单晶的加工过程主要分为切片、薄化和抛光。全球碳化硅制造加工技术和产业尚未成熟，在一定程度上限制了碳化硅器件市场的发展，要充分实现碳化硅衬底的优异性能，开发高表面质量碳化硅晶片加工技术是关键所在。

图表 52 不同切割工艺的性能对比

切割工艺	磨料切片	激光切割	冷分离	电火花
				
材料去除原理	磨料研磨	脉冲激光改性	激光改性	脉冲火花放电蚀除
切缝宽度/μm	180~250	<10	<10	~100
总厚度变化/μm	<30	~25	<1	<25

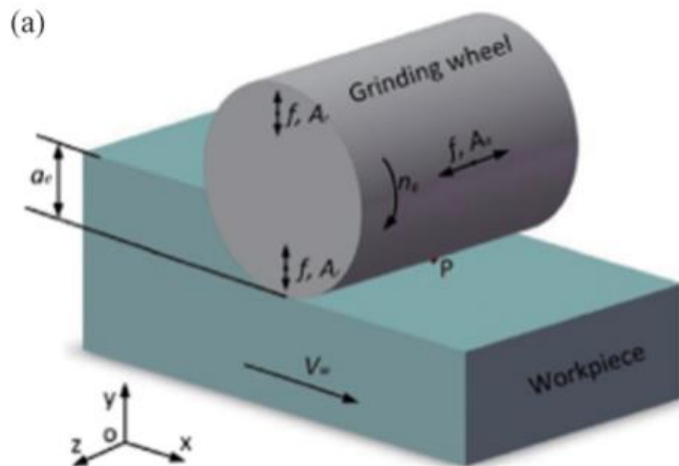
资料来源：《碳化硅单晶衬底加工技术现状及发展趋势》，华安证券研究所

切片是碳化硅单晶加工过程的第一道工序，切片的性能决定了后续薄化、抛光

的加工水平。切片加工易在晶片表面和亚表面产生裂纹，增加晶片的破片率和制造成本，因此控制晶片表层裂纹损伤，对推动碳化硅器件制造技术的发展具有重要意义。传统的锯切工具如内圆锯片、金刚石带锯，转弯半径受限，切缝较宽，出片率较低，不适用于碳化硅晶体切割。目前报道的碳化硅切片加工技术主要包括固结、游离磨料切片、激光切割、冷分离和电火花切片，其中往复式金刚石固结磨料多线切割是最常应用于加工碳化硅单晶的方法。

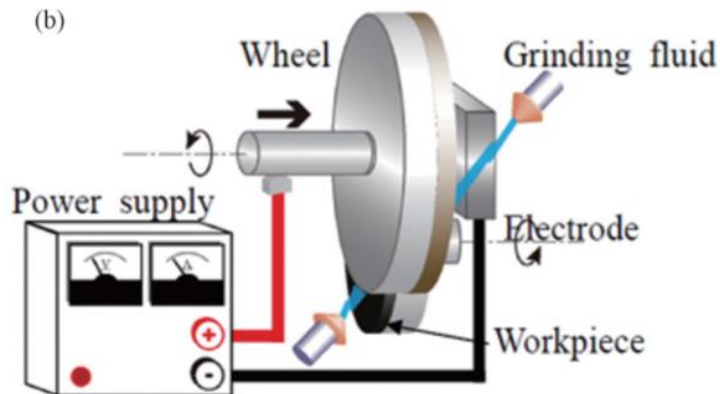
碳化硅断裂韧性较低，在薄化过程中易开裂，导致碳化硅晶片的减薄非常困难，为防止碎片，优化单面研磨技术是未来薄化加工大尺寸碳化硅晶片的主要技术发展趋势。碳化硅切片的薄化主要通过磨削与研磨实现。晶片磨削最具代表性的形式是自旋转磨削，晶片自旋转的同时，主轴机构带动砂轮旋转，同时砂轮向下进给，进而实现减薄过程。自旋转磨削虽可有效提高加工效率，但砂轮易随加工时间增加而钝化，使用寿命短且晶片易产生表面与亚表面损伤。加工缺陷的存在严重制约加工精度和效率，为了解决这些问题，目前主要的技术包括超声振动辅助磨削和在线电解修整辅助磨削。薄化工艺中晶片材料去除率和磨料粒径大小、密度、研磨盘转速、研磨压力等因素密切相关。

图表 53 超声振动辅助磨削



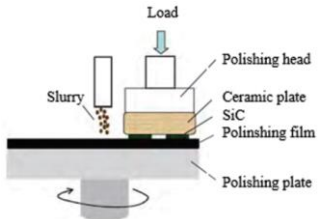
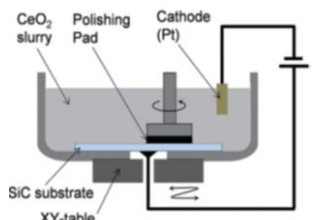
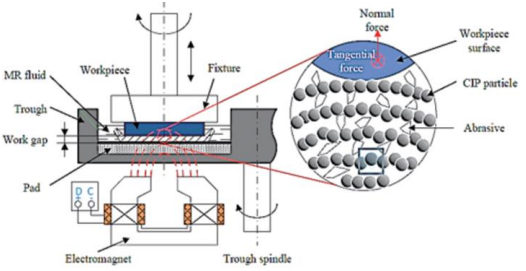
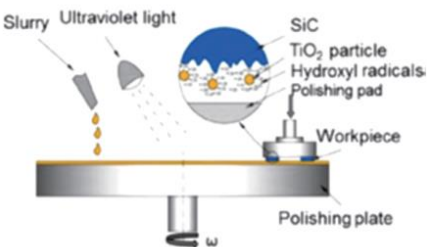
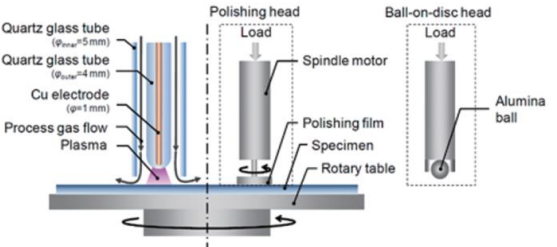
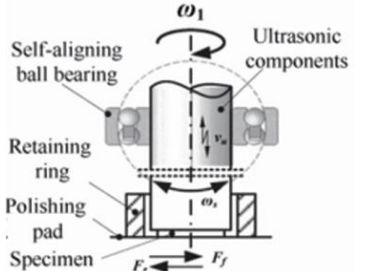
资料来源：《碳化硅单晶衬底加工技术现状及发展趋势》，华安证券研究所

图表 54 在线电解修整辅助磨削



资料来源：《碳化硅单晶衬底加工技术现状及发展趋势》，华安证券研究所

图表 55SiC 精抛工艺对比

工艺技术	抛光工艺原理示意	主要抛光条件	去除原理	加工效果
化学机械抛光 (CMP)		传统胶体二氧化硅磨料+氧化剂 H_2O_2	化学氧化+磨料磨损	MRR 0.1~0.2 $\mu m/h$
电化学机械抛光 (ECMP)		对金刚石磨料抛光后的晶片进行 ECMP, 磨料为 CeO_2	阳极的表面氧化+软磨料的机械抛光	MRR 3.62 $\mu m/h$
化学磁流变复合抛光 (CMRF)		磁流变液(主要成分羟基铁粉)+ $H_2O_2+Fe_3O_4+$ 金刚石磨料	化学腐蚀+磁流变抛光	MRR 5.31 $\mu m/h$
常压等离子体辅助磨料抛光 (PAP)		等离子体 ($He:H_2O=98:2$) + 氧化铈磨料	等离子体氧化+磨料磨损	MRR 0.185 $\mu m/h$
光催化辅助化学机械抛光 (PCMP)		紫外线+ SiO_2 磨料+ $TiO_2+(NaPO_3)_6+H_2O_2$ 氧化	紫外光催化腐蚀+磨料磨损	MRR 0.95 $\mu m/h$
超声辅助化学机械抛光 (UCMP)		超声+胶体二氧化硅磨料+多孔聚氨酯抛光垫 $+H_2O_2$	超声振动+化学氧化+磨料磨损	MRR 1.057 $\mu m/h$

资料来源:《碳化硅单晶衬底加工技术现状及发展趋势》, 华安证券研究所

碳化硅晶片的抛光工艺可分为粗抛和精抛，粗抛为机械抛光，目的在于提高抛光的加工效率。碳化硅单晶衬底机械抛光的关键研究方向在于优化工艺参数，改善晶片表面粗糙度，提高材料去除率。精抛为单面抛光，化学机械抛光是应用最为广泛的抛光技术，通过化学腐蚀和机械磨损协同作用，实现材料表面去除及平坦化。晶片在抛光液的作用下发生氧化反应，生成的软化层在磨粒机械作用下相对容易被除去。作为单晶衬底加工的最后一道工序，化学机械抛光是实现碳化硅衬底全局平坦化的常用方法，也是保证被加工表面实现超光滑、无缺陷损伤的关键工艺。

图表 56 碳化硅单晶抛光片加工标准

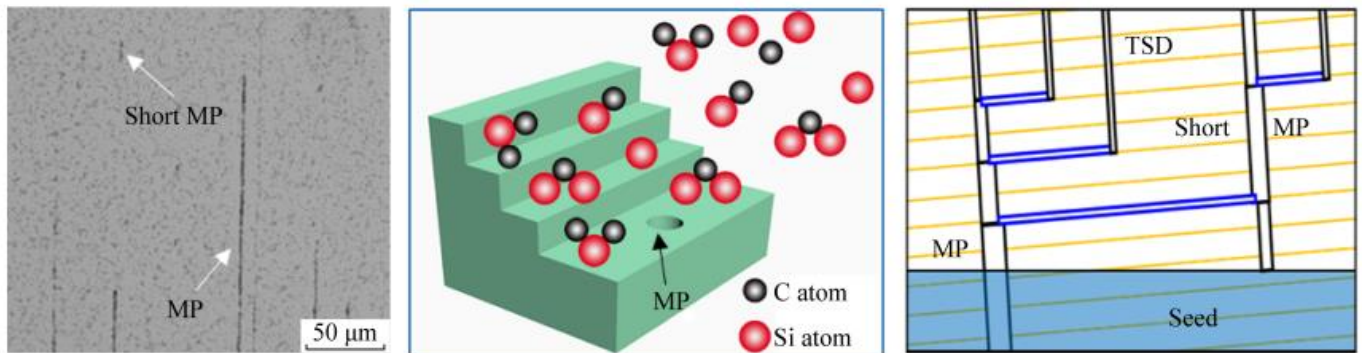
指标	要求
总厚度变化	≤25 μm
绝对弯曲度	≤45 μm
翘曲度	≤35 μm
表面粗糙度	<0.5 nm (10×10 μm)

资料来源：《碳化硅单晶衬底加工技术现状及发展趋势》，华安证券研究所

● 碳化硅缺陷密度去除工艺壁垒“高”

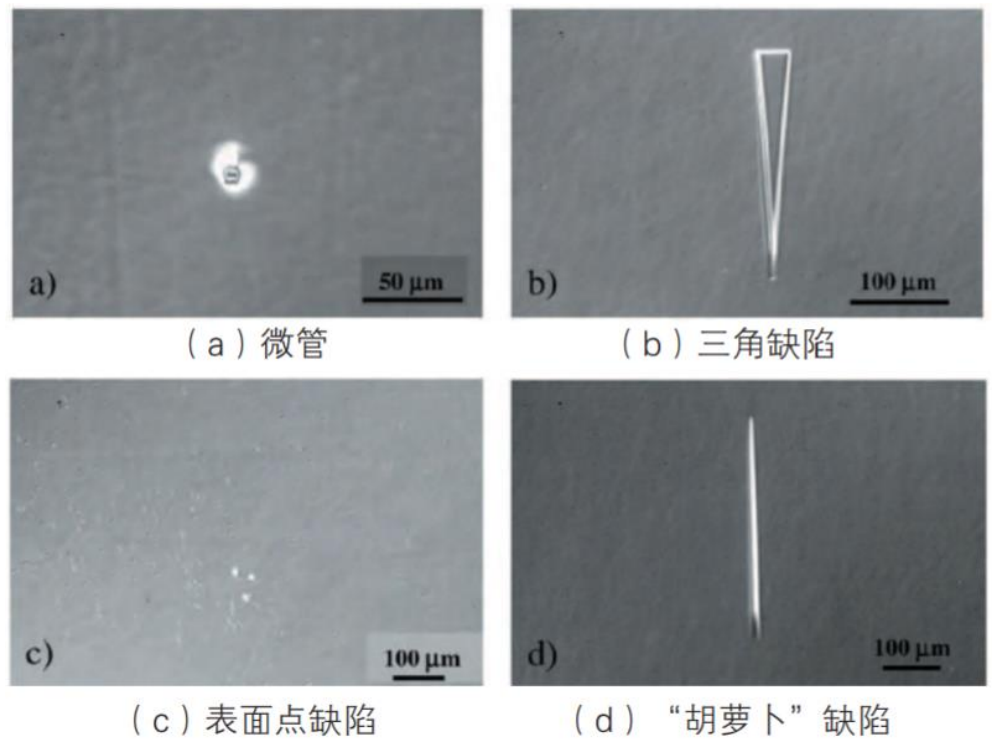
碳化硅单晶生长热场存在温度梯度，导致晶体生长过程中存在原生内应力及由此诱生的位错、层错等缺陷，其可靠性备受关注。在密闭高温腔体内进行原子有序排列并完成晶体生长、同时控制微管密度、位错密度、电阻率、翘曲度、表面粗糙度等参数指标是复杂的系统工程，涉及一系列高难度工艺调控，工艺壁垒高。

图表 57 SiC 单晶中微管闭合及短微管形成的图片和示意图



资料来源：《无微管缺陷六英寸 SiC 单晶的制备》，华安证券研究所

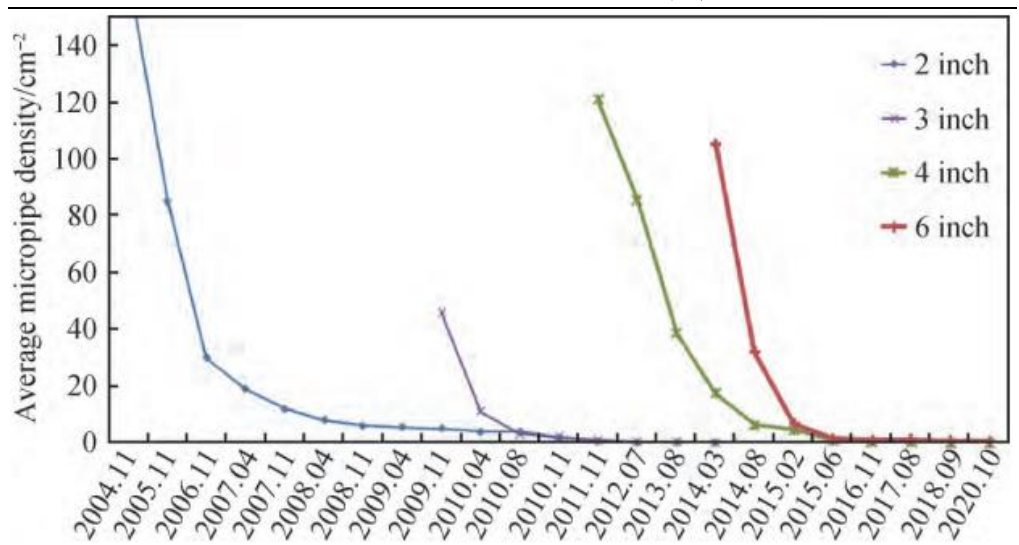
图表 58 4H-SiC 单晶外延过程中常见的几种缺陷



资料来源：《SiC 外延衬底研究现状及其应用前景》，华安证券研究所

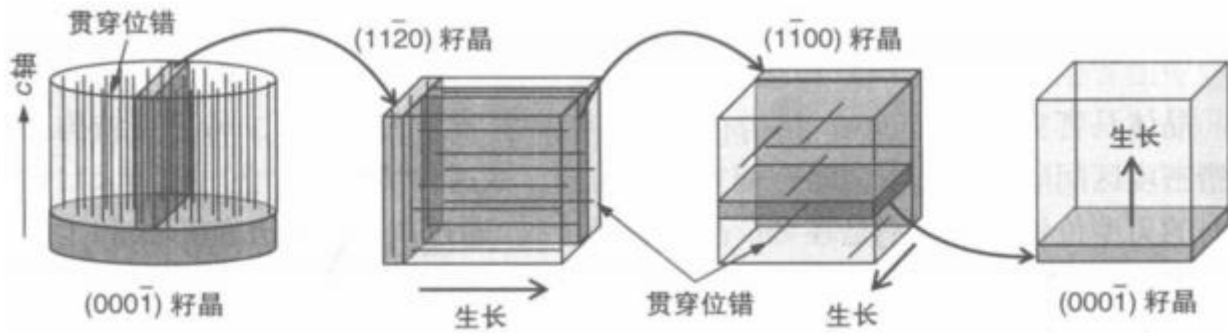
对于微管缺陷，2010 年以前研究工作比较多。现阶段研发和商用的 SiC 衬底微管密度都得到了有效控制，根据《半绝缘碳化硅单晶衬底的研究进展》一文数据，现阶段 SiC 衬底中位错密度的典型值为 $10^3 \sim 10^4 / \text{cm}^2$ 。当前减少 SiC 晶锭扩展缺陷的最显著技术是“重复 a 面生长法”，暨准备一个几乎为零位错的籽晶，随后在稳定条件下在这个高质量的籽晶上进行升华法生长。

图表 59 2 英寸、3 英寸、4 英寸和 6 英寸微管密度逐年降低



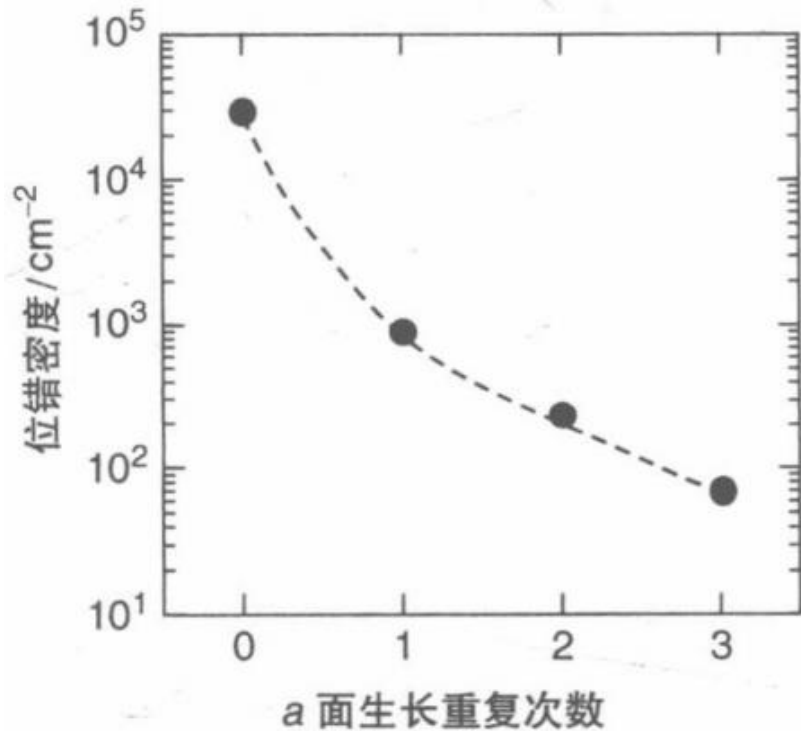
资料来源：《半绝缘碳化硅单晶衬底的研究进展》，华安证券研究所

图表 60 碳化硅晶圆重复 a 面工艺示意图



资料来源：《碳化硅技术基本原理》，华安证券研究所

图表 61 碳化硅晶圆总位错密度与 a 面生长阶段数间的关系

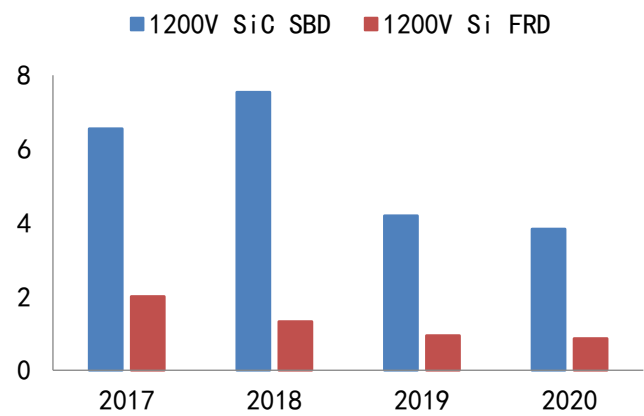
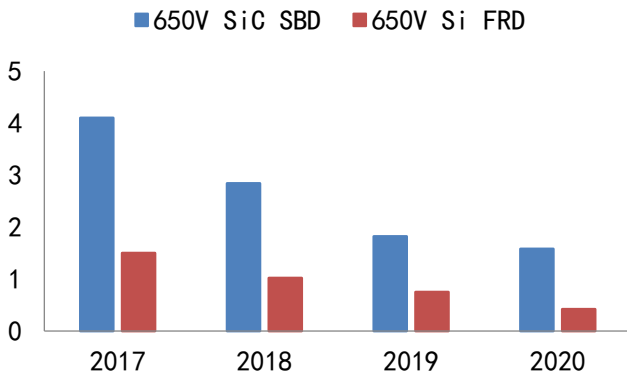


资料来源：《碳化硅技术基本原理》，华安证券研究所

价格方面，根据 CASA 数据，2020 年 SiC 电力电子器件价格进一步下降，与同类型 Si 器件价差缩小。从全年来看，上半年价格基本持平，而下半年价格下降，但随着经济逐步恢复，年底产品供货周期延长，价格稍有上涨。SiC SBD 产品价格略有下降，降幅较前两年有所收窄。据 Mouser 数据显示，公开报价方面，650V 的 SiC SBD 2020 年底的平均价格是 1.58 元/A，较 2019 年底下降了 13.2%，与 Si 器件的价差在 3.8 倍左右。1200V 的 SiCSBD 的平均价是 3.83 元/A，较 2019 年下降了 8.6%，与 Si 器件的差距在 4.5 倍左右。据 CASA Research 调研，实际成交价低于公开报价。650V 的 SiC SBD 的实际成交价格约 0.7 元/A，1200V 的 SiC SBD 价格约 1.2 元/A，基本约为公开报价的 60%-70%，较上年下降了 20%-30%，实际成交价与 Si 器件价差已经缩小至 2-2.5 倍之间。

图表 62 2017-2020 年 650V 的 SiC SBD 价格 (元/A)

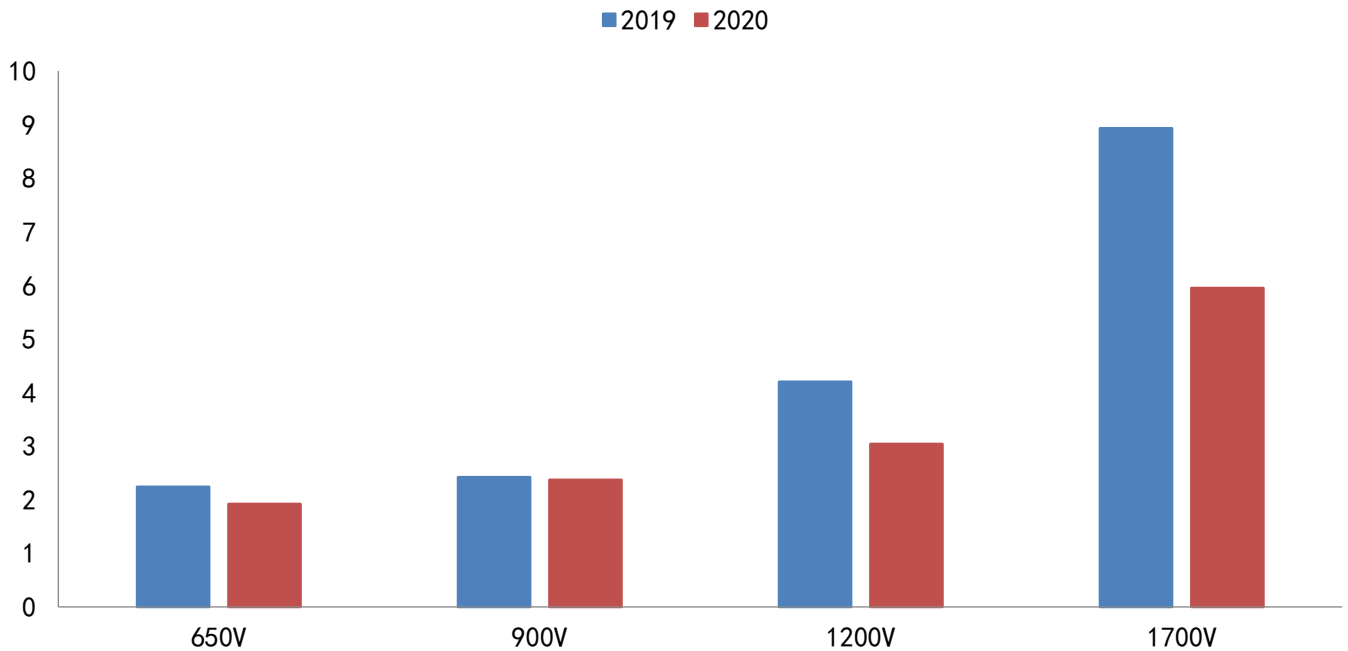
图表 63 2017-2020 年 1200V 的 SiC SBD 价格 (元/A)



资料来源: Mouser, Digi-Key, CASA Research, 华安证券研究所

资料来源: Mouser, Digi-Key, CASA Research, 华安证券研究所

图表 64 SiC MOSFET 2020 年平均价格 (元/A)



资料来源: Mouser, Digi-Key, CASA Research, 华安证券研究所

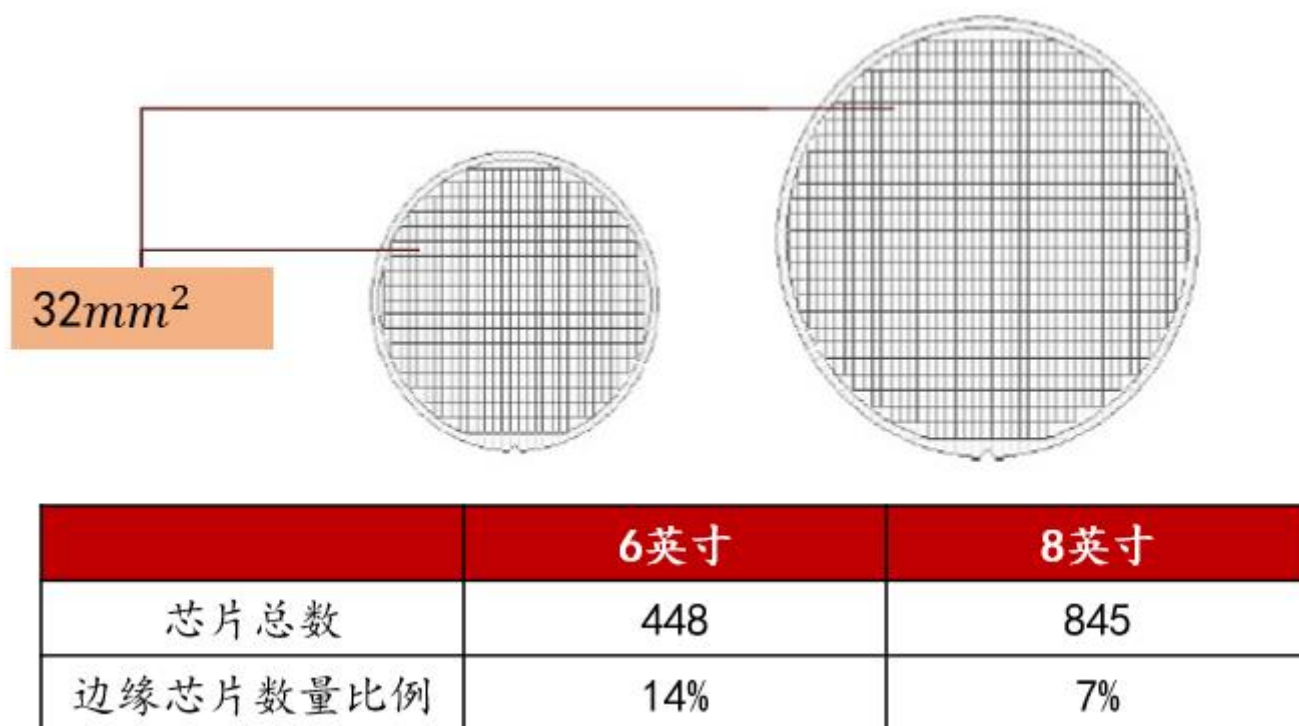
SiC MOSFET 价格下降幅度达 30%-40%，与 Si 器件价差收窄到 2.5-3 倍之间。整体来看，国产器件价格低于进口价格 15%左右。据 Mouser 数据显示，公开报价方面，650V SiC MOSFET 在 2020 年底的平均价格约 1.92 元/A，900V 的器件平均价格为 2.37 元/A，1200V 器件平均价格为 3.04 元/A，1700V 器件的平均价格为 5.95 元/A，与去年相比均处于下降趋势。而从实际成交价格来看，650V 的 SiC MOSFET 价格 0.9 元/A，1200V 的 SiC MOSFET 价格 1.4 元/A，较 2019 年下降幅度达 30%-40%，与 Si 器件价也缩小至 2.5-3 倍之间。

对于降低成本，从市场上的动态来看，主要有扩大晶圆尺寸、改进碳化硅长晶工艺及改进切片工艺等三个方向。

● 扩大晶圆尺寸

根据 Wolfspeed 最新资料，从 6 寸转向 8 寸晶圆，碳化硅芯片（ 32mm^2 ）数量有望从 448 颗增加到 845 颗，增加了 75%。8 英寸 SiC 衬底的基面和螺纹螺钉密度分别为 684cm^{-2} 和 289cm^{-2} 。化学机械抛光后，表面质量得到改善，有 66 个缺陷。碳化硅外延可以实现略高于 1% 的厚度和掺杂均匀性。根据 GTAT 公司的预估，相对于 6 寸晶圆平台，预计 8 寸衬底的引入将使整体碳化硅器件成本降低 20-35%。而且，6 寸 SiC 晶体厚度为 350 微米，而最初投放市场的 8 寸 SiC 衬底厚度为 500 微米。尽管晶体成本会略微上涨，但是由于更厚的晶体可以切除更多的衬底片，预计也有望进一步降低器件生产成本。

图表 65Wolfspeed 晶圆尺寸增加芯片数量从而降低成本

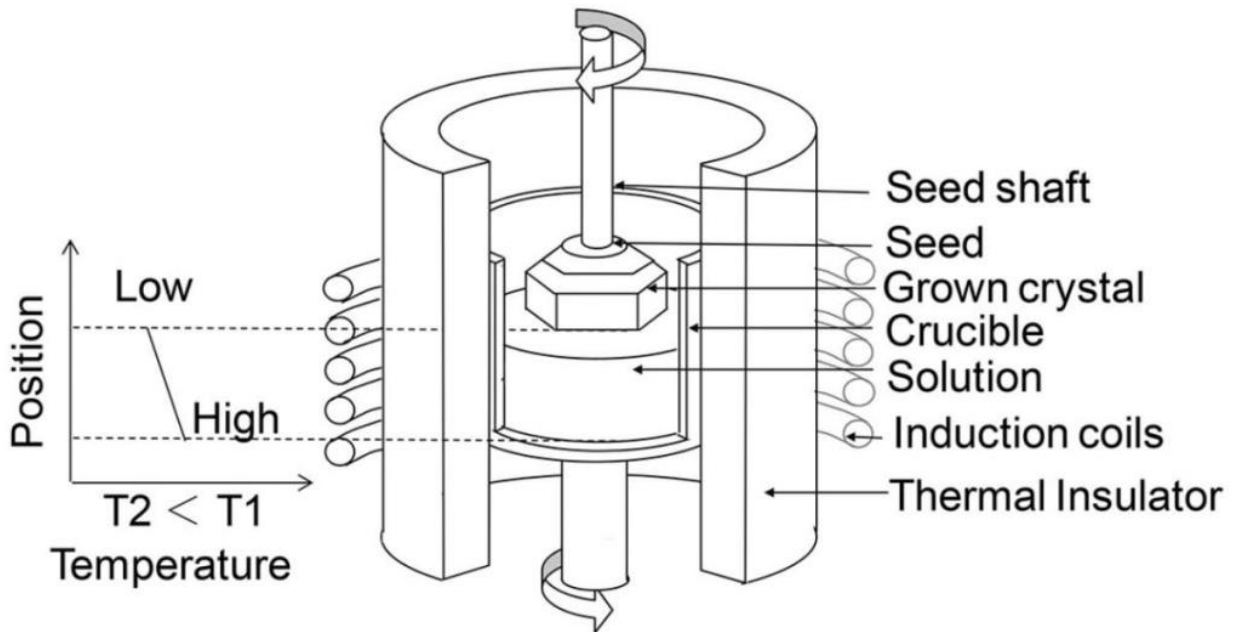


资料来源：Wolfspeed 官网，华安证券研究所

● 改进碳化硅长晶技术提升长晶速度

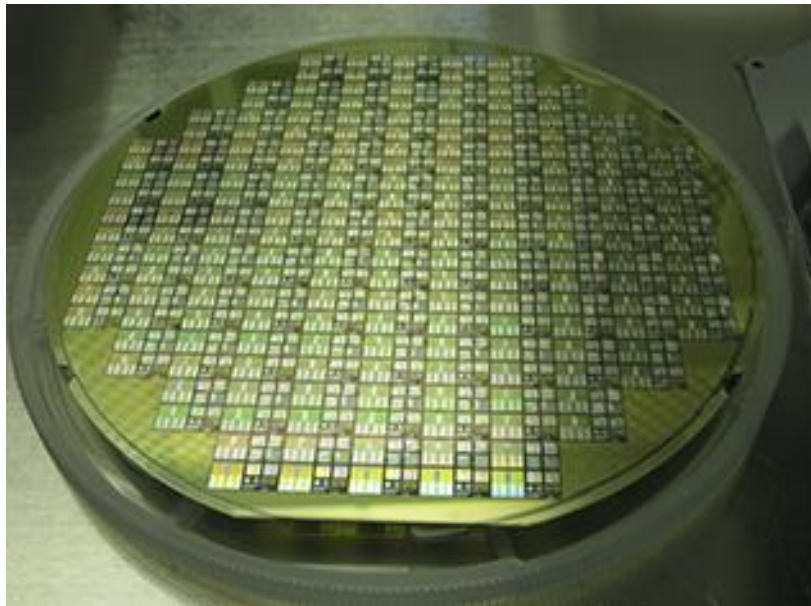
2021 年 8 月 5 日，住友官网提到了他们利用一种所谓的 MPZ 技术，生长了高质量、低成本的 SiC 衬底和 SiC 外延片，消除了表面缺陷和基面位错 (BPD)，无缺陷区 (DFA) 达到 99%，相比 PVT 法，SiC 长晶速度提高了 5 倍左右，相比普通的 LPE 法速度提升了 200 倍。

图表 66 住友 MPZ (多参数和区域控制) 溶液生长技术



资料来源：住友官网，华安证券研究所

图表 67 住友 6 英寸 EpiEra 所构成的器件



资料来源：住友官网，华安证券研究所

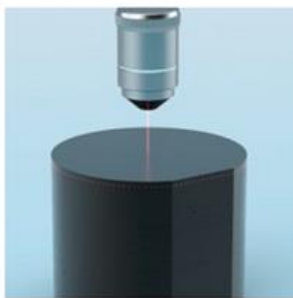
● Cold Split 技术分割碳化硅晶圆，从而使得单个晶圆的芯片数量翻倍

2018 年 11 月 12 日，英飞凌科技股份有限公司收购了位于德累斯顿的初创公司 Siltecta GmbH。该初创公司开发了一种创新技术 (Cold Split)，可有效处理晶体材料，同时最大限度地减少材料损耗。与普通锯切割技术相比，Siltecta 开发出了一种分解晶体材料的新技术，能够将材料损耗降到技术。该技术同样适用于碳化硅 SiC，并将在其现有的德累斯顿工厂、以及英飞凌 (奥地利) 菲拉赫工厂实现工业化生产。

2015 年，Siltecta 冷切割技术同时获得了“红鲱鱼”欧洲前 100 和世界前 100

技术研究大奖，同年，被欧洲半导创新谷评为 2015 年最佳创业路演项目。冷切割技术是迄今为止第一也是唯一能在半导体级实现 20 到 200 微米厚度无损切割的技术。凭借着全能的特性，冷切割技术能完美运用于硅片切割和研磨市场。因此，此项技术的潜能也只受限于硅片切割和研磨市场的大小。Sillectra 称其知识产权组合现在由 70 个专利族组成，总共拥有 200 项专利。这些专利的组合涵盖了与该公司基于激光的晶圆薄化工艺相关的每项创新。据 Sillectra 称，其冷分裂技术在几分钟内就可以以极高的精度将晶圆薄到 100 微米及以下，并且几乎没有材料损失。

图表 68Cool Split 技术切割晶圆的步骤



I. Our patented laser procedure prepares a defined layer within the material for splitting.



II. The material is then coated with our custom designed polymer.



III. The system then induces the right amount of stress through controlled cooling, to precisely split the material along the laser-conditioned layer.



IV. Finally, the base material has the polymer film removed with standard wet-chemical cleaning and the base material is ground in preparation for the next split.

资料来源：Sillectra 官网，华安证券研究所

图表 69Cool Split 技术切割出的晶圆

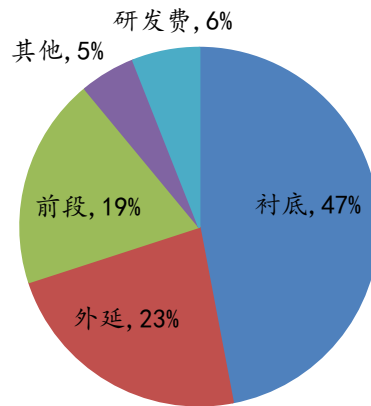


资料来源：Sillectra 官网，华安证券研究所

2.4 衬底及外延成未来弯道超车的關鍵

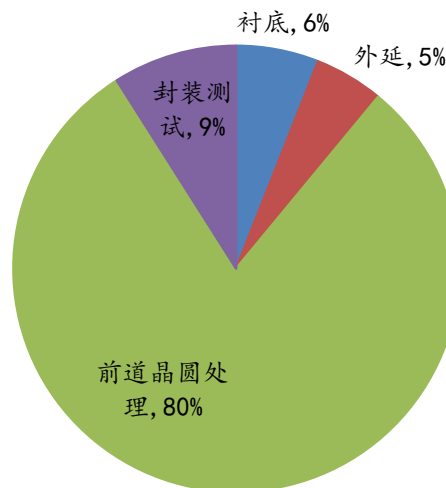
根据 CASA Research 数据，衬底成本占器件总成本的 47%，外延成本占器件总成本的 23%，二者合计约 70%，为碳化硅器件成型流程最具投资价值的环节。SiC 产业链包括上游的衬底和外延环节、中游的器件和模块制造环节，以及下游的应用环节。衬底价值量占比为 47%，为最核心的环节，外延价值量占比为 23%，器件制造（包括设计+制造+封装）价值量占比约为 20%。相较之下，12 寸硅片的衬底与外延价值总计约占 11%，因而碳化硅领域衬底及外延更具投资价值。

图表 70 2020 年碳化硅功率半器件价值拆分



资料来源：CASA，华安证券研究所

图表 71 2020 年 12 寸硅功率器件价值拆分



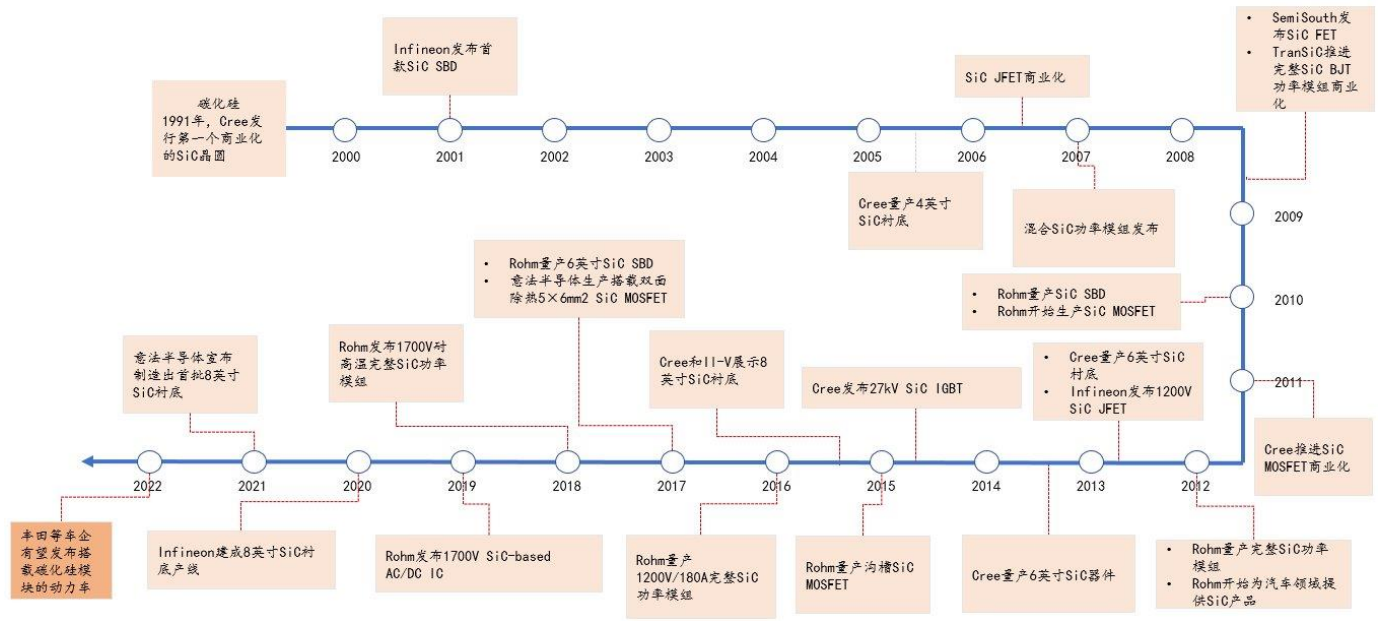
资料来源：未来智库，华安证券研究所

从海内外公司业务布局及专利布局来看，海外公司较国内公司略早，但差距不大。

- 业务布局方面，Wolfspeed 公司是率先实现碳化硅晶圆商业化的公司。目前碳化硅衬底市场以海外厂商为主导，国内企业市场份额较小。碳化硅衬底

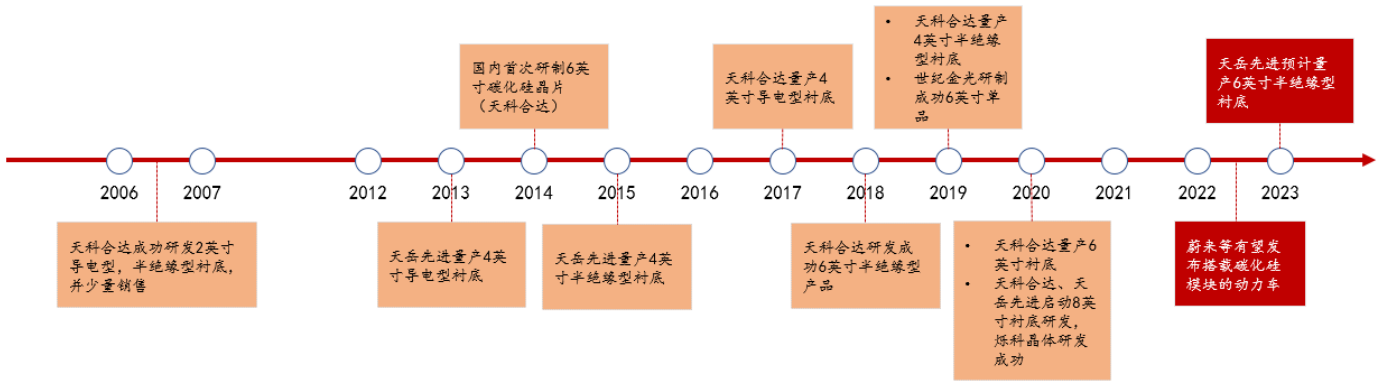
产品的制造涉及设备研制、原料合成、晶体生长、晶体切割、晶片加工、清洗检测等诸多环节，需要长期的工艺技术积累，存在较高的技术及人才壁垒。国际巨头半导体公司研发早于国内公司数十年，但行业整体处于产业化初期，受益于中国5G通讯、新能源等新兴产业的技术水平、产业化规模的世界领先地位，国内碳化硅器件巨大的应用市场空间驱动上游半导体行业快速发展，国内碳化硅厂商有望迎头赶上。

图表 72 海外企业碳化硅领域布局时间线



资料来源：各公司官网，华安证券研究所

图表 73 国内企业碳化硅领域布局时间线



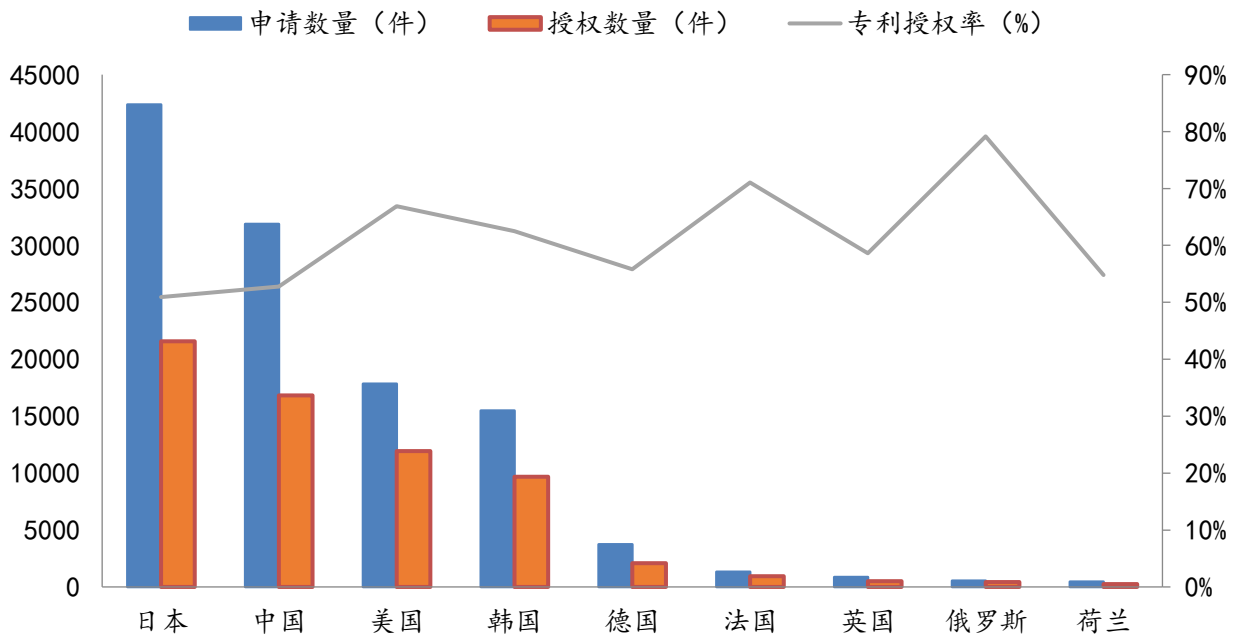
资料来源：各公司官网，华安证券研究所

● 专利布局方面，中国仅落后日本

《第三代半导体器件专利分析》一文梳理了全球第三代半导体器件相关专利的受理地包 57 个国家、地区和组织，并对排名前十的国家、地区和组织第三代半导体器件相关专利申请数量、授权数量与授权比例进行了统计。结果显示第三代半导体器件相关专利主要受理地区为日本、美国、中国、韩国、欧洲专利局德国、英国、法

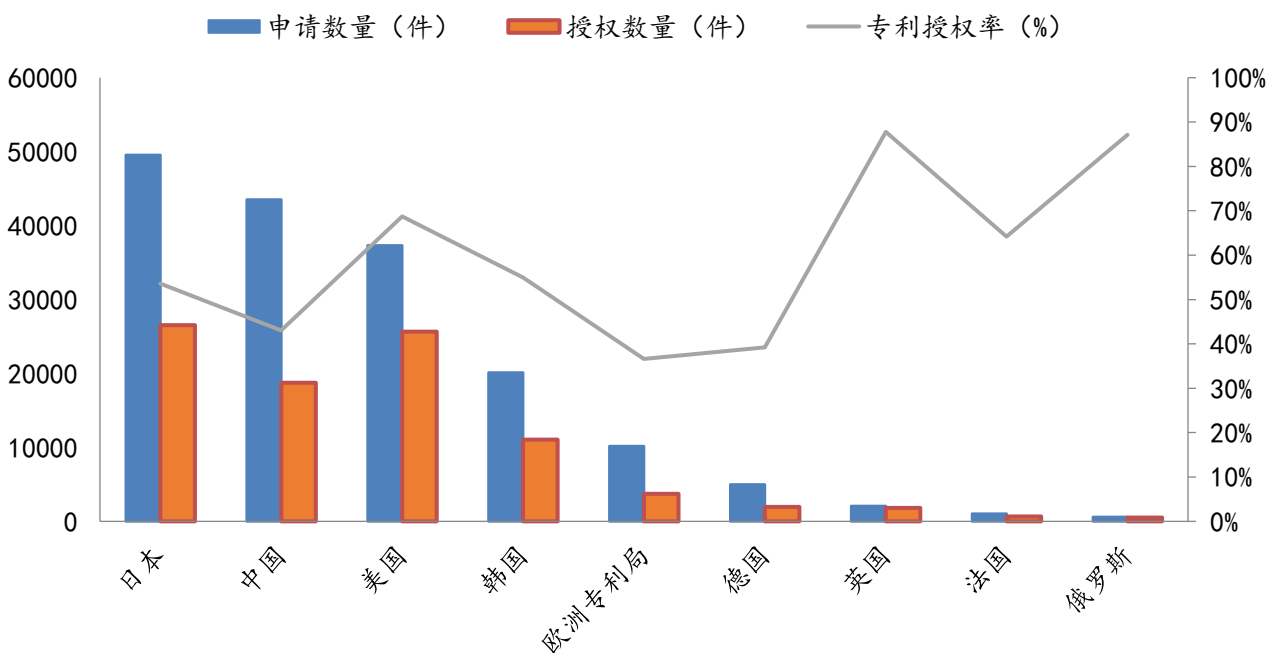
国和俄罗斯。日本、中国、美国和韩国仍然是最大的专利受理地，表明这四个国家也是全球主要的第三代半导体器件的主要市场。

图表 74 排名前十的第三代半导体器件相关专利来源地申请数量、授权数量与授权比



资料来源：《第三代半导体器件专利分析》，华安证券研究所

图表 75 排名前十的第三代半导体器件相关专利受理地申请数量、授权数量与授权比



资料来源：《第三代半导体器件专利分析》，华安证券研究所

图表 76 中国第三代半导体器件专利申请排名前十机构

序号	机构英文名	机构中文名	申请量/件	授权量/件
1	Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. Ltd.	台积电	1424	1149
2	Chinese Academy of Sciences	中国科学院	1394	713
3	Semiconductor Manufacturing International Corporation	中芯国际	915	543
4	EPISTAR Corporation	晶元光电	800	640
5	BOE Technology Group Co., Ltd.	京东方	648	362
6	United Microelectronics Corp.	联华电子	593	417
7	Industrial Technology Research Institute	工业技术研究院	489	342
8	Xidian University	西安电子科技大学	487	215
9	AU Optronics Corporation	友达光电	477	342
10	Sanan Optoelectronics Co., Ltd.	三安光电	283	209

资料来源：《第三代半导体器件专利分析》，华安证券研究所

我们认为从三个角度可以看出，国内晶圆及外延环节企业已经追赶上了海外厂商，并在未来极有可能实现弯道超车。

(1) 利润跨过盈亏平衡点，国内部分产品市占率已经跻身国际第一梯队

经营体量上，选取衬底及外延领域中海外科锐公司、贰陆公司及国内的山东天岳、天科合达进行比较可以发现，海内外公司均已达到盈亏平衡点，国内企业甚至更早一步，其中山东天岳利润中包含股权激励（扣非后 2018-2020 年为 -0.53、0.05 及 0.23 亿元）。

在半绝缘型碳化硅衬底领域，山东天岳产品批量且稳定地供应给通信行业领先企业，用于其新一代信息通信射频器件的制造，意味着公司的碳化硅衬底已被大规模地使用在世界先进的新一代信息通信系统内，已成为全球半绝缘碳化硅衬底主要供应商之一。近两年，山东天岳在半绝缘型碳化硅衬底领域市场占有率大幅提升，已进入行业第一梯队，直接与国外巨头竞争。2020 年，山东天岳市场占有率较上年增长 12 个百分点，位列世界前三，大大缩小了与国外竞争对手的差距。

图表 77 山东天岳、天科合达与海外可比公司经营情况对比

公司名称	2020 年		2019 年		2018 年	
	营业收入	净利润	营业收入	净利润	营业收入	净利润
单位：亿美金						
科锐公司	9.04	-1.91	10.80	-3.75	9.25	-2.80
贰陆公司	23.80	-0.67	13.62	1.08	11.59	0.88
单位：亿人民币						
山东天岳	4.25	-6.42	2.69	-2.01	1.36	-0.42
天科合达	未披露	未披露	1.55	0.30	0.78	0.02

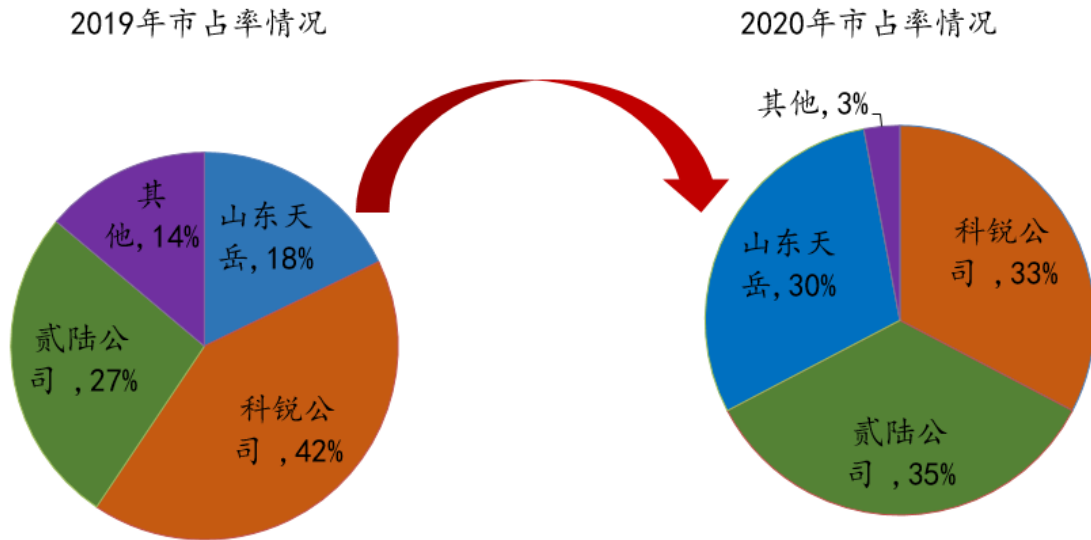
资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

图表 78 近两年科锐公司、贰陆公司与山东天岳在半绝缘型碳化硅衬底领域按金额统计的市场份额情况

年度	市场占有率				合计市场规模 (百万美元)
	科锐公司	贰陆公司	山东天岳	其他	
2019 年	42%	27%	18%	14%	154.09
2020 年	33%	35%	30%	3%	181.65

资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

图表 79 全球半绝缘型碳化硅衬底领域市场份额情况

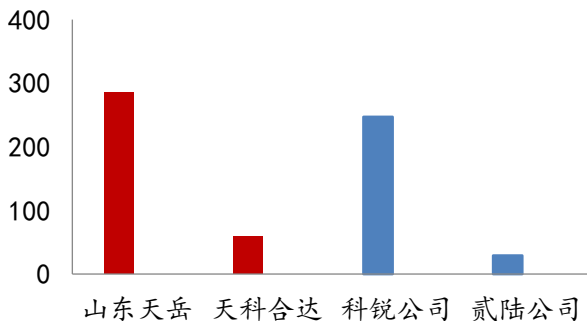


资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

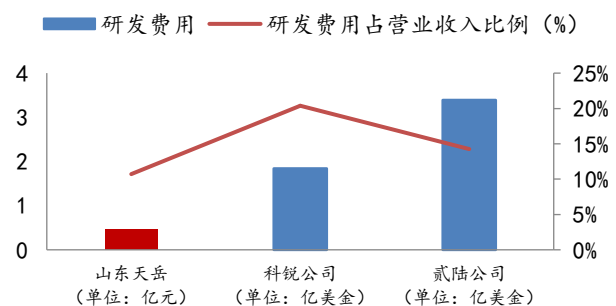
(2) 技术实力相当，国内企业仅 8 英寸晶圆开发中稍有落后

专利方面，截至 2020 年末，山东天岳拥有授权专利 286 项，其中境内发明专利 66 项，境外发明专利 1 项；科锐公司约有 3491 项有效授权专利，与碳化硅相关的专利约有 247 项；贰陆公司约有 186 项有效授权专利，与碳化硅相关的专利约有 29 项；天科合达拥有 59 项专利。

图表 80 国内外公司碳化硅相关专利数量 (2020 年底) 图表 81 国内外碳化硅公司 2020 年研发投入情况



资料来源：wind，华安证券研究所



资料来源：wind，华安证券研究所

研发投入方面，山东天岳 2020 年冲减研发产出后的研发费用为 4550.09 万元，

占当年营业收入的比例为 10.71%；科锐公司 2020 年研发费用为 1.84 亿美元，占当年营业收入的比例为 20.38%；贰陆公司 2020 年研发费用为 3.39 亿美元；占当年营业收入的比例为 14.25%。

产品参数对比方面，碳化硅衬底产品的核心技术参数包括直径、微管密度、多型面积、电阻率范围、总厚度变化、弯曲度及翘曲度。综合对比科锐公司、贰陆公司、天科合达、山东天岳等企业公开披露的相同等级 4 英寸和 6 英寸产品技术参数，国内公司产品质量标准处于国内领先、国际先进水平。

图表 824 英寸半绝缘型碳化硅衬底技术参数对比

产品性能	山东天岳	天科合达	科锐公司	贰陆公司
直径	100.0 mm +0.0/-0.5 mm	+100.0 mm 0.0/-0.5 mm	100.0 mm +0.0/-0.5 mm	未披露
微管密度	$\leq 1 \text{ cm}^{-2}$	$\leq 5 \text{ cm}^{-2}$	未披露	$< 0.1 \text{ cm}^{-2}$
多型面积	不允许	不允许	$\leq 5\%$ (面积)	未披露
电阻率范围	$\geq 1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$	$\geq 1 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$	$\geq 1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	$\geq 1 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$
总厚度变化	$\leq 10 \mu\text{m}$	$\leq 5 \mu\text{m}$	$\leq 15 \mu\text{m}$	未披露
弯曲度 (绝对值)	$\leq 25 \mu\text{m}$	$\leq 15 \mu\text{m}$	未披露	未披露
翘曲度	$\leq 35 \mu\text{m}$	$\leq 30 \mu\text{m}$	$\leq 45 \mu\text{m}$	未披露

资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

图表 836 英寸半绝缘型碳化硅衬底技术参数对比

产品性能	山东天岳	天科合达	科锐公司	贰陆公司
直径	150.0 mm $\pm 0.2 \text{ mm}$	+150.0 mm 0.0/-0.5 mm	150.0 mm $\pm 0.25 \text{ mm}$	未披露
微管密度	$\leq 0.5 \text{ cm}^{-2}$	$\leq 5 \text{ cm}^{-2}$	未披露	$< 0.1 \text{ cm}^{-2}$
多型面积	不允许	不允许	$\leq 5\%$ (面积)	未披露
电阻率范围	$\geq 1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$	$\geq 1 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$	$\geq 1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	$\geq 1 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$
总厚度变化	$\leq 10 \mu\text{m}$	$\leq 6 \mu\text{m}$	$\leq 10 \mu\text{m}$	未披露
弯曲度 (绝对值)	$\leq 25 \mu\text{m}$	$\leq 30 \mu\text{m}$	未披露	未披露
翘曲度	$\leq 40 \mu\text{m}$	$\leq 40 \mu\text{m}$	$\leq 40 \mu\text{m}$	未披露

资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

图表 844 英寸半导电型碳化硅衬底技术参数对比

产品性能	山东天岳	天科合达	科锐公司	贰陆公司
直径	150.0 mm $\pm 0.2 \text{ mm}$	+150.0 mm 0.0/-0.5 mm	150.0 mm $\pm 0.25 \text{ mm}$	未披露
微管密度	$\leq 0.5 \text{ cm}^{-2}$	$\leq 2 \text{ cm}^{-2}$	$< 1 \text{ cm}^{-2}$	$< 0.1 \text{ cm}^{-2}$
多型面积	不允许	不允许	$\leq 5\%$ (面积)	未披露
电阻率范围	0.015-0.025 $\Omega \cdot \text{cm}$	0.015-0.025 $\Omega \cdot \text{cm}$	0.015-0.028 $\Omega \cdot \text{cm}$	约 0.02 $\Omega \cdot \text{cm}$
总厚度变化	$\leq 10 \mu\text{m}$	$\leq 6 \mu\text{m}$	$\leq 10 \mu\text{m}$	未披露
弯曲度 (绝对值)	$\leq 25 \mu\text{m}$	$\leq 30 \mu\text{m}$	未披露	未披露
翘曲度	$\leq 40 \mu\text{m}$	$\leq 40 \mu\text{m}$	$\leq 40 \mu\text{m}$	未披露

资料来源：山东天岳招股说明书，华安证券研究所

碳化硅衬底的尺寸（按直径计算）主要有2英寸（50mm）、3英寸（75mm）、4英寸（100mm）、6英寸（150mm）、8英寸（200mm）等规格。碳化硅衬底正在不断向大尺寸的方向发展，目前行业内公司主要量产产品尺寸集中在4英寸及6英寸。在最新技术研发储备上，科锐公司及贰陆公司已成功研发8英寸产品，国内企业尚在研发。

图表 85 行业内各公司不同尺寸 SiC 晶片的推出对比

	山东天岳	天科合达	科锐公司	贰陆公司	SiCrystal
4 英寸	√	√	√	√	√
6 英寸	√	√	√	√	√
8 英寸			√	√	

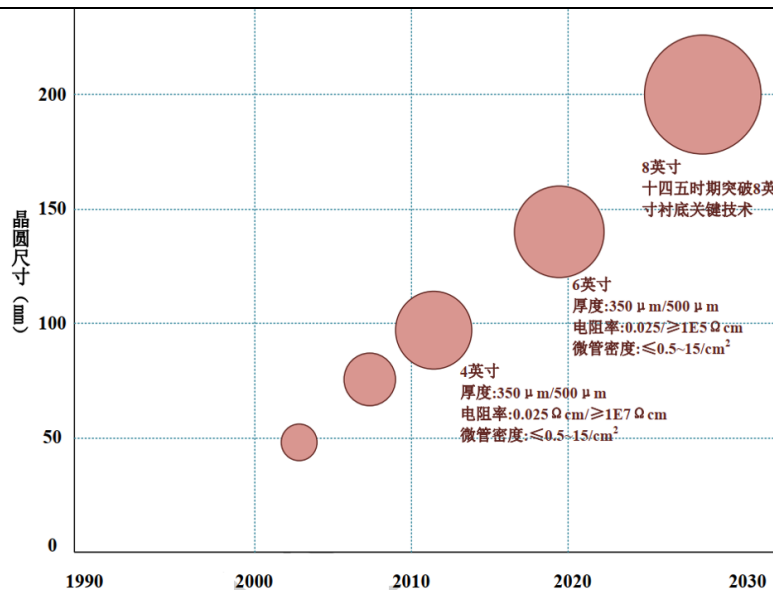
资料来源：天科合达招股说明书，华安证券研究所

图表 86 国内外部分企业 8 英寸衬底研发及量产时间表

时间	企业	概况	量产时间
2015	Wolfspeed	展示了 8 英寸 SiC 衬底	2022 年初
2015	罗姆半导体	展示了 8 英寸 SiC 衬底	2025 年
2015 年 7 月	II-VI	展示了 8 英寸导电型 SiC 衬底	2024 年
2019 年	II-VI	推出半绝缘 8 英寸 SiC 衬底	2024 年
2020 年	天科合达	启动 8 英寸 SiC 衬底研发	-
2020 年 9 月	英飞凌	宣布建成 8 吋 SiC 晶圆生产线	2025 年
2021 年 6 月	意法半导体	Norstel 交付首个 8 英寸 SiC 晶圆	2024 年
2021 年 9 月	安森美	Rožnov 工厂加入 8 寸 SiC 晶圆俱乐部	-
2022 年 3 月	烁科晶体	成功研制出 8 英寸 SiC 晶体	-
2022 年 4 月	天岳先进	8 英寸 SiC 衬底项目有进展	-

资料来源：《第三代半导体调研白皮书》，华安证券研究所

图表 87 国内碳化硅衬底尺寸演进



资料来源：科锐公司公告，华安证券研究所

图表 88 海内外碳化硅衬底及外延企业产品布局时间线



资料来源：YOLE，华安证券研究所

(3) 发展环境相似，国内政策及资金面大力扶持碳化硅行业

美国方面，先进的半导体技术是科技进步的重要支撑，更是航天、通讯、国防等众多领域的重要保障。但近几年，由于技术和产业本身的限制，美国半导体行业的发展放缓了脚步，加上其他各国的不断挑战，美国政府需要打造一个更加良好的环境来推动技术创新，维持半导体带来的收益和影响。

- 注重人才输出。半导体行业的创新与转型，需要大量的专业人才。美国共设置了 5 个人才培养项目，由美国各个高校参与，通过项目支持，为在校大学生提供了一系列的针对性培养，为企业培养了大批优秀的工程师。美国除了推进本土人才的培养，也通过高技术人才移民来吸引全球的技术精英。
- 在先进技术领域的投资。对先进技术领域的投资是保持半导体行业竞争力的基础。近些年在政府主导的第三代半导体材料的研究上，已在全球范围内率先实现了商业化生产，被应用在电动汽车、太阳能等热门领域。因此对先进科技领域的投入，是必须坚持的方针。
- 通过推进税收改革，点燃从业者的激情。
- 推动先进设施的建设，保证半导体领域的相关研究先人一步。

日本方面，当今的半导体行业形成了如下格局：芯片设计上，以高通、英伟达等美国企业为主；芯片制造上，由海思、夏普、AMD 等企业主导；半导体封测方面中国企业一直保持着特有的优势；而在整个行业的上游产业上即半导体材料和设备方面，日本的半导体企业凭借着绝对的优势占据着市场一般以上的份额。日本半导体行业发展的四点策略值得我们参考。

- 通过产学研一体化进行国家级基础攻关研究。自主研发和自主生产一直都是日本政府所鼓励所坚守的原则。各企业和科研机构以政府为依托，合作开发关键技术，共同攻克大型基础研究项目，增加半导体材料产品的自主知识产权所占比例，为企业发展提供良好的技术支持和广阔的平台。

- 避免产品分散，打造自己的高附加值核心产品。日本半导体材料企业发展状况十分优异，是日本半导体行业的明星产品，这些产品经过不断技术打磨、市场考验和优化升级，技术水平全球领先，保障了其市场地位。
- 积极进行海外研发与合作。从 20 世纪 80 年代开始，日本的半导体企业就纷纷开始在国外建立研发基地，通过合作开发与美国的大客户之间建立了良好的信任关系同时，保持了自己在技术上的领先地位。
- 经营模式及时转型。日本半导体公司以往均采用 IDM 的模式，集设计、制造等多个产业链环节于一身，有助于整个产业链的协同优化和发掘技术潜力。这种模式弊端明显，比如企业一般都规模庞大，生产、管理、运营的成本都相对较高，资本回报率却偏低。在 20 世纪 90 年代，人们发现将设计和制造环节分开的 Fabless+Foundry 模式更有利于半导体行业的发展。日本在此时未能进行及时的转型调整，冗余的企业结构不能及时应对快速变化的市场，处于明显的竞争劣势之中，最终得到了惨痛的教训。

我国方面，工信部主要职责包括提出新型工业化发展战略和政策，协调解决新型工业化进程中的重大问题，拟订并组织实施工业、通信业、信息化的发展规划，推进产业结构战略性调整和优化升级，推进信息化和工业化融合；制定并组织实施工业、通信业的行业规划、计划和产业政策，提出优化产业布局、结构的政策建议，起草相关法律法规草案，制定规章，拟订行业技术规范和标准并组织实施，指导行业质量管理工作；监测分析工业、通信业运行态势，统计并发布相关信息，进行预测预警和信息引导，协调解决行业运行发展中的有关问题并提出政策建议，负责工业、通信业应急管理、产业安全和国防动员有关工作等。

图表 89 国内部分厂商产能情况

公司	地点	达产时间	衬底尺寸	衬底类型	规划产能（万片/年）
天科合达	新疆	2014	4 英寸及 6 英寸	导电型	-
	徐州	2021			7
	北京	2022			12
	深圳	2027			-
中国电科	山西	2020	4 英寸及 6 英寸	导电型	10
				半绝缘型	5
中科钢研	山东	2021	4 英寸	导电型	5
				半绝缘型	0.5
露笑科技	合肥	2021	6 英寸	导电型	2.5
		2022			10
三安光电	湖南	2023 年	6 英寸	导电型+半绝缘型	3.6
东莞天城	东莞	2023	4 英寸及 6 英寸	-	100
东尼电子	湖州	2024	4 英寸及 6 英寸	导电型	12
晶盛机电	浙江	2026	6 英寸	导电型+半绝缘型	40
天岳先进	临港	2026	-	导电型	30

资料来源：各公司公告，华安证券研究所

图表 90 近五年我国颁发的行业部分法律法规政策

时间	部门	政策名称	相关内容
2017.01	工信部、国家发改委	《信息产业发展指南》	加紧布局超越“摩尔定律”相关领域,推动特色工艺生产线建设和第三代化合物半导体产品开发,加速新材料、新结构、新工艺创新
2017.02	国家发改委	《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》	将碳化硅衬底材料列入战略性新兴产业重点产品目录
2017.04	科技部	《“十三五”材料领域科技创新专项规划》	加强我国材料体系的建设,大力发展高性能碳纤维与复合材料、高湿合金、军工新材料、第三代半导体材料、新型显示技术、特种合金和稀土新材料等,满足我国重大工程与国防建设的材料需求
2017.04	科技部	《“十三五”先进制造技术领域科技创新专项规划》	宽禁带半导体/半导体照明等关键装备研究针对碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)等为代表的宽禁带半导体技术对关键制造装备的需求,开展大尺寸(6吋)宽禁带半导体材料制备、器件制造、性能检测等关键装备与工艺研究
2017.05	科技部、交通运输部	《“十三五”交通领域科技创新专项规划》	建立汽车电子控制技术创新及测试评价平台。开展汽车整车、动力系统、底盘电子控制系统以及 IGBT、碳化硅、氮化镓等电力电子器件技术研发及产品开发和零部件、系统的软硬件测试技术与测试评价技术规范体系研究。支撑我国汽车电子控制系统产业的形成与发展,打破国外垄断。
2019.01	国家发改委	《产业结构调整指导目录(2019 年本)》	“第一类鼓励类”: 半导体、光电子器件、新型电子元器件(片式元器件、电力电子器件、光电子器件、敏感元器件及传感器、新型机电元件、高频微波印制电路板、高速通信电路板、柔性电路板、高性能覆铜板等)等电子产品用材料;轨道交通车辆交流牵引传动系统、制动系统及核心元器件(含 IGBT、SiC 元器件),网络控制系统,永磁牵引电机,直流高速开关、真空断路(GIS)、新型智能开关器件
2019.11	工信部	《重点新材料首批次应用示范指导目录(2019年版)》	将碳化硅单晶衬底列入“先进半导体材料和新型显示材料”子目录
2020.04	科技部	《“战略性先进电子材料”重点专项2020年度项目》	支持功率碳化硅芯片和器件在移动储能装置中的应用(应用示范类)
2021.01	工信部	《基础电子元器件产业发展行动计划(2021-2023年)》	面对百年未有之大变局和产业大升级、行业大融合的态势,加快电子元器件及配套材料和设备仪器等基础电子产业发展,对推进信息技术产业基础高级化、产业链现代化,乃至实现国民经济高质量发展具有重要意义
2021.03	十三届全国人大四次会议审议通过	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	集中电路设计工具、重点装备和高纯靶材等关键材料研发,集中电路先进工艺和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、微机电系统(MEMS)等特色工艺突破,先进存储技术升级,碳化硅、氮化镓等宽禁带半导体发展
2021.08	工信部	工信部答复政协十三届全国委员会第四次会议第1095号提案	将以重大关键技术突破和创新应用需求为主攻方向,进一步强化产业政策引导,将碳基材料纳入“十四五”原材料工业相关发展规划,并将碳化硅复合材料、碳基复合材料等纳入“十四五”产业科技创新相关发展规划,以全面突破关键核心技术,攻克“卡脖子”品种,提高碳基新材料等产品质量,推进产业链现代化。

资料来源:天岳先进招股说明书,中商产业研究院,华安证券研究所

3 投资建议

基于国防军工信息化、新能源汽车行业的高景气度，考虑到碳中和催动能源转型降低能耗，我们预计碳化硅行业将迎来快速发展期。

建议关注中瓷电子、凤凰光学、亚光科技、海特高新、赛微电子、天岳先进、斯达半导、露笑科技、扬杰科技、三安光电等。

风险提示：

SIC 成本降低不达预期；

SIC 器件稳定性可靠性指标不及预期；

国内 SIC 产业链跟国外差距进一步拉大的风险；

宏观经济导致行业景气下降的风险。

重要声明

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的执业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

免责声明

华安证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。本报告由华安证券股份有限公司在中华人民共和国（不包括香港、澳门、台湾）提供。本报告中的信息均来源于合规渠道，华安证券研究所力求准确、可靠，但对这些信息的准确性及完整性均不做任何保证。在任何情况下，本报告中的信息或表述的意见均不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。华安证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

本报告仅向特定客户传送，未经华安证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。如欲引用或转载本文内容，务必联络华安证券研究所并获得许可，并需注明出处为华安证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。如未经本公司授权，私自转载或者转发本报告，所引起的一切后果及法律责任由私自转载或转发者承担。本公司并保留追究其法律责任的权利。

投资评级说明

以本报告发布之日起 6 个月内，证券（或行业指数）相对于同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准，A 股以沪深 300 指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以纳斯达克指数或标普 500 指数为基准。定义如下：

行业评级体系

- 增持—未来 6 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%以上；
- 中性—未来 6 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
- 减持—未来 6 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%以上；

公司评级体系

- 买入—未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15%以上；
- 增持—未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%至 15%；
- 中性—未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
- 减持—未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%至 15%；
- 卖出—未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15%以上；
- 无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。