

新能源汽车产业趋势系列报告 之八：功率半导体，驭电者之歌

汽车

以电驱之长补电池之短，功率半导体位居关键环节

新能源汽车动力电池存储的能量规模不及燃油车油箱，其性能的保障除电池外还依靠高性能电机、配套电控等。功率半导体是电控的核心组成，用于实现开关、逆变、变频、变压等功能。

电车需求结合材料本质，硅 IGBT/碳化硅 MOSFET 脱颖而出

新能源汽车电控用功率半导体需同时考虑基体材料类型和器件类型。基体材料中，硅综合性能均衡、单晶生产成本低，已得到广泛应用；碳化硅综合性能优越，极具应用潜力。器件类型中，IGBT 可承受高压大电流，但开关损耗高；MOSFET 的开关速度快、开关损耗低，但耐压性能差。

综合考虑基体材料和器件特性，硅基 IGBT（相对廉价）和碳化硅基 MOSFET（相对昂贵）是新能源汽车功率半导体合理选择。

硅基 IGBT，新能源汽车功率半导体规模统治者

硅基 IGBT 发明于上世纪 80 年代的美国，后引入日本、欧洲市场，其技术经过了数次迭代。2018 年全球市场规模约 58 亿美元，其中汽车用占比约为 1/4。主要供应商包括英飞凌，三菱，富士，安森美，ABB 等。我国也有进展，比如比亚迪打造 IGBT 产业链并应用于“王朝”车型，上汽集团和英飞凌合资进行生产等。

碳化硅基 MOSFET，新能源汽车功率半导体性能翘楚

碳化硅物理气相输运的晶体生长方式决定了其较高的成本，但碳化硅基 MOSFET 的综合效率（约 98%）高于硅基 IGBT（约 92%）。2018 年车用碳化硅基 MOSFET 全球市场规模不足 2 亿美元，增速较高；产业链上主要公司包括 Cree、罗姆、意法半导体等，国内也有衬底企业天岳、天科合达，设备企业北方华创等。特斯拉 Model 3 是碳化硅基 MOSFET 成功应用的标杆车型。

新能源汽车规模增长品质提升，功率半导体如箭在弦

我国新能源汽车销量增速暂时趋缓，但销量结构向好；长期销量相对高增速和节能降耗趋势不变，功率半导体深度受益。我们估计，至 2025 年，我国相应市场规模在 100 亿元以上。其中硅基 IGBT 逾 70 亿元，碳化硅基 MOSFET 近 40 亿元；产业自主可控程度有望逐步增强。

投资建议

建议投资者关注和英飞凌成立合资公司生产硅基 IGBT 的上汽集团；关注独立开发应用新能源汽车用硅基 IGBT 的新能源汽车龙头；关注可批量供应高性能碳化硅单晶炉的设备龙头。

风险提示

新能源汽车销量、销量结构不及预期，硅基 IGBT 成本降幅不及预期，碳化硅衬底技术进步不及预期，功率半导体自主替代受阻，新能源汽车基础设施建设滞后，新能源汽车安全性风险。

请参阅最后一页的重要声明

维持

买入

余海坤

yuhaijun@csc.com.cn

010-86451002

执业证书编号：S1440518030002

发布日期：2019 年 11 月 22 日

市场表现



相关研究报告

目录

| | |
|---|----|
| 一、以电驱之长补电池之短，功率半导体位居关键环节..... | 1 |
| 1、使用便捷性是汽车竞争力的根本 | 1 |
| 2、能流高效，功率半导体是电控核心 | 2 |
| 二、电车需求结合材料本质，硅 IGBT/碳化硅 MOSFET 脱颖而出 | 4 |
| 1、半导体，基材提供能隙掺杂控制电导..... | 4 |
| 2、硅是主流基材，三代半导体碳化硅性能出色..... | 5 |
| 3、硅基 IGBT、碳化硅基 MOSFET 承担新能源汽车功率半导体重任..... | 6 |
| 三、硅基 IGBT，新能源汽车功率半导体规模统治者 | 9 |
| 1、技术几经迭代，生产工艺复杂稳定 | 9 |
| 2、国际巨头规模领先，自主企业日夜兼程..... | 11 |
| 四、碳化硅基 MOSFET，新能源汽车功率半导体性能翘楚..... | 13 |
| 1、基体材料困难度大，器件生产工艺复杂..... | 13 |
| 2、产业成长期规模待爆发，Model 3 树立应用标杆 | 15 |
| 五、新能源汽车规模增长品质提升，功率半导体如箭在弦..... | 18 |
| 1、销量回调结构优化，产业发展无需悲观..... | 18 |
| 2、双积分助力规模增长电耗降低，功率半导体长期受益..... | 21 |
| 3、放眼长远，硅基 IGBT 仍是主流碳化硅基 MOSFET 中高端发力..... | 23 |
| 投资评价和建议 | 25 |
| 风险分析 | 25 |

图表目录

| | |
|--|---|
| 图表 3： 燃油/纯电动乘用车能量及续航对比 | 2 |
| 图表 4： 丰田 Dynamic Force Engine 2.0L 发动机效率 map 图（图中新款） | 2 |
| 图表 5： 宝马 i3 永磁电机（升级版）效率 map 图..... | 2 |
| 图表 6： 典型发动机、电动机动力性能对比示意..... | 3 |
| 图表 7： 大众 MQB 整车平台，多用于燃油车型 | 3 |
| 图表 8： 大众 MEB 整车平台..... | 3 |
| 图表 9： 典型 EV/HEV 电路结构图..... | 3 |
| 图表 10： 半导体能带模型（以本征硅材料为例） | 4 |
| 图表 11： N 型半导体形成原理示意..... | 4 |
| 图表 12： P 型半导体形成原理示意 | 4 |
| 图表 13： 典型半导体基体材料及性能（在 300K 温度下；不同数据源数据稍有区别） | 5 |
| 图表 14： 功率半导体器件分类 | 6 |
| 图表 15： 硅功率半导体器件的额定电流、额定电压、开关频率范围..... | 6 |
| 图表 16： MOSFET 和 IGBT 的基本结构 | 7 |
| 图表 17： IGBT 的工作原理和静态转移/输出电气特性..... | 8 |
| 图表 18： 各代 IGBT 及主要技术指标 | 9 |
| 图表 19： 区熔法制备高纯硅晶棒示意图 | 9 |

| | |
|---|----|
| 图表 20: 典型 IGBT 芯片的制造工艺流程 | 10 |
| 图表 21: 典型 IGBT 模块的封装工艺流程 | 10 |
| 图表 22: 历年全球 IGBT 市场规模 | 11 |
| 图表 23: 2017 年全球 IGBT 市场份额情况 | 11 |
| 图表 24: 比亚迪车规级 IGBT4.0 芯片示意 | 12 |
| 图表 25: 碳化硅半导体产业链简图 | 13 |
| 图表 26: 碳化硅单晶的典型同素异形体、PVT 法生产碳化硅单晶的典型设备示意 | 13 |
| 图表 27: 碳化硅晶片 (4H 导电型)、制造工艺流程及设备 | 14 |
| 图表 28: 碳化硅衬底、功率器件制造工艺流程及设备示意 | 14 |
| 图表 29: 碳化硅 MOSFET 封装工艺 | 15 |
| 图表 30: 全球导通型碳化硅衬底销量估计 (单位: 万片) | 15 |
| 图表 31: 碳化硅功率器件市场规模估计 | 16 |
| 图表 32: Cree 发布于 2019 年 5 月的 SiC 产能扩大计划 | 17 |
| 图表 33: 特斯拉 Model 3 使用的搭载碳化硅 MOSFET 模块的逆变器 | 17 |
| 图表 34: 2018-2019 年我国纯电乘用车补贴标准 (系数-倍; 金额-万元) | 18 |
| 图表 35: 2019 年以来我国新能源汽车产销情况 | 19 |
| 图表 36: 2019 年以来我国纯电、插混乘用车销量情况 | 19 |
| 图表 37: 2019 年以来我国纯电动乘用车销量结构 | 20 |
| 图表 38: 2019 年以来我国纯电动乘用车销量结构占比 | 20 |
| 图表 39: 典型纯电动乘用车性能指标 | 20 |
| 图表 40: 2019 年 1-9 月全球销量超过 2 万辆的纯电动乘用车 (特斯拉 Model 3 超过标度, 以数字示意) | 21 |
| 图表 41: 2021-2023 年“双积分”政策 (征求意见稿) 对标准车型新能源积分上限的规定 | 22 |
| 图表 42: 典型新能源汽车积分基础值 (横轴, 理论公式外推不考虑上限) 和 EC 系数* (纵轴) | 23 |
| 图表 43: 我国新能源汽车功率半导体价值量估计 (万元) | 24 |

一、以电驱之长补电池之短，功率半导体位居关键环节

1、使用便捷性是汽车竞争力的根本

根据国标《汽车和挂车类型的术语和定义》(GB/T 3730.1—2001)，汽车是由动力驱动，具有4个或4个以上车轮的非轨道承载的车辆。基于便捷、舒适的交通需求，用户（及社会）对汽车的关注点涉及多方面易量化和不易量化的内容。

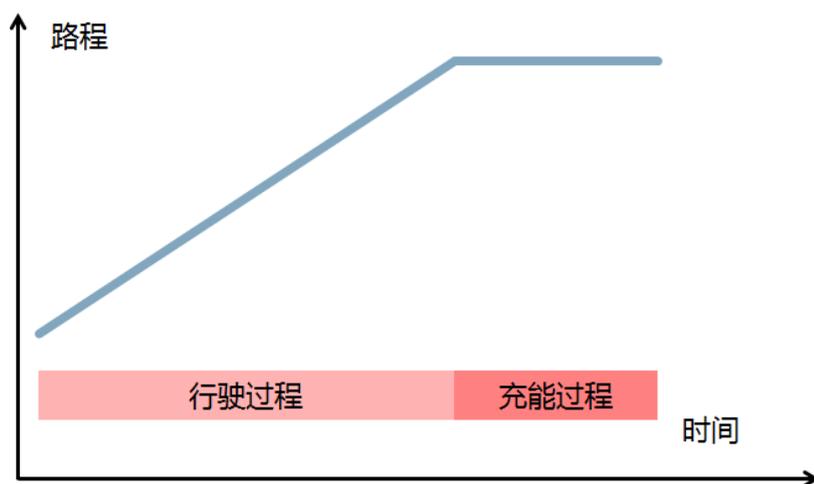
图表1：汽车产品关注点体系

| 易量化关注点 | 不易量化关注点 |
|--------|----------|
| 续航能力 | 环境影响 |
| 动力性能 | 温度适应与耐候性 |
| 充能能力 | 噪声 |
| 制动性能 | 驾驶和操纵感 |
| 整车寿命 | 乘坐舒适性 |
| 空间和视野 | 外观和内饰品质 |
| 综合成本 | 安全性 |

资料来源：广汽丰田，weNcar，中信建投证券研究发展部

使用便捷性是绝大多数情况下用户对汽车的接受底线和核心需求，可简明体现为汽车在某工况/工况组合下运行的行驶时间和充能时间，及对应的行驶路程。

图表2：简明体现汽车使用便捷性的行驶和充能过程



资料来源：中信建投证券研究发展部

行驶路程越长（对应续航能力）/行驶速度越快（对应动力性能），单次充能时间越短/充能时间占总时间的比例越小（对应充能能力），可认为整车的便捷性越高；在充能不便的条件下，单次充能的行驶路程越长，整车的便捷性越高。

2、能流高效，功率半导体是电控核心

汽车的续航能力、动力性能和充电时间的决定性因素是其储能（及配套动力）系统的本质理化属性。这已为长逾百年的汽车进化史所证实。

燃油汽车储能及配套动力系统主要为油箱、发动机。新能源汽车储能及动力系统（并含带有高压电的部件，耐压程度有 650V、900V、1200V 等不同等级）包括动力电池，驱动电机，高压配电箱（PDU），电动压缩机，DC/DC，OBC，PTC，高压线束等，这些部件组成了整车的高压系统，其中动力电池，驱动电机，控制系统为纯电动汽车上的三大核心部件。

动力电池相比于油箱，在锂电替代铅酸、三元替代铁锂、三元高镍化多重技术趋势逐级推动之下，其有效储能仍居于劣势；而长续航车型的工况续航大体可以和燃油车型相比，其主要原因是电机电控相比于燃油发动机的效率优势。

图3： 燃油/纯电动乘用车能量及续航对比

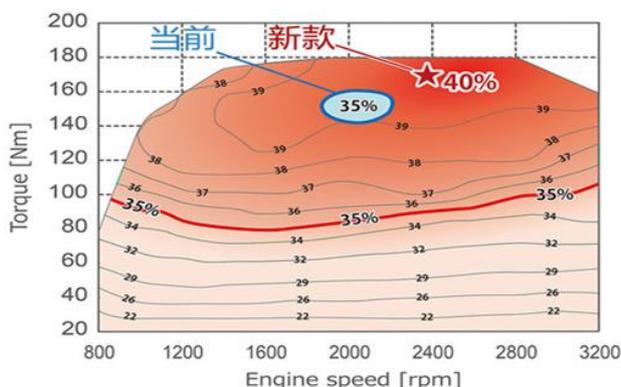
| 车辆类型 | 储能装置 | 携带能量（折算为 kWh，汽油以低热值计算） | 油耗/电耗 | 工况续航 |
|-----------|----------|------------------------|---------------|----------|
| 典型燃油乘用车 | 52L 油箱 | 1614MJ，合 448kWh | 6L/100km | 800km 以上 |
| 长续航纯电动乘用车 | 93kWh 电池 | 93kWh，合 335MJ | 15.8kWh/100km | 600km 以上 |

资料来源：中信建投证券研究发展部

当前，汽油发动机的最高热效率已经突破 40%。如丰田 Dynamic Force Engine 2.0L 发动机，通过阿特金森循环、高压压缩比和双喷射等技术手段达到了最佳工况下的高能效。

电动机和发动机相比，具有效率高（高效区间效率在 95% 以上，且相对高效区间覆盖范围远大于燃油发动机，意味着电能-机械能转化更有效）、高效区间大（意味着绝大多数工况下电能-机械能）转化效率高优点，并可实现制动能量回收以进一步降低实际油耗。

图4： 丰田 Dynamic Force Engine 2.0L 发动机效率 map 图（图中新款）



资料来源：丰田，中信建投证券研究发展部

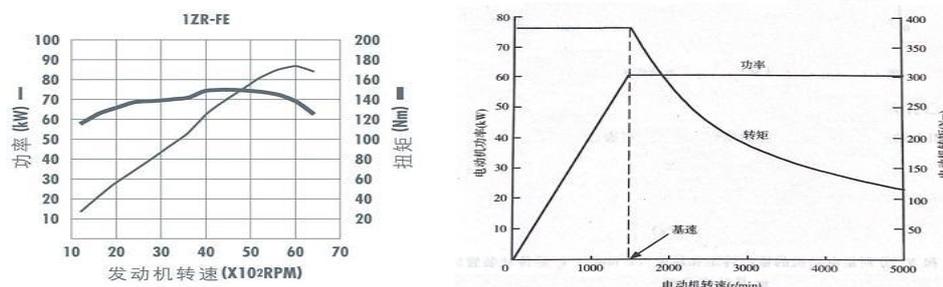
图5： 宝马 i3 永磁电机（升级版）效率 map 图

| SPEED [RPM] | TORQUE [NM] | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 | 300 |
| 4000 | 86.19 | 93.17 | 94.36 | 94.89 | 95.38 | 95.76 | 95.88 | 96.10 | 96.12 | 96.09 | 96.06 | 95.88 | 95.68 | 95.45 | 95.17 | 94.86 | 94.51 | 94.15 | 93.94 |
| 4500 | 86.17 | 93.17 | 94.41 | 95.02 | 95.55 | 95.80 | 95.93 | 96.04 | 96.22 | 96.22 | 96.06 | 96.01 | 95.71 | 95.52 | 95.25 | 94.94 | 94.65 | 94.29 | 93.92 |
| 4800 | 86.69 | 90.46 | 92.46 | 93.62 | 94.31 | 94.77 | 95.12 | 95.29 | 95.56 | 95.67 | 95.67 | 95.59 | 95.49 | 95.31 | 95.03 | 94.80 | 94.45 | 93.95 | NaN |
| 5000 | 86.66 | 93.37 | 94.51 | 95.01 | 95.58 | 95.87 | 96.05 | 96.14 | 96.29 | 96.26 | 96.16 | 96.07 | 95.87 | 95.68 | 95.41 | 95.07 | 94.55 | NaN | NaN |
| 5500 | 86.21 | 93.17 | 94.45 | 95.06 | 95.49 | 95.74 | 95.89 | 96.09 | 96.19 | 96.21 | 96.18 | 96.00 | 95.77 | 95.40 | 94.89 | 94.23 | 93.51 | NaN | NaN |
| 6000 | 89.39 | 92.67 | 94.23 | 94.97 | 95.33 | 95.72 | 95.84 | 96.01 | 96.18 | 96.16 | 96.01 | 95.71 | 95.29 | 94.76 | 93.97 | 92.97 | NaN | NaN | NaN |
| 6500 | 88.82 | 92.75 | 94.04 | 94.68 | 95.13 | 95.57 | 95.83 | 95.95 | 96.05 | 95.95 | 95.66 | 95.28 | 94.69 | 93.76 | 92.47 | NaN | NaN | NaN | NaN |
| 7000 | 86.30 | 91.41 | 93.08 | 93.92 | 94.83 | 95.21 | 95.47 | 95.67 | 95.63 | 95.52 | 95.12 | 94.57 | 93.61 | 92.06 | NaN | NaN | NaN | NaN | NaN |
| 7500 | 84.80 | 90.72 | 92.70 | 93.07 | 94.70 | 94.96 | 95.24 | 95.31 | 95.27 | 95.12 | 94.57 | 93.65 | 92.11 | NaN | NaN | NaN | NaN | NaN | NaN |
| 8000 | 84.19 | 90.19 | 94.13 | 94.15 | 94.56 | 94.90 | 95.07 | 95.09 | 94.94 | 94.84 | 93.92 | 92.08 | NaN |
| 9000 | 83.39 | 90.36 | 92.93 | 93.68 | 94.19 | 94.41 | 94.49 | 94.42 | 94.29 | 93.52 | 91.35 | NaN |
| 10000 | 83.13 | 90.39 | 92.38 | 93.26 | 93.63 | 93.74 | 93.82 | 93.70 | 93.17 | NaN |
| 11000 | 82.56 | 89.44 | 91.80 | 92.28 | 92.91 | 93.03 | 93.12 | 92.83 | NaN |
| 12000 | 81.16 | 88.10 | 90.70 | 91.62 | 92.48 | 91.84 | 91.83 | 91.36 | NaN |

资料来源：宝马，中信建投证券研究发展部

另外，电动机起步扭矩高，最大功率高，NVH 出色。依托三电系统的新能源汽车驾驶体验相比依托传统动力系统的燃油汽车具有相当优势。

图表6：典型发动机、电动机动力性能对比示意



资料来源：中信建投证券研究发展部

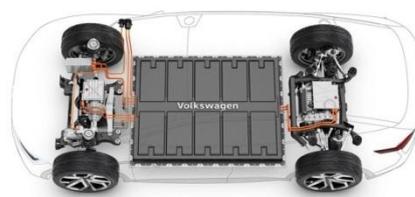
整车层面，纯电动车型动力电池包相比于燃油车型发动机重 300-500kg，而电机电控比燃油车型所需的内燃机、变速器、尾气处理、水箱、风扇等轻约 200kg。故燃油、纯电动汽车动力系统的重量、体积等参数基本可比，电机电控的高效性能也是关键因素。

图表7：大众 MQB 整车平台，多用于燃油车型



资料来源：大众，中信建投证券研究发展部

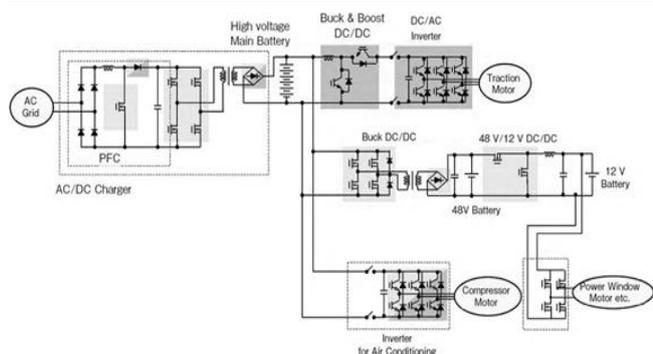
图表8：大众 MEB 整车平台



资料来源：大众，中信建投证券研究发展部

动力电池包内部由多个电池单体（锂离子电池典型电压 3.7V）串并联对外输出直流电，电机所需则为交流电，需要开关、逆变、变频、变压等功能，且应满足宽适用温域、宽海拔范围、长寿命、高功率密度、小体积、高效低损耗等应用条件，并尽可能控制成本。上述功能的实现主要依靠电控的核心组元功率半导体。充电器、空调等也需要以功率半导体电力电子装置。

图表9：典型 EV/HEV 电路结构图



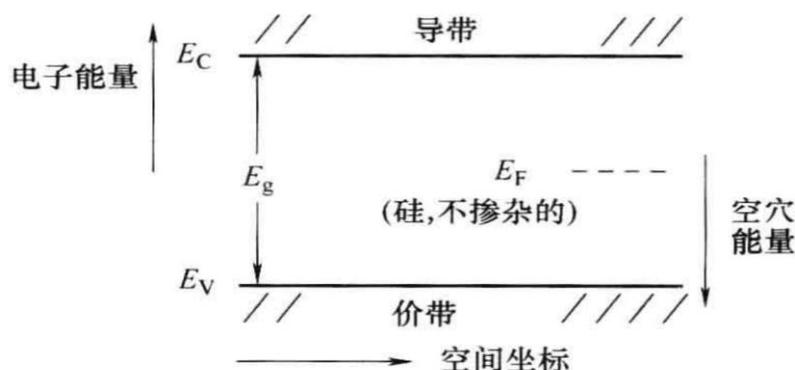
资料来源：中国知网，中信建投证券研究发展部

二、电车需求结合材料本质，硅 IGBT/碳化硅 MOSFET 脱颖而出

1、半导体，基材提供能隙掺杂控制电导

半导体材料的电阻率覆盖范围很宽，在 10^{-4} 到 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间，且电阻率随温度的升高而降低。半导体的物理特性由本征能带和杂质能级模型解释：半导体基体材料（基材）是固体，在足够低的温度下，其导带（对应自由电子的能量范围）全空，价带（对应价电子的能量范围）全满，导带底 E_C 和价带顶 E_V 二者之间的界限为禁带且对应禁带宽度（能隙） E_g 。禁带的产生是因为半导体原子的所有价带电子在足够低的温度下要求有完整的共价键。温度稍高时，半导体内部产生本征载流子，禁带宽度也会稍有变化。

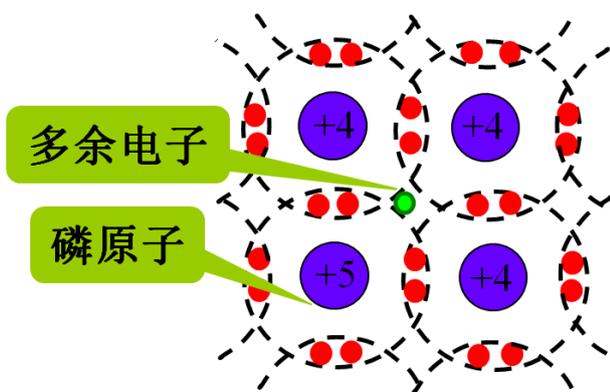
图表10： 半导体能带模型（以本征硅材料为例）



资料来源: 功率半导体器件——原理、特性和可靠性, 中信建投证券研究发展部

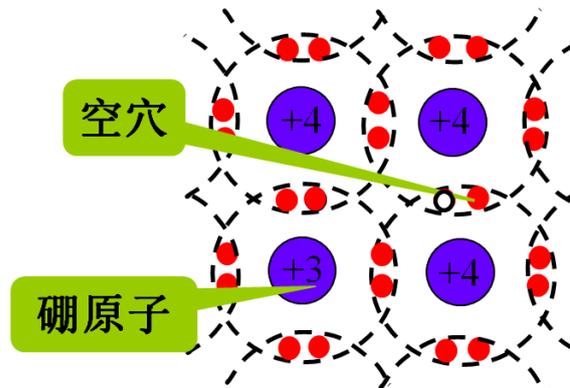
对于半导体器件而言，其关键性质是在一定温度区间内，电导率可以通过掺杂手段加以控制。对于电中性的 IV 主族、III-V 主族半导体等而言，进行 V 主族元素掺杂，会增加电子作为多数载流子，形成施主能级，并获得 N 型半导体；进行 III 主族元素掺杂，会增加空穴作为多数载流子，形成受主能级，并获得 P 型半导体。

图表11： N 型半导体形成原理示意



资料来源: 清华大学, 中信建投证券研究发展部

图表12： P 型半导体形成原理示意



资料来源: 清华大学, 中信建投证券研究发展部

2、硅是主流基材，三代半导体碳化硅性能出色

半导体功能的实现受到基体材料理化性质的限制。

首先，**基体材料需要有一个较宽的能隙**，以确保在没有掺杂的情况下，本征载流子浓度低于最轻掺杂区掺杂浓度的温度上限较高，且临界击穿场强较高；能隙也不应过宽，致使自建电势和门槛电压过高。

其次，**基体材料在禁带中的能级应尽可能少**，使得阻断电压高、漏电流低。

再次，**基体材料需要有足够高的自由载流子迁移率**（电子迁移率高于空穴，故以电子迁移率为准），使得相应功率半导体器件的最大允许电流密度较高。

而且，**基体材料需要有足够高的载流子饱和漂移速度**（同样以电子迁移率为准），使得相应功率半导体器件的最大允许频率较高。

最后，**稳定的化学性质、较高的热导率**等对高性能器件的实际应用也具有重要作用。

典型半导体材料包括以锗为代表的第一代半导体材料，以硅为代表的第二代半导体材料，和以碳化硅、氮化镓为代表的第三代半导体材料（均为单晶材料）。

图表13： 典型半导体基体材料及性能（在 300K 温度下；不同数据源数据稍有区别）

| 半导体材料 | 晶体结构 | 能隙/eV | 临界击穿场强 (MV/cm) | 电子迁移率 (cm ² /V*s) | 电子饱和漂移速度 (10 ⁷ cm/s) | 热导率 (W/cm*K) |
|--------|---------------|-------|-------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------|
| Ge | 金刚石晶格，立方晶系 | 0.66 | 0.1 | 3900 | 0.6 | 0.58 |
| Si | 金刚石晶格，立方晶系 | 1.12 | 0.3 | 1450 | 1.5 | 1.5 |
| GaAs | 闪锌矿晶格，立方晶系 | 1.42 | 0.4 | 8000 | 1.0 | 0.46 |
| 4H-SiC | 纤锌矿晶格，4H 六方晶系 | 3.0 | 2.2 | 1000 | 2.0 | 4.9 |
| 6H-SiC | 纤锌矿晶格，6H 六方晶系 | 3.26 | 2.5 | 500 | 2.0 | 4.9 |
| GaN | 纤锌矿晶格，2H 六方晶系 | 3.44 | 3.3 | 400 | 2.5 | 1.3 |

资料来源: *Physics of semiconductor devices*, IOFFE, *功率半导体器件——原理、特性和可靠性*, 中国知网, 中信建投证券研究发展部

其中，锗因为能隙太小，允许的工作温度上限仅为 70℃，不是主流的功率器件材料；**硅综合性能均衡、单晶生产成本低、易制备二氧化硅绝缘层，是最广泛应用的半导体、功率器件材料**；**碳化硅（晶体结构多样，其中 4H 晶型综合性能最优越）禁带宽，击穿场强大，虽然电子迁移率稍低但可进行更重的掺杂，也可制备二氧化硅绝缘层，且热导率高便于散热，故耐高压大电流、有更低的导通和开关损耗，性能优越，成本高**；**氮化镓高频特性好，但以碳化硅为衬底外延是主要生产方法，成本更高，且热导是短板。综合各种因素，硅和碳化硅最适于作为新能源汽车功率半导体的基础材料。**

3、硅基 IGBT、碳化硅基 MOSFET 承担新能源汽车功率半导体重任

常用的功率半导体器件包括功率二极管 (Power Diode, 含 pin 二极管/肖特基二极管)、双极型晶体管 (BJT)、晶闸管 (SCR)、门极可关断晶闸管 (GTO)、金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等。不同类型功率半导体器件的对电信号可控程度、驱动信号、有效信号波形、载流子参与导电情况可能不同。

图表14： 功率半导体器件分类

| 区分指标 | 类型 | 器件 |
|-----------|-------|-------------------|
| 对电信号可控程度 | 不可控型 | 功率二极管 |
| | 半控型 | SCR |
| | 全控型 | GTO、MOSFET、IGBT |
| 驱动信号 | 电压驱动型 | IGBT、MOSFET |
| | 电流驱动型 | SCR、GTO |
| 有效信号波形 | 脉冲触发型 | SCR、GTO |
| | 电子控制型 | MOSFET、IGBT |
| 载流子参与导电情况 | 单极型 | MOSFET |
| | 双极型 | 功率二极管、SCR、GTO、BJT |
| | 复合型 | IGBT |

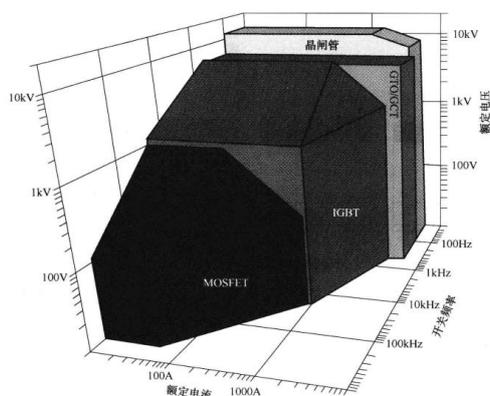
资料来源：电力电子技术馆、中信建投证券研究发展部

对使用同样基材的半导体器件而言，其能达到的开关功率和开关频率的乘积近似为常数。对硅而言，该常数约为 10^9 VA/s ：

$$P_{\text{sw-hard}} f_{\text{sw}} = V_{\text{max-hard}} I_{\text{max-hard}} f_{\text{aw}} \approx 10^9 \text{ VA/s}$$

上述经验公式指导下，不同器件的工作电流、工作电压和开关频率范围有所不同。

图表15： 硅功率半导体器件的额定电流、额定电压、开关频率范围



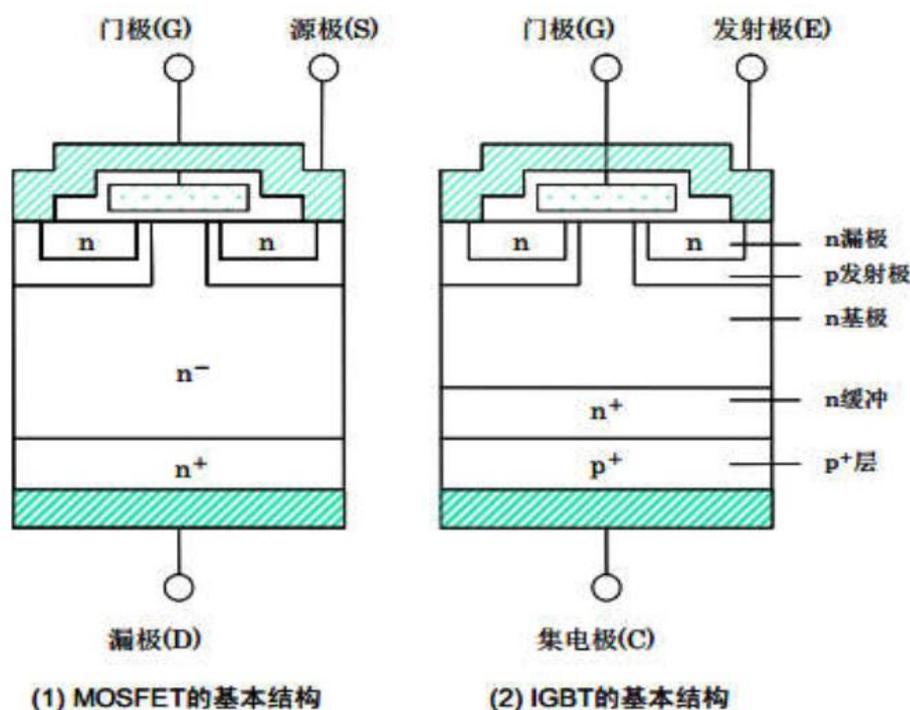
资料来源：功率半导体器件——原理、特性和可靠性，中信建投证券研究发展部

MOSFET 的开关速度快、开关损耗低、工作频率高、所需驱动功率小、驱动电路简单，不存在二次击穿问题。但硅基 MOSFET 在高压应用时，导通电阻随耐压的 2.5 次方急剧上升，故额定电流和额定电压较小，只

适用于不超过 10kW 的电力电子装置（对应于汽车应用领域的 12V 或 48V 系统），而对大功率的纯电驱动不适用。

所以，对于仍然采用硅基材的纯电动车型电控用功率半导体，有必要以较低的开关速度、较高的驱动功率与开关损耗、较复杂的驱动电路和二次击穿危险为代价，将栅极（即图中门极）通过一层氧化膜（p+层）与发射极实现电隔离，应用相当于 MOS 和 BJT 组合的，耐压能力、电流密度及最大功率更高，高压条件下导通电阻更低的 IGBT 器件。

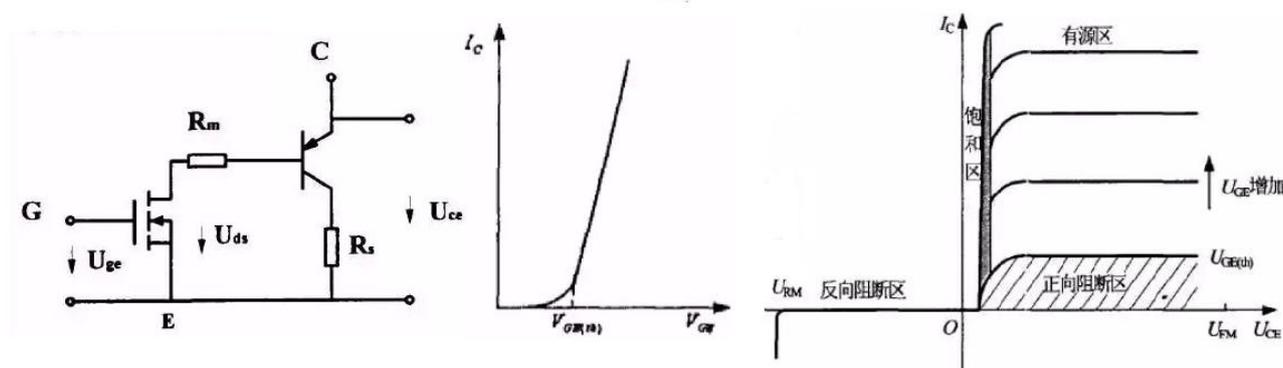
图表16： MOSFET 和 IGBT 的基本结构



资料来源: 中信建投证券研究发展部

IGBT 的导通和关断由栅-射极（即上图中源极）电压 U_{GE} 控制。其工作原理是栅极电压 U_{GE} 为正向电压且大于开启电压时，IGBT 中的 MOSFET 部分形成沟道，提供基极电流，器件导通， I_C 和 U_{GE} 大部分保持线性；而在栅极加零或负电压时，沟道消失，基极电流为 0，IGBT 关断。IGBT 导通电阻的降低是因为 PNPN 四层结构带来的 PN 结电调制效应。静态电气特性方面最高栅-射极电压受最大集电极电流限制，饱和区类似 MOS 结构特性有源区类似于晶体管特性，所以 IGBT 主要工作在饱和区（开）和正向阻断区（关）；而动态电气特性方面，器件导通需要经历栅极正向电压-基极电流产生-集电极电流产生的过程，故有两次延迟；器件关断时因为没有反向基极电流抽取过量载流子，故只能通过集电极传导，形成拖尾电流。综上，IGBT 可以满足逆变的基本需求，但开关速度、开关损耗等存在一定劣势。当前硅基 IGBT 系统的综合效率（以逆变器效率计）约 92%，相比于其峰值效率仍有一定差距。

图17: IGBT 的工作原理和静态转移/输出电气特性



资料来源: 一览众车, 中信建投证券研究发展部

对于试图利用 MOSFET 器件诸多优势的纯电动车型电控用功率半导体, 则需改变基础材料, 以相对昂贵的碳化硅为基材, 控制承压层深度和掺杂浓度等技术参数, 最终获得更高的工作电压及最大功率以及综合效率。当前碳化硅基 MOSFET 系统的综合效率 (以逆变器效率计) 约 98%。可以说在应用层面碳化硅基 MOSFET 相比于硅基 IGBT 具有本征优势。

综上所述, 硅基 IGBT 和碳化硅基 MOSFET 是多因素限制下新能源汽车功率半导体的适宜选择; 后者性能更强, 但成本也更高; 整车动力电池包越大、电机最大功率/峰值扭矩越高, 碳化硅基 MOSFET 的作用就越显著。

三、硅基 IGBT，新能源汽车功率半导体规模统治者

1、技术几经迭代，生产工艺复杂稳定

IGBT（硅基，下同）发明于上世纪 80 年代的美国，后引入日本、欧洲市场。自发明以来，其技术经过了数次迭代，芯片面积降低，饱和压降降低，最大工作频率提升，损耗降低。

图表18： 各代 IGBT 及主要技术指标

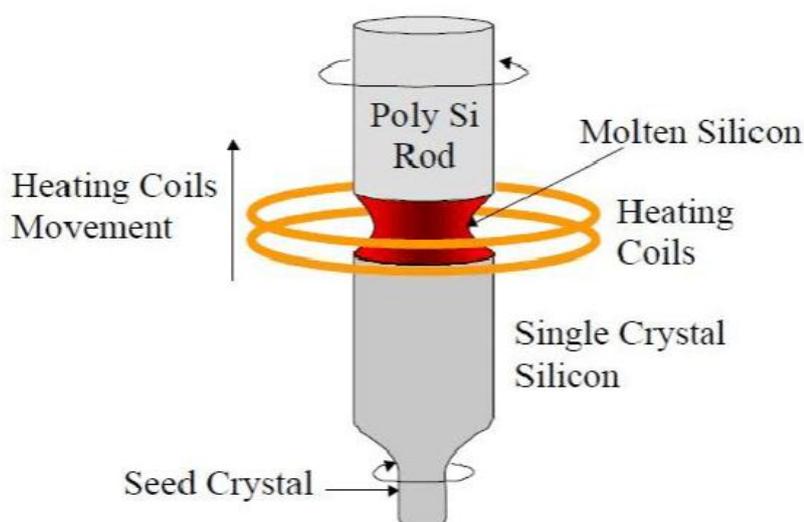
| 代别 | 技术类型 | 芯片面积 (相对值) | 工艺线宽 (μm) | 通态饱和压降 (V) | 关断时间 (μs) | 损耗 (相对值) | 出现时间 |
|----|-------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|-------------|------|
| 1 | 平面穿透型 (PT) | 100 | 5 | 3 | 0.5 | 100 | 1988 |
| 2 | 改进平面穿透型 | 56 | 5 | 2.8 | 0.3 | 74 | 1990 |
| 3 | 沟槽型 (trench) | 40 | 3 | 2 | 0.25 | 51 | 1992 |
| 4 | 透明集电区非穿透型 (NPT) | 31 | 1 | 1.5 | 0.25 | 39 | 1997 |
| 5 | 电场截止型 (FS) | 27 | 0.5 | 1.3 | 0.19 | 33 | 2001 |
| 6 | 沟槽型电场截止型 (FS-Trench) | 24 | 0.3 | 1 | 0.15 | 29 | 2003 |

资料来源：中信建投证券研究发展部

IGBT 芯片的生产属于典型的半导体工艺，需要晶体生长、掺杂、氧化和掩蔽、边缘终端处理、钝化等基本过程。

高纯单晶硅衬底采取区熔法生长后切得。

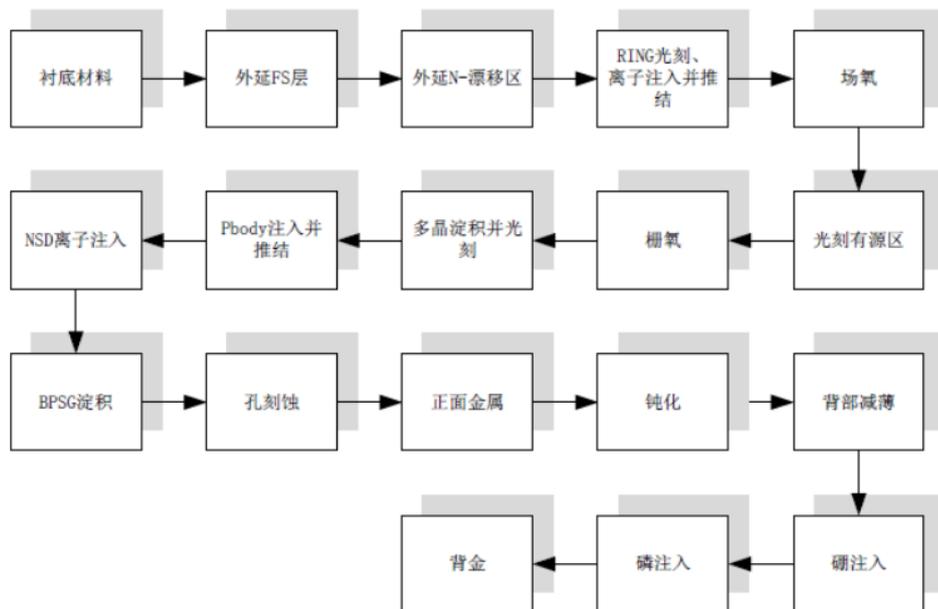
图表19： 区熔法制备高纯硅晶棒示意图



资料来源：中信建投证券研究发展部

后续掺杂多使用离子注入方式；工艺次序为先正面再背面。除全程高洁净度要求外，衬底背面工艺中的减薄极易使硅片破碎、翘曲，加工工艺非常重要。

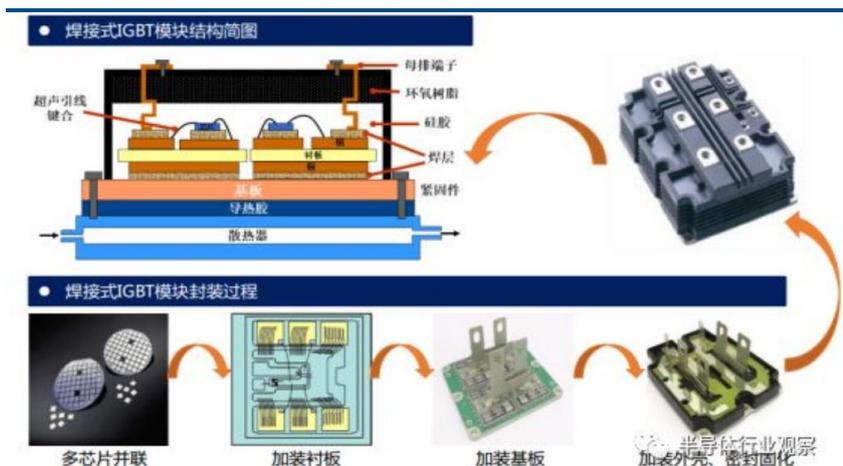
图表20：典型 IGBT 芯片的制造工艺流程



资料来源：海飞乐，中信建投证券研究发展部

IGBT 芯片经多芯片并联、衬板加装、基板加装、外壳加装、硅胶固化密封等封装工艺后，形成 IGBT 模块。鉴于车用 IGBT 的散热效率要求比工业级要高得多，同时要考虑强振动条件，因此封装要求远高于工业级别。定制化模块封装、双面冷却集成等手段是进一步提升 IGBT 模块综合性能的可行方向。

图表21：典型 IGBT 模块的封装工艺流程

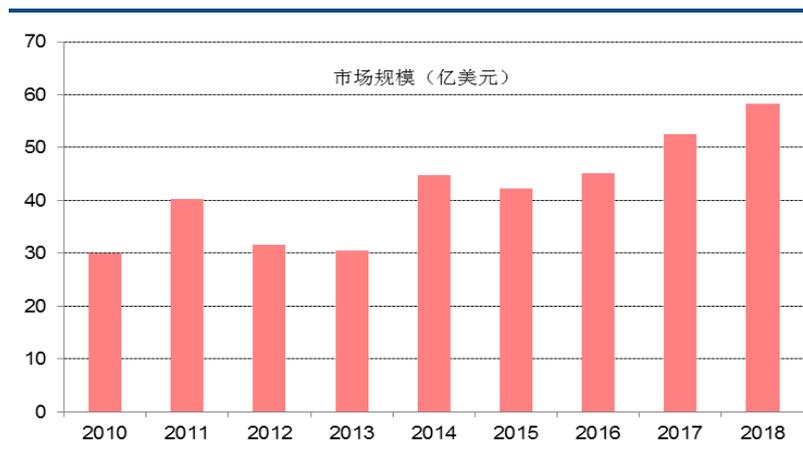


资料来源：半导体行业观察，中信建投证券研究发展部

2、国际巨头规模领先，自主企业日夜兼程

IGBT 市场是半导体市场、功率半导体市场的重要组成部分。2018 年，全球半导体市场规模达 4688 亿美元，其中功率半导体市场 717 亿美元，2018 年 IGBT 市场约 58 亿美元，其中汽车用 IGBT 占比约为 1/4。

图表22： 历年全球 IGBT 市场规模

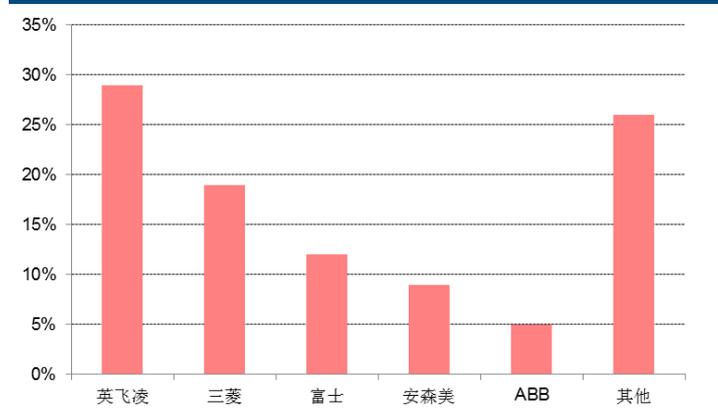


资料来源: 英飞凌, 智研咨询, 中信建投证券研究发展部

根据市场研究机构 Strategy Analytics 的数据，纯电动汽车的半导体成本约达 704 美元，相对于传统汽车的 350 美元增加了 1 倍，功率器件成本为 387 美元，占比达到 55%。相比传统汽车新增的半导体成本中，功率器件成本约为 269 美元，占总增加成本的 76%。特斯拉 model X 双电机版使用了 132 个 IGBT 器件，总价值约 650 美元。我们估计，根据整车电机数量、电机动力性的不同，新能源汽车硅基 IGBT 单车价值量在近 1000 元到约 5000 元不等，占电控成本约一半。

全球 IGBT 市场的主要供应商包括德国英飞凌，日本三菱、富士，美国安森美，瑞士 ABB 等，CR5 约 70%。主要 IGBT 供应商多采取 IDM（国际整合元件制造商）模式，经营范围涵盖了 IC 设计、IC 制造、封装测试各个环节；也多和上游晶圆厂之间建立了紧密的联系，上游 12 寸电子级晶圆供应形势好。

图表23： 2017 年全球 IGBT 市场份额情况



资料来源: 赛迪智库, 中信建投证券研究发展部

我国 IGBT 对外依赖严重。根据智研咨询统计,2018 年我国 IGBT 芯片需求量为 7989 万个,而产量仅为 1115 万个。

国内 IGBT 企业主要有华虹宏力、中芯国际、中科君芯、士兰微、华润微电子、上海先进、株洲中车时代电气、比亚迪等。总体而言国内企业仍处在构建产业链、提高良率、追赶国际先进技术水平过程中,但也已有重大技术及市场应用成果。

比亚迪是中国唯一一家拥有 IGBT 完整产业链的车企:包含 IGBT 芯片设计和制造、模组设计和制造、大功率器件测试应用平台、电源及电控等。其车规级 IGBT 4.0 产品已并批量化用于其“王朝”车型。2019 年底产能预计将达 5 万片/月,可以满足其全部新能源车型每年的需求且有富余产能。

图表24: 比亚迪车规级 IGBT4.0 芯片示意



资料来源:比亚迪, 中信建投证券研究发展部

和国际 IGBT 供应商建立合资公司也是保证产品供应的重要手段。如上汽集团和英飞凌成立上汽英飞凌汽车功率半导体(上海)有限公司,上汽集团持股 51%。现已实现 10 万套 IGBT 模块下线。

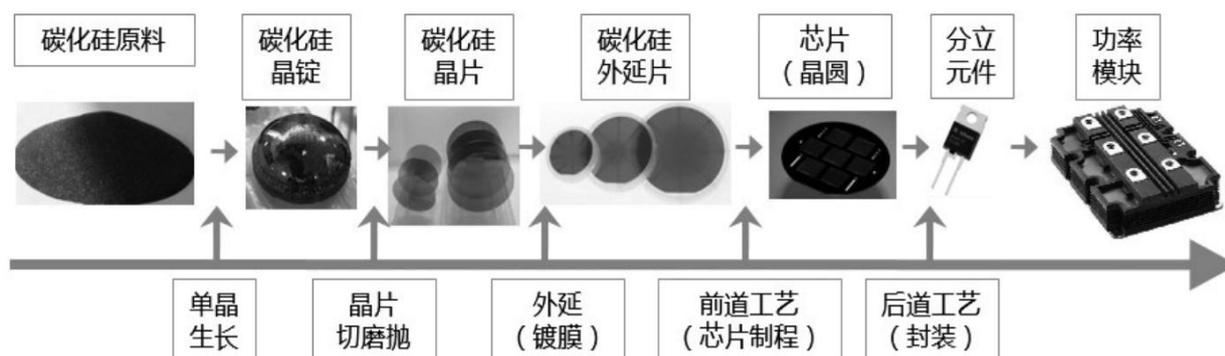
我们估计,自主硅基 IGBT 在我国新能源汽车市场中的份额有望逐步提升;类似于合资生产动力电池,合资生产硅基 IGBT 也将是未来产业整合的重要趋势之一。

四、碳化硅基 MOSFET，新能源汽车功率半导体性能翘楚

1、基体材料难度大，器件生产工艺复杂

碳化硅半导体产业链包含制取晶锭、切割镜片、外延生长、获取芯片、制造分立器件/模块等过程。

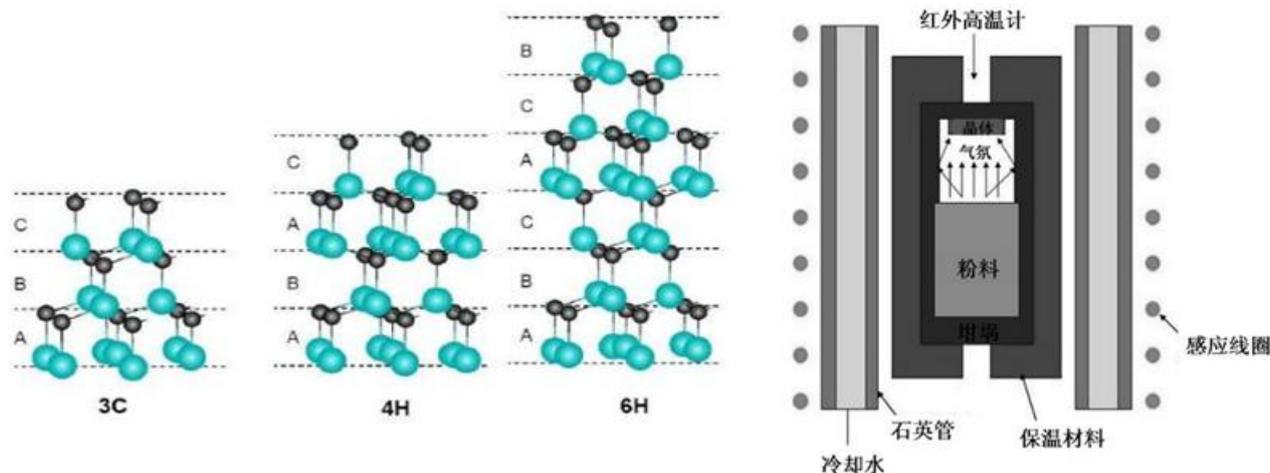
图表25： 碳化硅半导体产业链简图



资料来源: 中国知网, 中信建投证券研究发展部

单晶硅仅有一种晶体结构，而碳化硅已知的同素异形体数量逾 200 种。相对典型的碳化硅晶型是 3C、4H、6H 等。

图表26： 碳化硅单晶的典型同素异形体、PVT 法生产碳化硅单晶的典型设备示意



资料来源: 中国知网, 中信建投证券研究发展部

和单晶硅不同，碳化硅无法形成稳定的本征熔体（而会直接升华），故不可采用和单晶硅类似的本征材料提拉/区熔等方式制备；高温熔体混合物可能制备碳化硅单晶，但杂质不易控制。

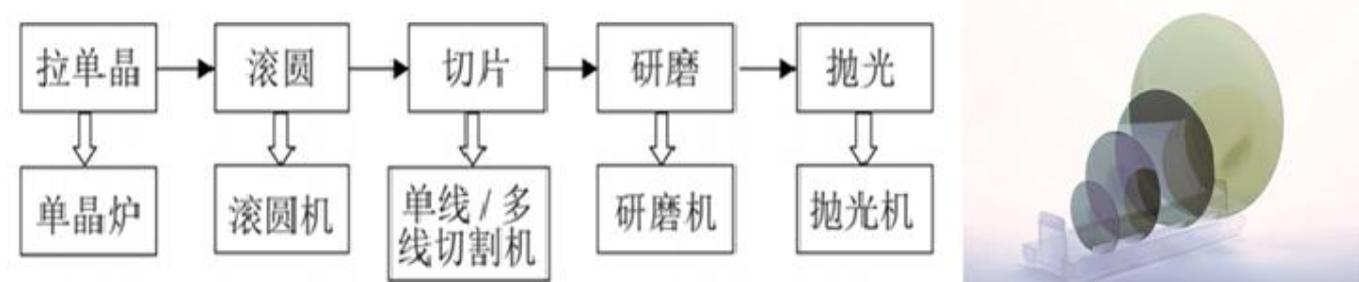
目前生长碳化硅单晶最成熟的方法是物理气相运输（PVT）法，其生长机理是：在超过 2000 °C 高温下将碳粉和硅粉升华分解成为 Si 原子、Si₂C 分子和 SiC₂ 等气相组分；在温度梯度的驱动下，这些气相物质被运输到

温度较低的碳化硅籽晶上形成较厚的晶锭（上述过程俗称拉单晶，但并非以提拉法制取材料）。

相比于提拉/区熔，PVT 法的物相控制难度更高，固/气组分更多，温度分布均匀性更差，所以高质量碳化硅晶锭的获得面临多种生长缺陷的威胁：多型，碳化硅多种晶型的吉布斯生成自由能相近，故易造成多型共生；微管，温度梯度、杂质粒子、籽晶和背底缺陷等易引发贯穿晶锭/部分晶锭的管道；工艺控制不当容易形成位错；原料中的杂质粒子可能嵌入晶锭；真空室中残留的氮气为晶锭的电阻率控制带来不确定性，可能需按要求加以掺杂调控补偿；如晶锭形状偏离圆柱状较多，则后续工艺的损耗也较多。总之，**在基体单晶材料制备方面，碳化硅面临的问题远多于硅**。加之晶锭直径较硅更小，8 英寸技术尚未成熟，碳化硅的成本高于硅。

碳化硅晶锭到晶片制造需要经过滚圆、切片、研磨、抛光等多个工艺步骤。高质量的晶片也是后续芯片高良率的基础。

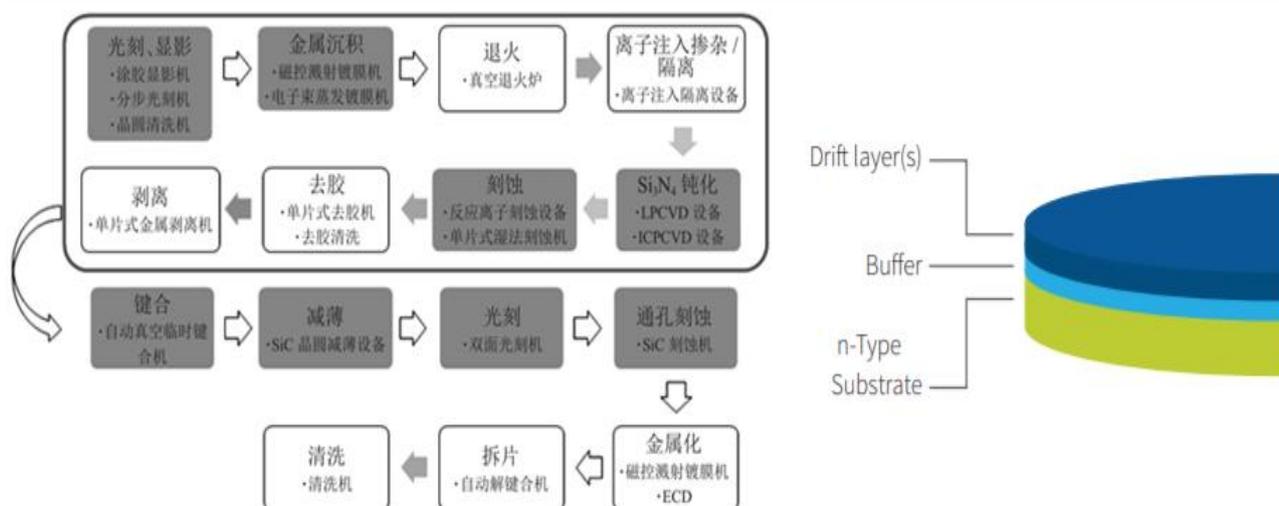
图表27： 碳化硅晶片（4H 导电型）、制造工艺流程及设备



资料来源:天科合达, 中国知网, 中信建投证券研究发展部

碳化硅基 MOSFET 芯片的制造需要在导电 4H-碳化硅衬底上外延生长 n 型漂移层，以高剂量离子注入形成高掺杂 n⁺源区、P 阱、MOS 沟道、欧姆接触区和保护层等。

图表28： 碳化硅衬底、功率器件制造工艺流程及设备示意

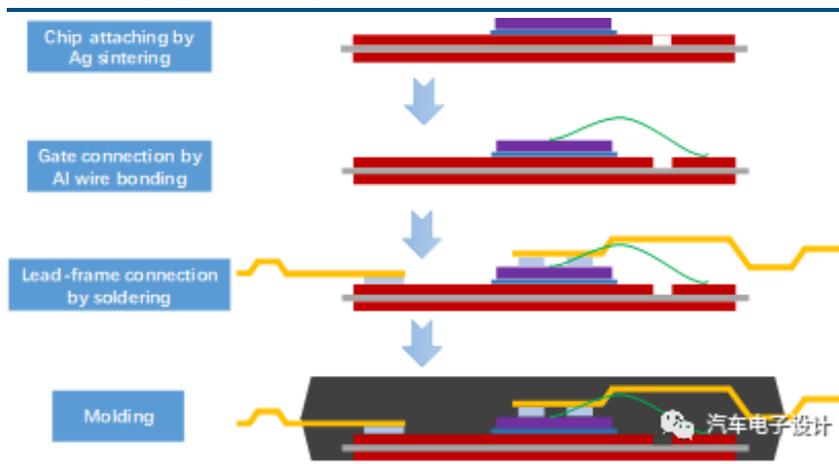


资料来源:Cree, 中国知网, 中信建投证券研究发展部

碳化硅基 MOSFET 芯片经封装工艺形成相应功率器件/模块。以特斯拉 Model 3 搭载的意法半导体碳化硅基 MOSFET 器件为例：芯片焙银连接至氮化硅基板；芯片门极采用标准铝线键合技术进行电气互联；采用铅焊料

回流焊工艺连接引线框架；塑封电镀等完成最终封装。

图表29：碳化硅 MOSFET 封装工艺

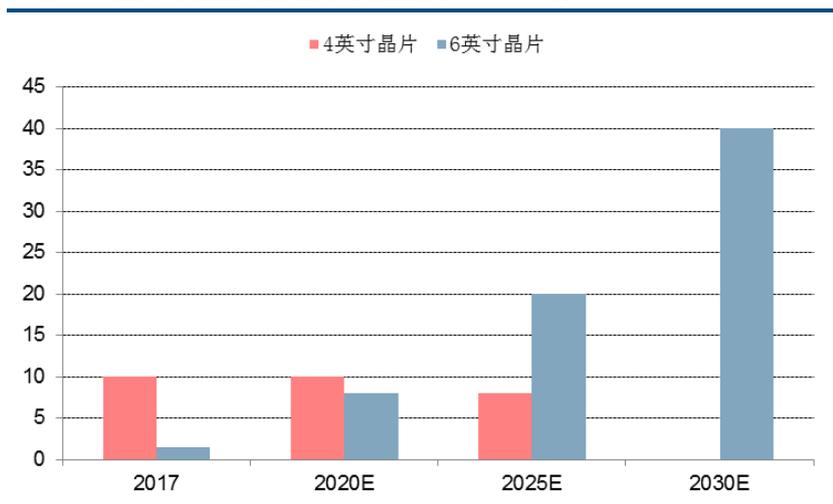


资料来源: 汽车电子设计, 中信建投证券研究发展部

2、产业成长期规模待爆发，Model 3 树立应用标杆

如前所述，碳化硅功率半导体产业尚处于成长期，单晶衬底（当前国际成熟技术水平是 4 英寸、6 英寸商用，8 英寸初步商用；国内是 4 英寸商用，6 英寸初步商用）是主要限制因素。据中国宽禁带功率半导体及应用产业联盟统计，2017 年，全球导通型 4 英寸碳化硅衬底销量约 10 万片，6 英寸约 1.5 万片；2020 年 4 英寸市场空间预计仍为 10 万片，但 6 英寸会增长至 8 万片；此后 6 英寸总量、份额都将逐步提升（未考虑 8 英寸技术进展）。

图表30：全球导通型碳化硅衬底销量估计（单位：万片）

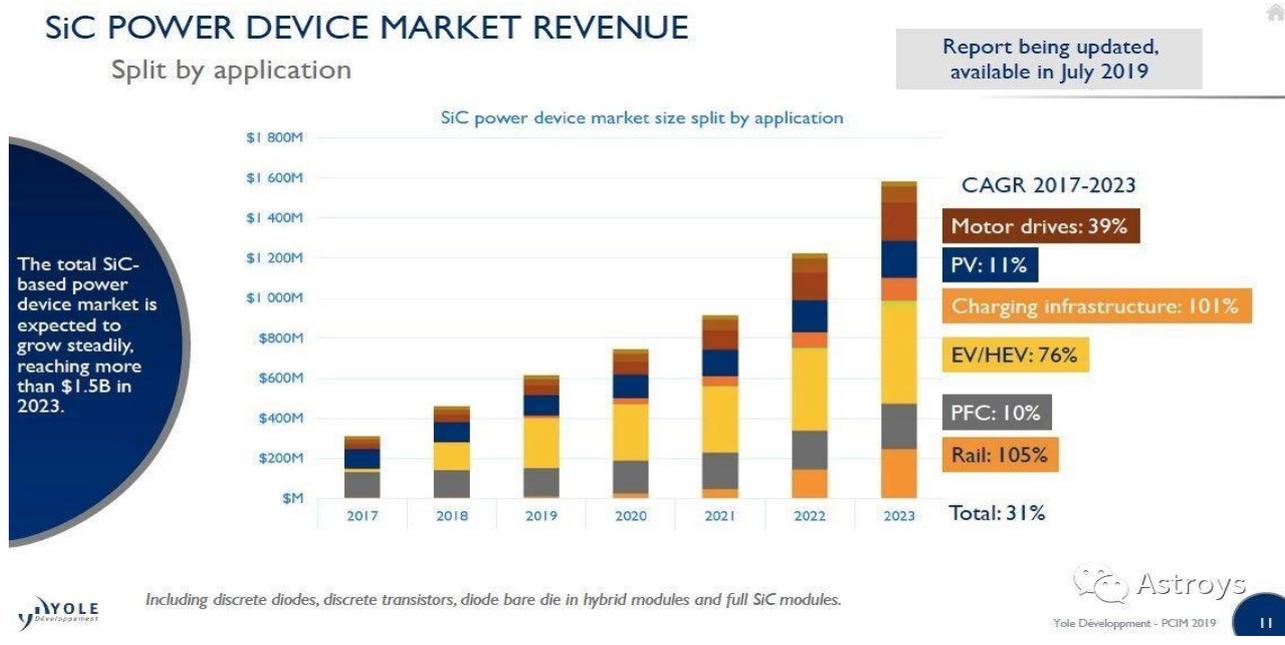


资料来源: 中国宽禁带功率半导体及应用产业联盟, 中信建投证券研究发展部

根据 Yole 报告估计，2018 年全球 EV/HEV 用碳化硅基功率器件市场规模约 1.7 亿美元。从特斯拉 Model 3 车型 2018 年销量反推，碳化硅基 MOSFET 单车价值量约 1300 美元。考虑到能效提升对同等工况续航条件下动力电池用量的节约作用，我们估计使用碳化硅基 MOSFET 比硅基 IGBT 实际的总成本提升在 100-150 美元。对

于定位在 10 万元级别以及以下的车型而言，使用碳化硅基 MOSFET 仍有一定成本压力，对于定位在 30 万元乃至更高的车型而言，鉴于消费者对工况续航、整车动力性的要求较高，所以动力电池搭载量较大，电机最大功率/峰值扭矩较高，碳化硅基 MOSFET 对整车极限性能的提升有相当程度的帮助。

图表31： 碳化硅功率器件市场规模估计



资料来源:Yole, Astroys, 中信建投证券研究发展部

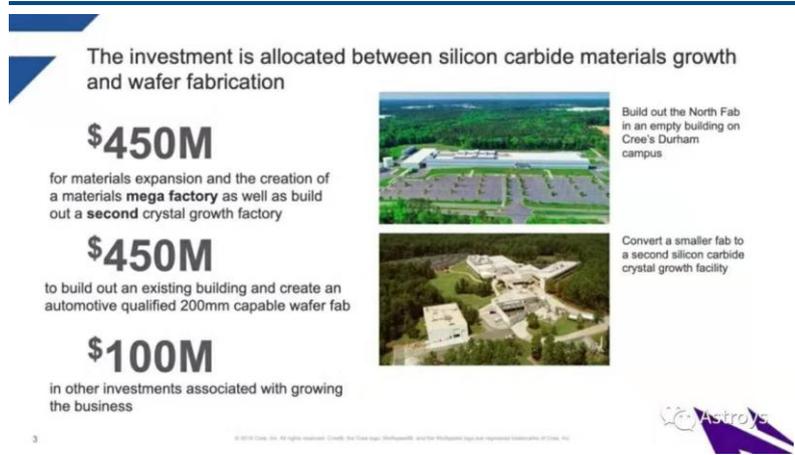
国际碳化硅功率半导体相关厂商主要包括单晶衬底企业 Cree、DowCorning、SiCrystal、II-VI、罗姆、新日铁住金、Norstel 等；外延片企业 DowCorning、II-VI、Norstel、Cree、罗姆、三菱、英飞凌等；器件/模块企业 Cree、英飞凌、罗姆、意法半导体、安森美、电装、富士、三菱等。总体而言，Cree 是全球碳化硅相关技术的龙头企业。

国内碳化硅功率半导体相关厂商主要包括单晶衬底企业山东天岳、天科合达、同光晶体、中电科等；外延片企业天域半导体、瀚天天成等；器件/模块企业中车时代电气、世纪金光、泰科天润、扬杰电子；设备企业北方华创、沈科仪等。

碳化硅在新能源汽车方面的应用引发业界关注并有实质性动作。如 Cree 积极扩大其 SiC 衬底产能并将业务重心从 LED 向功率器件转移，成为大众 FAST（未来汽车供应链）项目合作伙伴，和安森美签署多年期协议为其供应 6 英寸衬底及外延片，扩大和意法半导体的长期订单；意法半导体收购 Norstel 部分股权；丰田和电装、富士、三菱合作开发碳化硅 MOSFET；博世拟用其位于罗伊特林根的半导体制造厂生产碳化硅晶片；华为战略投资山东天岳获 10% 股权，北方华创向天岳批量供应 6 英寸单晶炉，产品缺陷控制情况较好；比亚迪也在进行碳化硅基功率半导体相关技术研发。

我们认为，碳化硅基 MOSFET 在新能源汽车上的应用格局还远未确定。自主和国际先进水平虽有差距，但突围提供部分国产渗透率仍有相当可能。

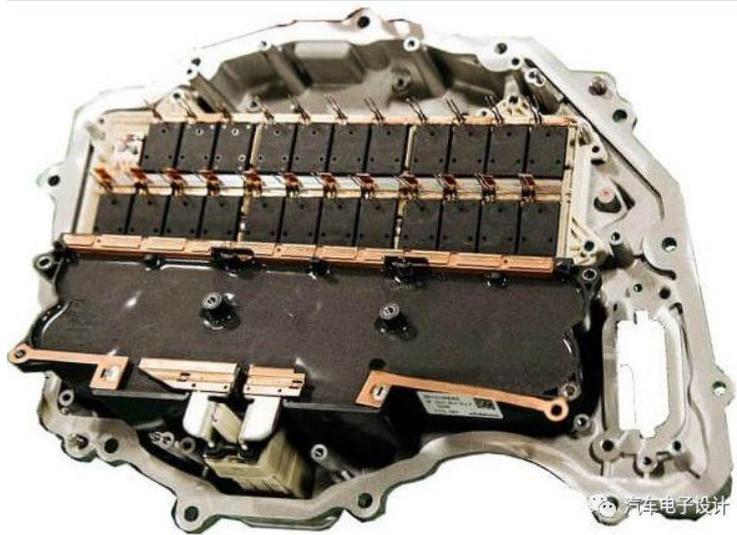
图表32: Cree 发布于 2019 年 5 月的 SiC 产能扩大计划



资料来源: Cree, Astroys, 中信建投证券研究发展部

截至目前，特斯拉 Model 3 是碳化硅基 MOSFET 在新能源汽车上面应用的成功案例。Model 3 的电控共搭载了 24 个 650V、100A 碳化硅基 MOSFET 功率模块，每个模块为 2 芯片并联。

图表33: 特斯拉 Model 3 使用的搭载碳化硅 MOSFET 模块的逆变器



资料来源: 汽车电子设计, 中信建投证券研究发展部

特斯拉在设计电控过程中，充分考虑了回路电感对开关速度、开关损耗、电气可靠性和功率密度的影响。以碳化硅基 MOSFET 为核心的高效电控是整车低电耗的有力保障之一。

五、新能源汽车规模增长品质提升，功率半导体如箭在弦

1、销量回调结构优化，产业发展无需悲观

补贴政策是我国新能源汽车产业发展的关键直接推动力。2019年，我国新能源汽车补贴全面大幅退坡。

以总量、增量地位均最重要的乘用车为例，2019年补贴标准对纯电动乘用车的工况续航里程门槛直接提升至250km。250km-400km档位车型补贴降至1.8万元，400km以上车型补贴降至2.5万元，度电补贴上限550元，国补退坡幅度在47%到60%之间；营运车型补贴7折；过渡期至6月25日，过渡期后取消地补。

2019年补贴调整系数方面，电池系统能量密度最高档位维持160Wh/kg，但最高系数为1倍；百公里电耗优于国家限值35%可获1.1倍补贴。调整系数也全面加严。

图表34：2018-2019年我国纯电乘用车补贴标准（系数-倍；金额-万元）

| 补贴关键参数 | 方案 2018 | | 方案 2019 过渡期 | | 方案 2019 | |
|------------------|-----------|---------|-------------|---------|-----------|---------|
| | 分档标准 | 补贴金额/系数 | 分档标准 | 补贴金额/系数 | 分档标准 | 补贴金额/系数 |
| 主要指标-续航里程 (KM) | 150≤R<200 | 1.5 | 150≤R<200 | 0.15 | 150≤R<200 | 0 |
| | 200≤R<250 | 2.4 | 200≤R<250 | 0.15 | 200≤R<250 | 0 |
| | 250≤R<300 | 3.4 | 250≤R<300 | 2.04 | 250≤R<300 | 1.8 |
| | 300≤R<400 | 4.5 | 300≤R<400 | 2.7 | 300≤R<400 | 1.8 |
| | R≥400 | 5 | R≥400 | 3.0 | R≥400 | 2.5 |
| 技术门槛- | E<105 | 0 | E<120 | 3.0 | E<125 | 0 |
| 电池系统能量密度 (Wh/kg) | 105≤E<120 | 0.6 | 105≤E<120 | 0.6 | 125≤E<140 | 0.8 |
| | 120≤E<140 | 1 | 120≤E<140 | 1 | 140≤E<160 | 0.9 |
| | 140≤E<160 | 1.1 | 140≤E<160 | 1.1 | E≥160 | 1 |
| | E≥160 | 1.2 | E≥160 | 1.2 | 无 | |
| 技术门槛-百公里 | 0%≤Q<5% | 0.5 | Q<5% | 0 | Q<10% | 0 |
| 电耗实际值优于政策上限的比例 | 5%≤Q<25% | 1 | 5%≤Q<25% | 0.5 | 10%≤Q<20% | 0.8 |
| | Q≥25% | 1.1 | 25%≤Q<40% | 1 | 20%≤Q<35% | 1 |
| | 无 | | Q≥40% | 1.1 | Q≥35% | 1.1 |
| 度电补贴限额 | 无 | | 无 | | | 0.055 |
| 插混乘用车 | | 2.2 | | 1.32 | | 1 |
| 地补比例 | 50% | | 50% | | 0% | |

资料来源：公开资料整理，中信建投证券研究发展部

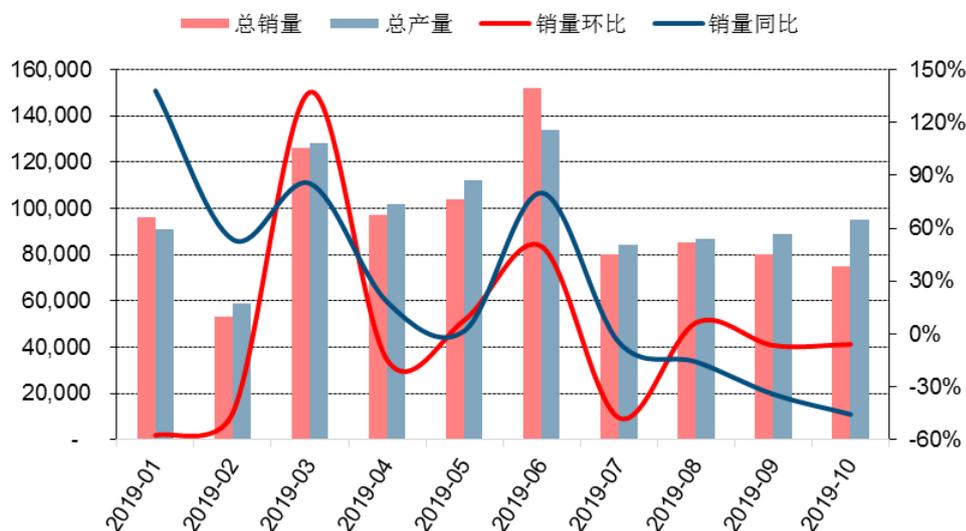
从补贴政策开始到2019年的最新调整方案公布，整车续航里程、电池系统能量密度、百公里电耗等技术指标增长/加严明显，“门槛”逐渐提升。

综合考虑，2019年1月-3月，乘用车的补贴标准为2018年标准；4-6月底，单车补贴约退至2018年的2/3；6月底以后，单车补贴约退至2018年的1/3。

2019年1-10月，我国新能源汽车产销分别为98.3万辆和94.7万辆。和补贴退坡节奏一致，新能源汽车市

场 2019 年下半年以来遇冷。经销商开始加库存，销量同比增速为负，环比未见明显增长。

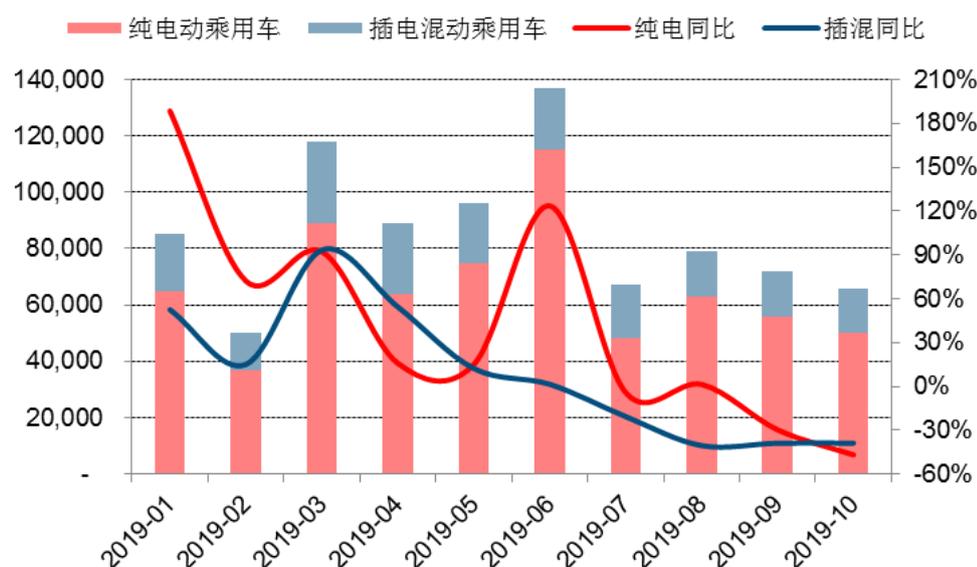
图表35： 2019 年以来我国新能源汽车产销情况



资料来源: 中汽协, 中信建投证券研究发展部

作为新能源汽车的主体部分, 2019 年 1-10 月, 我国新能源乘用车产销分别为 89.1 万辆和 85.8 万辆。其中纯电车型分别为 70.8 万辆和 66.6 万辆; 插混车型分别为 18.3 万辆和 19.2 万辆。下半年以来, 销量增速连续 4 个月同比为负。

图表36： 2019 年以来我国纯电、插混乘用车销量情况

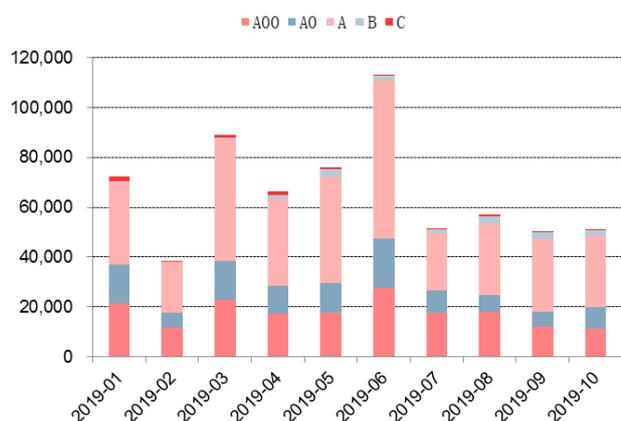


资料来源: 中汽协, 中信建投证券研究发展部

市场销量暂时遇冷, 但纯电乘用车车型结构向好趋势不变。2019 年以来纯电动 A 级车销量占比在纯电动内

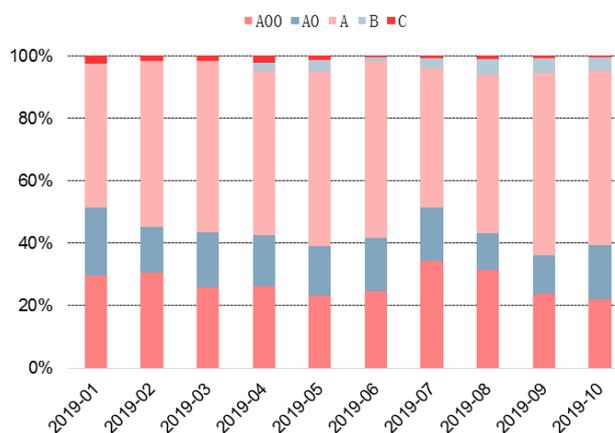
部持续高于 50%，销量占比远高于 2018 年全年的约 1/3 和下半年的约 37%。

图表37： 2019 年以来我国纯电动乘用车销量结构



资料来源：乘联会，中信建投证券研究发展部

图表38： 2019 年以来我国纯电动乘用车销量结构占比



资料来源：乘联会，中信建投证券研究发展部

2019 年以来，累计销量超过 15000 辆的新能源汽车包括北汽 EU 系列、EC 系列，比亚迪元 EV、E5，上汽荣威 Ei5、宝骏 E100，广汽 Aion S，吉利帝豪系列，长安逸动系列，江淮 iEV 系列，长城欧拉 R1，奇瑞 EQ 系列等。车型结构显著向好；当前我国质量较高的新能源汽车产品数量明显增加，和特斯拉 Model 3 相比也有亮点。

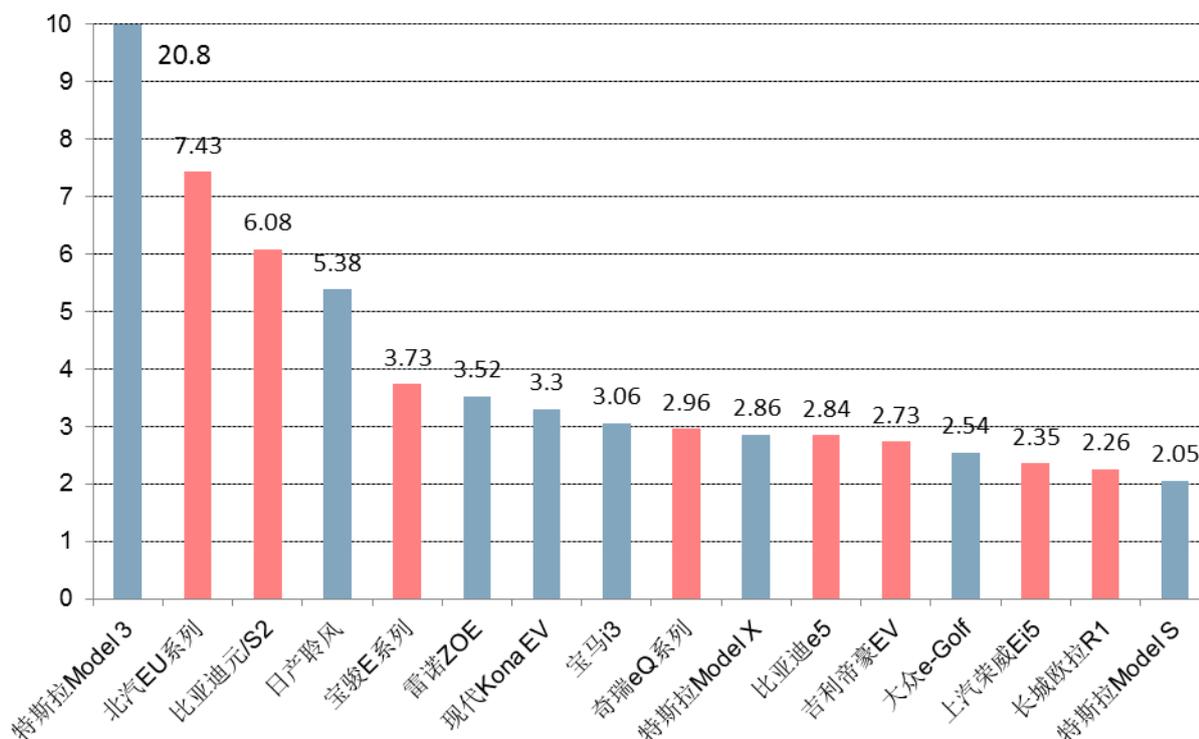
图表39： 典型纯电动乘用车性能指标

| 车企 | 车型 | 最大功率 (kW) | 峰值扭矩 (Nm) | 工况续航 (km) | 系统能量密度 (Wh/kg) | 百公里电耗 (kWh) | 整备质量 (kg) |
|-----|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-------------|-----------|
| 比亚迪 | 秦 Pro 2019 款 | 135 | 280 | 520 | 160 | 13.5 | 1710 |
| 比亚迪 | 唐 EV600 | 360 | 660 | 500 | 160 | 16.6 | 2295 |
| 上汽 | 荣威 Marvel X 全驱版 | 222 | 665 | 370 | 146 | 14.2 | 1759 |
| 广汽 | Aion s | 135 | 300 | 510 | 170 | 13.1 | 1625 |
| 广汽 | Aion LX | 150 | 350 | 650 | 180 | 15.8 | 2040 |
| 吉利 | GSE 2019 款 | 130 | 270 | 450 | 182 | 13.9 | 1635 |
| 吉利 | 几何 A | 130 | 270 | 410 | 142 | 13.2 | 1650 |
| 长城 | 欧拉 R1 | 35 | 125 | 310 | 160 | 10 | 990 |
| 长城 | 欧拉 IQ | 120 | 280 | 401 | 146 | 13.3 | 1480 |
| 北汽 | EU5 | 160 | 300 | 460 | 160 | 14.8 | 1680 |
| 北汽 | EX3 | 160 | 300 | 500 | 160 | 13.6 | 1640 |
| 长安 | 逸动 EV460 | 100 | 245 | 405 | 160 | 13 | 1650 |
| 特斯拉 | Model 3 长续航标准版 | 258 | 527 | 580 | 170 | 12.5 | 1847 |

资料来源：公开资料整理，中信建投证券研究发展部

2019 年 1-9 月，全球范围内销量超过 2 万辆的纯电动乘用车中，车型亮点突出，以品质或性价比，而非单纯廉价取胜的车型也占据绝大多数。

图表40： 2019年1-9月全球销量超过2万辆的纯电动乘用车（特斯拉Model 3超过标准，以数字示意）



资料来源: ev-sales, 中信建投证券研究发展部

可以认为，补贴退坡、有效需求增速降低是行业暂时面临的“数量困境”；但产品供给持续优化、中端车型需求坚挺则是行业长期发展前景可以保持乐观态度的强理由。

我们估计，2019年我国新能源汽车销量或达125-130万辆，其中纯电动乘用车或达95-100万辆；2020年，从全国新能源汽车保有量500万辆目标回算，考虑部分报废因素，新能源汽车销量或达150万辆，其中乘用车或达130-140万辆，纯电动乘用车或达110-120万辆；新能源汽车中，特斯拉Model 3、合资车企的纯电动乘用车、合资车企的插混乘用车或各有10万辆销量；自主品牌产品仍是市场的主要组成部分，自主品牌乘用车销量或达100万辆。

2、双积分助力规模增长电耗降低，功率半导体长期受益

补贴退坡后，我国新能源汽车长期扶持的方法是“双积分”政策，以新能源汽车取得新能源积分（NEV积分），需满足最低标准，可弥补燃油负分（CAFC积分），可摊薄油耗。现行“双积分”政策实行至2020年底，2021-2023年“双积分”政策（《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》修正案）已开始征求意见。

“双积分”修正案对CAFC积分进行了相当幅度的调整。关键点涉及汽车定义变更，工况调整与油耗目标、达标值更新，小规模、“快速进步”核算优惠等。

“双积分”修正案对NEV积分也进行了相当幅度的调整。关键点涉及单车积分计算方式、企业积分比例要求、新能源积分方面的“油电联动”、新能源汽车积分结转等。

单车积分计算方式方面，纯电动整车积分由在 CLTC 工况下的续航里程决定基准值，上限相比 2019-2020 年计算方式降低约 1/3；整车电耗不达标可获 0.5 倍调整，达标后随电耗降低调整系数增加，上限 1.5 倍。插电乘用车积分基准值上限相比 2019-2020 年计算方式降低约 1/5，但油耗、电耗一项不达标调整系数即修改为 0.5 倍。总体而言，纯电动、插电混动乘用车的积分授予更加严格；得分易，满分难。另外，燃料电池乘用车的积分上限有 20% 提升。

图表41： 2021-2023 年“双积分”政策（征求意见稿）对标准车型新能源积分上限的规定

| 车辆类型 | 标准车型积分 | 备注 |
|------------|------------------------|--|
| 纯电动乘用车 | $0.006 \times R + 0.4$ | (1) R 为电动汽车续驶里程（工况法），单位为 km。 (2) P 为燃料电池系统额定功率，单位为 kW。 (3) 纯电动乘用车续驶里程低于 150km 的，标准车型积分统一为 1 分。 (4) 纯电动乘用车标准车型积分上限为 3.4 分，燃料电池乘用车标准车型积分上限为 6 分。 (5) 车型积分计算结果按四舍五入原则保留两位小数 |
| 插电式混合动力乘用车 | 1.6 | |
| 燃料电池乘用车 | $0.08 \times P$ | |

资料来源：工信部，中信建投证券研究发展部

企业积分比例方面，在 2020 年的 12% 基础上，2021-2023 年积分比例分别调整为 14%、16%、18%，结合单车积分的降低，对新能源乘用车的保有量有了更强的扶持作用。

“油电联动”方面，对综合工况燃料消耗量低于政策要求的燃油乘用车在核算积分时按数量 0.5 倍计算（征求意见稿第二版修订）。亦即低油耗乘用车背负的新能源“配额”大幅降低。

新能源积分结转方面，2020 年后新能源积分跨年度结转比例为 50%。

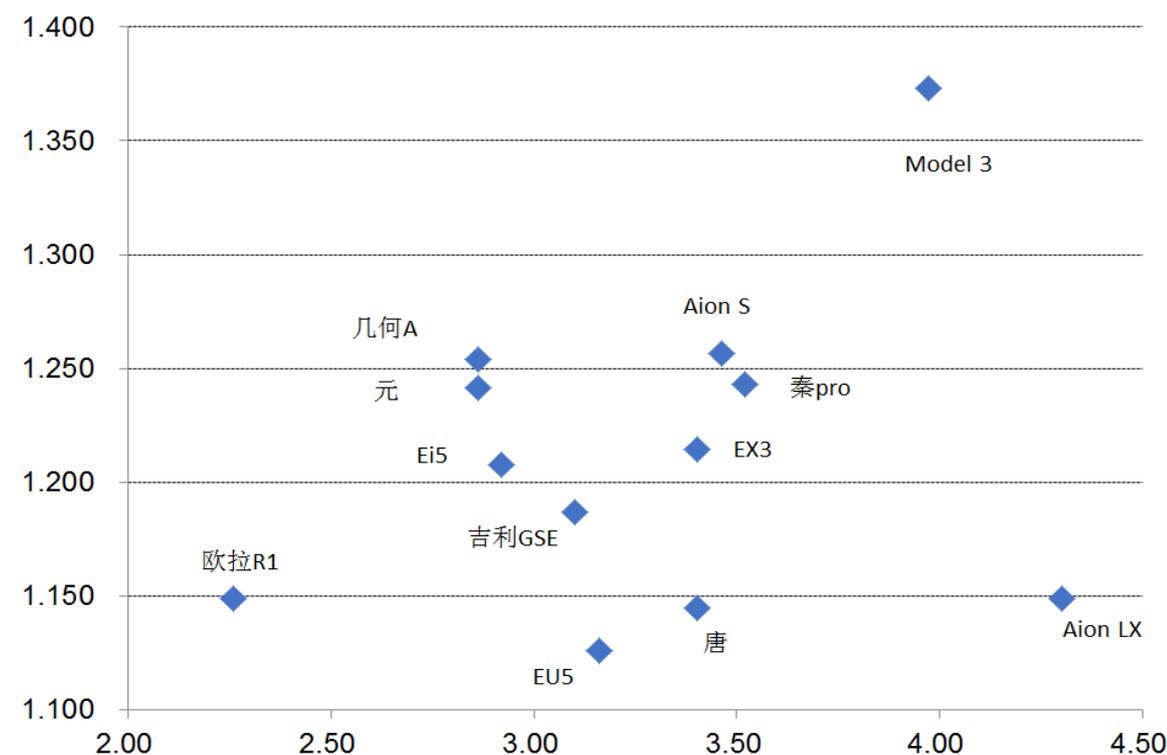
“双积分”修正案体现了国家对传统燃油乘用车和各类新能源汽车的共同指引：节能。燃油乘用车油耗低，则 CAFC 负积分低甚至为零，并有减少新能源汽车生产比例的优势；纯电动乘用车电耗低，则积分调整系数增加，单车积分总额增加；插电混动乘用车油耗、电耗双低，则积分可获取值也较高。

“双积分”修正案如和最终版本一致，则保证了新能源汽车的基本数量增幅。我们估计，在“双积分”修正案的要求下 2023 年我国新能源乘用车产量约 300 万辆，其中纯电动乘用车 200 余万辆；当年新能源乘用车销量相比于 2019 年估计约提升 1 倍以上；由“双积分”征求意见稿外推，至 2025 年，我国新能源汽车总产销规模约 450-500 万辆；至 2030 年或达 1000 万辆以上。

“双积分”修正案如和最终版本一致，则起到促进企业产品技术升级的作用，以节能降耗为代表的燃油、新能源车型技术进步是大势所趋。基于节油降耗的基本考虑，燃油车型优化各类机内技术，采用阿特金森发动机，降低风阻滚阻，以各类混合动力技术优化工况油耗等的重要性增加；基于提升 EC 系数的基本考虑，纯电

动车型优化三电系统效率，降低风阻滚阻，优化传动系效率的重要性增加；插混乘用车则需兼顾两者，动力构型的选择和技术优化重要性均有所提升。

图表42：典型新能源汽车积分基础值（横轴，理论公式外推不考虑上限）和 EC 系数*（纵轴）



资料来源: 中信建投证券研究发展部; *EC 系数计算暂以 NEDC 工况续航为计算基础

我们估计，自主品牌整车电耗至 2025 年有望在目前基础上再降低 10% 以上；电控中功率半导体在系统乃至整车层面的重要作用有望保持甚至强化。

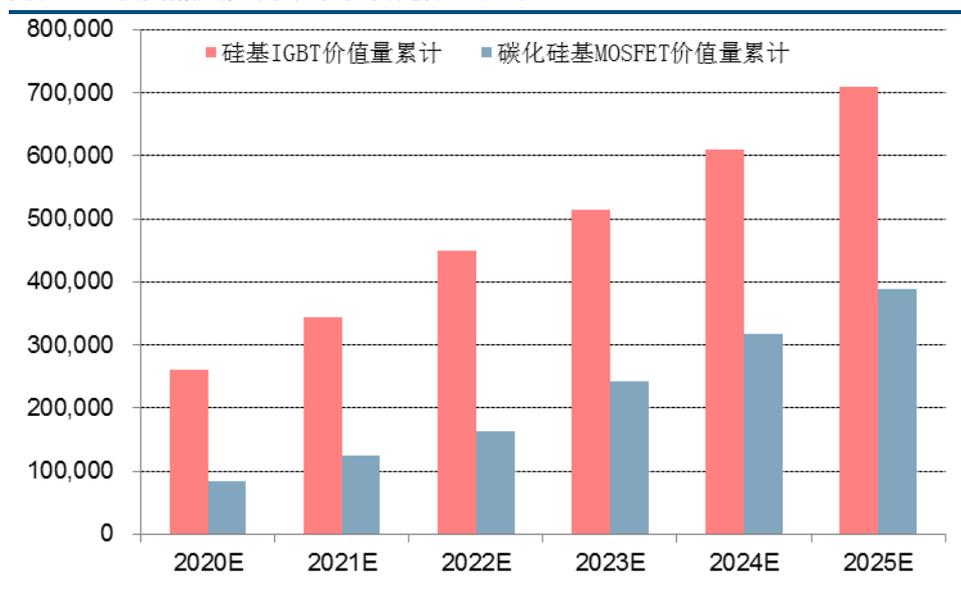
3、放眼长远，硅基 IGBT 仍是主流碳化硅基 MOSFET 中高端发力

我们根据我国新能源汽车市场的总量、结构演变来估计新能源汽车功率半导体市场空间的变化。基本假设如下：

2020 年、2023 年、2025 年我国新能源汽车产量分别为 160 万辆、320 万辆、480 万辆；2020 年-2022 年，只有少部分 B 级及以上车型采用碳化硅基 MOSFET，其他车型采用硅基 IGBT；估计 2023 年是 8 英寸碳化硅衬底技术商业化初步成熟之年，届时相当数量 B 级及以上车型采用碳化硅基 MOSFET，A 级及以下车型仍使用硅基 IGBT；硅基 IGBT 成本降幅为每年 4%（根据美国能源部 DOE《新能源汽车电机电控 2025 技术发展路线图》估计，2020 年电控成本 3.3 美元/kW，2025 年 2.7 美元/kW）；碳化硅基 MOSFET 成本每年降低 2%（碳化硅晶体生长复杂度高，规模化复制难度大，规模效应红利相对较小），但 2023 年一次降低 10%（对应 8 英寸衬底规模化应用降本）。

我们估计，至 2025 年，我国新能源汽车用功率器件市场规模在 100 亿元以上。其中硅基 IGBT 逾 70 亿元，碳化硅基 MOSFET 近 40 亿元。

图表43：我国新能源汽车功率半导体价值量估计（万元）



资料来源：中信建投证券研究发展部

功率半导体产业是我国新能源汽车产业中自主可控程度相对较低的环节。我们认为，随着我国新能源汽车产业的发展，销量提高、销量结构向好，新能源汽车用功率半导体的对外依赖度也将逐步降低。新能源汽车有望实现产业链全环节自主可控、全环节在竞争性市场中立足。

投资评价和建议

建议投资者关注和英飞凌成立合资公司生产硅基 IGBT 的上汽集团；关注独立开发应用新能源汽车用硅基 IGBT 并布局碳化硅基功率半导体的新能源汽车龙头；关注可批量供应高性能碳化硅单晶炉的设备龙头。

风险分析

新能源汽车销量、销量结构不及预期，硅基 IGBT 成本降幅不及预期，碳化硅衬底技术进步不及预期，功率半导体自主替代受阻，新能源汽车基础设施建设滞后，新能源汽车安全性风险。

分析师介绍

余海坤，清华大学工商管理硕士，8 年汽车产业经验，3 年汽车行业研究经验，汽车流通与后服务专家。曾在某汽车品牌担任销售总监负责北方市场销售管理工作，在某汽车电商负责全国线下渠道开发与品牌推广活动工作，并有汽车后市场 2 年创业经历，投资与研究领域涉及车联网 CRM、汽车金融、新能源电池材料、充电桩与 O2O 汽车服务等。2017 年加入中信建投证券。

报告贡献人

张亦弛，清华大学工学学士、博士，2 年能源材料领域实业工作经验，2 年清华大学下属研究院研究经验，储能技术与产业政策专家。承担了多项国家部委、地方政府、央企咨询项目，并为多个汽车、能源、材料领域投资项目提供咨询顾问服务。在学及就业期间发表多篇 SCI 及中文核心论文，申请多项国家专利并获得授权。2018 年加入中信建投证券。

研究服务

保险组

张博 010-85130905 zhangbo@csc.com.cn
郭洁 010-85130212 guojie@csc.com.cn
郭畅 010-65608482 guochang@csc.com.cn
张勇 010-86451312 zhangyongzgs@csc.com.cn
高思雨 010-8513 gaosiyu@csc.com.cn
张宇 010-86451497 zhangyuyf@csc.com.cn

北京公募组

朱燕 85156403- zhuyan@csc.com.cn
任师蕙 010-85159274 renshihui@csc.com.cn
黄杉 010-85156350 huangshan@csc.com.cn
李星星 021-68821600 lixingxing@csc.com.cn
金婷 jinting@csc.com.cn
夏一然 xiayiran@csc.com.cn
杨济谦 010-86451442 yangjiqian@csc.com.cn

杨洁 010-86451428 yangjiezs@csc.com.cn

社保组

吴桑 010-85159204 wusang@csc.com.cn

创新业务组

高雪 010-86451347 gaoxue@csc.com.cn
杨曦 -85130968 yangxi@csc.com.cn
李静 010-85130595 lijing@csc.com.cn
廖成涛 0755-22663051 liaochengtao@csc.com.cn
黄谦 010-86451493 huangqian@csc.com.cn
王罡 021-68821600-11 wanggangbj@csc.com.cn
诺敏 010-85130616 nuomin@csc.com.cn

上海销售组

李祉瑶 010-85130464 lizhiyao@csc.com.cn
黄方禅 021-68821615 huangfangchan@csc.com.cn
戴悦放 021-68821617 daiyuefang@csc.com.cn
沈晓瑜 shenxiaoyu@csc.com.cn
翁起帆 021-68821600 wengqifan@csc.com.cn
章政 zhangzheng@csc.com.cn
范亚楠 021-68821600 fanyanan@csc.com.cn
李绮琦 021-68821867 liqiqi@csc.com.cn
薛皎 021-68821600 xuejiao@csc.com.cn
王定润 021-68801600 wangdingrun@csc.com.cn

深广销售组

曹莹 0755-82521369 caoyingzgs@csc.com.cn
张苗苗 020-38381071 zhangmiaomiao@csc.com.cn
XU SHUFENG 0755-23953843
xushufeng@csc.com.cn
程一天 0755-82521369 chengyitian@csc.com.cn
陈培楷 020-38381989 chenpeikai@csc.com.cn

评级说明

以上证指数或者深证综指的涨跌幅为基准。

买入：未来 6 个月内相对超出市场表现 15% 以上；

增持：未来 6 个月内相对超出市场表现 5—15%；

中性：未来 6 个月内相对市场表现在-5—5% 之间；

减持：未来 6 个月内相对弱于市场表现 5—15%；

卖出：未来 6 个月内相对弱于市场表现 15% 以上。

重要声明

本报告仅供本公司的客户使用，本公司不会仅因接收人收到本报告而视其为客户。

本报告的信息均来源于本公司认为可信的公开资料，但本公司及研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证本报告所包含的信息或建议在本报告发出后不会发生任何变更，且本报告中的资料、意见和预测均仅反映本报告发布时的资料、意见和预测，可能在随后会作出调整。我们已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，不构成投资者在投资、法律、会计或税务等方面的最终操作建议。本公司不就报告中的内容对投资者作出的最终操作建议做任何担保，没有任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺。投资者应自主作出投资决策并自行承担投资风险，据本报告做出的任何决策与本公司和本报告作者无关。

在法律允许的情况下，本公司及其关联机构可能会持有本报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或类似的金融服务。

本报告版权仅为本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构和/或个人不得以任何形式翻版、复制和发布本报告。任何机构和/个人如引用、刊发本报告，须同时注明出处为中信建投证券研究发展部，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和/或修改。

本公司具备证券投资咨询业务资格，且本文作者为在中国证券业协会登记注册的证券分析师，以勤勉尽责的职业态度，独立、客观地出具本报告。本报告清晰地反映了作者的研究观点。本文作者不曾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收到任何形式的补偿。

股市有风险，入市需谨慎。

中信建投证券研究发展部

北京

东城区朝内大街 2 号凯恒中心 B 座 12 层（邮编：100010）
电话：(8610) 8513-0588
传真：(8610) 6560-8446

上海

浦东新区浦东南路 528 号上海证券大厦北塔 22 楼 2201 室（邮编：200120）
电话：(8621) 6882-1612
传真：(8621) 6882-1622

深圳

福田区益田路 6003 号荣超商务中心 B 座 22 层（邮编：518035）
电话：(0755) 8252-1369
传真：(0755) 2395-3859