

宽禁带功率器件在电动汽车中全面普及, 只差临门一脚

作者：路飞



2018年，随着特斯拉在Model 3车型的主驱逆变器中采用了意法半导体和英飞凌的碳化硅器件，示范效应被迅速放大。2020年国产比亚迪新能源汽车“汉”的电机控制器中也开始应用碳化硅MOSFET模块，成为国内首家“吃螃蟹”的车企。

如今新能源汽车市场已成为宽禁带功率器件的希望之源，被认为是重塑碳化硅和氮化镓(GaN)等新型功率半导体的关键。据多家研究机构预测，到2025年，用于电动汽车的碳化硅功率半导体将占总市场的37%以上(该数字2021年仅为25%)，而氮化镓功率市场规模也将从2020年的4800万美元增长到13.2亿美元，CAGR高达94%。

当前主流电动汽车功率器件对比

目前，电动汽车功率器件主要以硅基IGBT、MOSFET、氮化镓以及碳化硅MOSFET为主。这几种技术表现各异：

硅基IGBT优点是工艺成熟，高压大电流工况下性能优异，但是开关速度不快，小电流损耗偏大；而硅基MO-

SFET优点是工艺成熟，低压小电流条件下导通电阻比较低，同时速度也比较快，但是高压条件下导通电阻偏大；碳化硅MOSFET优点是高压器件的导通电阻相对比较低，开关速度比较快，电压范围更宽，效率更高；氮化镓

MOSFET的效率和功率密度更高。安森美汽车主驱功率模块产品线经理陆涛给出如上分析。

瑞能半导体资深碳化硅



安森美汽车主驱功率模块产品线经理陆涛



瑞能半导体资深碳化硅产品市场部经理邓佳佳

产品市场部经理邓佳佳认为，相较于硅基器件，碳化硅和氮化镓材料都有更快的电子迁移率，能应用于高频工作模式；有更高的电子伏特和电场强度，能实现高耐压低电阻性能。相比氮化镓和硅材料，碳化硅的热导率更高，所以碳化硅能轻松实现175甚至200摄氏度结温的器件，更适用于大电流、大功率以及散热条件严苛的应用。

“碳化硅导通电阻在高压小电流条件下比较低，故特别适用于新能源汽车的逆变器应用。但在高压大电流条件下就比较高，相对IGBT而言此时损耗会偏高，另外成本也偏高，”陆涛补充道。

市场上几种材料的功率半导体器件适用场景，如图1所示。

尽管碳化硅材料具有比硅更好的特性，在功率器件中所占的比重也在逐年上升，“但目前来看，基于碳化硅材料的功率半导体仅适用于高频率、高功率、高工作电压的应用场合，”而硅作为当前应用最广泛的半导体材料，在很多领域仍然具有不可替代性，罗姆半导体(北京)有限公司技术中心总经理水原德健认为。

以主要用于城市的电动汽车为例，采用硅基器件仍将是一个明智的选择，因为这类车型无需太长的续航里程，电机逆变器可以用更便宜且成熟的IGBT，其他功能可用超结高压MOSFET。时至今日，碳化硅仍是少数高端车才采用的技术。

但也有不同的声音。电池组给定条件下，碳化硅MOSFET能够延长续

材质	硅(Si)	氮化镓(GaN)	碳化硅(SiC)
禁带结构	间接带隙	间接带隙	直接带隙
禁带宽度(eV)	1.12	3.42	3.2
电子迁移率(cm^2/Vs)	600	2000	1000
介电常数	11.9	9	10.1
击穿场强(kV/cm)	0.4	3.3	2.8
电子饱和漂移速率($10^7\text{cm}/\text{s}$)	1	2.7	2.2
热导率($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$)	1.5	1.3	4.9
器件理论最高工作温度($^{\circ}\text{C}$)	175	800	600

航里程，还能实现更高的加速度和扭矩，从而有效减轻了旅程焦虑的困扰，“碳化硅功率解决方案为电动汽车的发展做出了巨大贡献，”意法半导体市场沟通经理Gianfranco DI MARCO表示。



意法半导体汽车和分立器件产品部、功率晶体管事业部市场沟通经理Gianfranco DI MARCO

比较中庸的观点是，随着碳化硅和氮化硅价格的下降，它们在系统层面上已可以与硅基器件进行成本竞争，没有哪一种解决方案可以通用，未来多年，宽禁带与硅器件将会共存。Power Integrations产品营销副总裁Doug Bailey则如此认为。

阻碍第三代功率器件普及的主要因素

虽然具有不少优点，但碳化硅或氮化镓等第三代半导体功率器件尚未在电动汽车中大规模普及，逐步开始的所谓规模应用也局限在车载充电器(OBC)和电驱等部分领域，为何？

《电子工程专辑》通过对各大功率器件厂商的采访，将其归结为以下几个主要方面：

1.制造难度高且产能不足

半导体器件制造链主要包括衬底→外延→设计→制造→封装。碳化硅是具有1X1共价键的硅和碳化物，在天然环境下非常罕见，虽然通过

人工合成可以制造，但受制于技术，长晶速度很慢。另外碳化硅莫氏硬度为13(仅次于硬度分别为14和15的碳化硼和钻石)，因此后段加工也极其困难。

另外，衬底制造难度也较大。衬底制造占到晶圆加工总成本的50%。良率低令碳化硅晶圆的主流尺寸一直是滞留在150mm(6英寸)，而200mm(8英寸)晶圆迟迟未能批量生产，导致产量上不去，无法满足下游需求。

6英寸与8英寸碳化硅生产的主要差别在高温工艺上，包括高温离子注入、高温氧化、高温激活等，还有就是这些高温工艺所需的hardmask(硬掩模)等。扩径到8英寸后，衬底生长难度会成倍增加；还有就是衬底切割加工问题；衬底尺寸越大，相应的切割应力、翘曲问题越显著。

数据显示，按6英寸计，目前全

球碳化硅晶圆年产能约在40~60万片。就特斯拉Model 3而言，不但主逆变器上的24个电源模块上需要用碳化硅，OBC、慢充充电器、快充充电桩等地方也都要用。折算下来，相当于每辆车就消耗掉半片晶圆。而该公司2022年度的交车计划为100万辆。如此一来，仅特斯拉一家就将全球碳化硅晶圆消耗殆尽。

2.业界存在高成本误区

人们通常都认为第三代功率器件的成本高，表面上看，这的确是事实。

就单颗器件而言，碳化硅价格相对于硅确实要高，但如果系统地看，就会发现误区。“市场应用已证明，使用碳化硅器件能提升整机系统性能。如果从整机系统角度去评估成本，800V电池的主驱系统采用碳化硅器件后，反而是性价比更高，”邓佳佳认为。

对于上述观点，水原德健也颇为

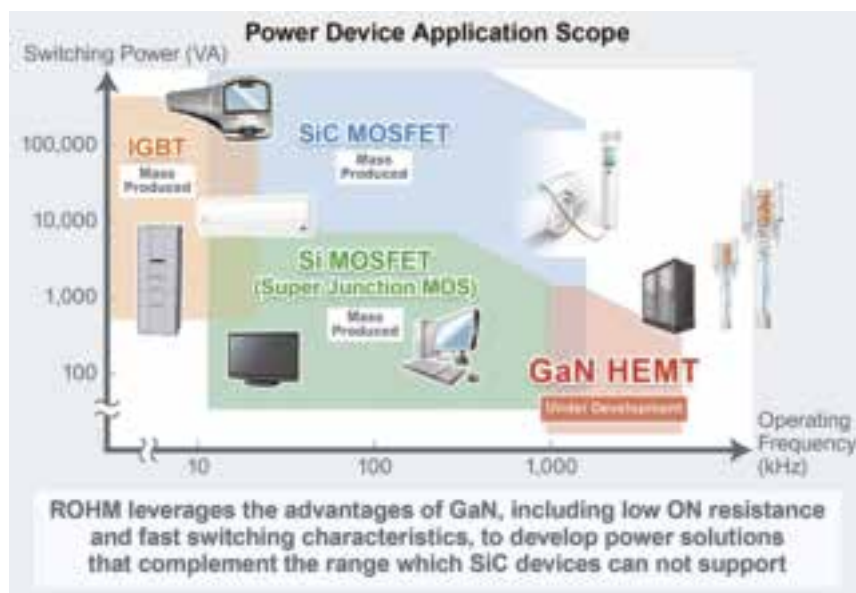


图1：各种主流功率元器件的适用分布。(来源：ROHM)

支持。相同输出功率的碳化硅成本虽高，但升级为碳化硅后，逆变器的效率可提升几个百分点，从而可减少电池的容量消耗，就电动汽车成本而言，电池的占比可是最高的。



罗姆半导体(北京)有限公司
技术中心总经理水原德健

数据显示，在新能源汽车中，就采用碳化硅MOSFET的90~350Kw驱动逆变器而言，增加的成本为75~150美元，但能给乘用车的前机舱让出更多空间，并降低整车重量。这就意味着车辆能耗降低，为电池、空间、冷却系统节省的成本高达525~850美元，可见系统性成本反而是显著下降。“虽然逆变器的成本略有增加，但通过采用减少电池容量的联合技术，也能够整体上实现低成本化，这对电池容量越大的车辆越有效，”水原德健补充道。

3.稳定性和可靠性尚待验证

随着碳化硅器件使用范围的不断扩大，汽车企商开始关心第三个问题，即宽禁带功率器件的稳定性和可靠性。

无论碳化硅还是氮化镓，目前都还是沿用硅IGBT的器件标准和封装技术。虽然目前进展令人满意，但在主逆变器中应用尚不成熟，现阶段量产上车的只有特斯拉、比亚迪和现代。就算是第一个搭载800V平

台的高压车型保时捷Taycan，也出于对整车可靠性的考虑，最终未采用碳化硅技术。

为提升可靠性和稳定性，各半导体厂商都开始对各类宽禁带功率器件进行工艺创新和升级。同时，也出现了一些提升可靠性的其他创新。例如，Power Integrations推出一款用于牵引逆变器的30W应急电源的碳化硅开关芯片。采用该芯片后，即便车载12V电池在车辆行驶过程中出现故障，牵引逆变器仍可继续工作，这对于提高系统可靠性很有帮助。

碳化硅开关速度较快，鉴于应用还偏少，衍生问题可能尚未完全暴露出来。“只有越来越多的整车企推广使用，才能带动半导体公司投入进一步的研究。通过经验和标准的双重加持，稳定性和可靠性才会有保证，”邓佳佳认为。

氮化镓能上车了吗？

同样作为宽禁带的氮化镓，非常适合电动车中的AC-DC车载充电器和HV-LV DC-DC转换器，但目前有效

耐压通常只能做到650V，热导率也远低于碳化硅，所以距离大规模应用还有一段距离。

但当前已有不少原厂和车企开始尝试在电动汽车中引入氮化镓器件，例如罗姆，除了力推碳化硅元器件外，也一直在开发中等耐压范围内具有出色高频性能的氮化镓器件。这是因为他们看中了氮化镓的一个明显特性——高工作频率(相对碳化硅会有较大提升)。在汽车电源等要求体积小、效率高的应用场景中会有较大优势。

那么碳化硅和氮化镓在新能源汽车中，未来究竟是互补，还是竞争？

邓佳佳从应用领域给出了如下分析：

当前新能源汽车上功率器件的主要应用领域包括主驱、OBC、高压转低压DC变换器，还有与之配套的充电桩四大部分。其中主驱部分对功率器件的综合性能要求最高——需要高效率、大功率，提升续航里程、机械动力；需要小型化，留给电池和其他系统足够空间；需要高可靠性，



图2：碳化硅和氮化镓适用分布。(来源：MDPI)

减少产品召回概率;需要优秀的高温器件,降低对系统散热条件的要求。

综合来看,电动汽车电池系统电压从400V过度到800V都是不可逆的趋势,而氮化镓的最大耐受电压一般不超过650V。原因是在硅或蓝宝石基底上生长的主要是横向氮化镓HEMT,仍然易受到表面击穿的影响。虽然高压氮化镓组件的商业化开发也正在进行中,但对于高功率应用,横向结构的芯片尺寸必然增加,或者氮化镓必须采用类似碳化硅和硅IGBT的垂直结构,也即需要采用同质氮化镓基底,目前这种结构的尺寸尚受限制,且成本较高。

由图2不难发现,氮化镓与碳化硅在潜在应用上可能有重叠、形成竞争的领域只能是功率等级只有几千瓦的OBC,以及高压转低压DC变换器两部分产品。在OBC和DC-DC变换器中,车规级氮化镓功率器件可能会取代具有相同电压参数的碳化硅器件,因为氮化镓器件可以提高这些应用的开关频率,从而提升电子系统的能效,并减小体积。

精巧的电子控制电路只需要几伏电压即可,所以氮化镓的高频特性将促使其在低耐压领域有所作为,作为碳化硅功率器件的补充,或许是氮化镓上车的机会。Doug Bailey认为,相对于碳化硅



Power Integrations产品营销副总裁Doug Bailey

的高压优势,氮化镓则在中等电压(例如400V电池系统)上具有竞争力。

此外,德州仪器(TI)、GaN Systems、安世等厂商也陆续推出了氮化镓产品,并与车企展开深度合作,预计近两年氮化镓将小批量渗透到低功率OBC、48V至12V DC-DC中。目前已经看到在轻混电动车(MHEV)中有48V系统标准化趋势,氮化镓有助于增加输电能力并减少电阻损耗。除了动力系统应用以外,氮化镓还将在激光雷达、车载信息娱乐系统等组件中有所表现。

Gianfranco DI MARCO则认为,氮化镓相关技术尚未完全符合汽车标准,所以在竞争力方面还不足以与主流材料相提并论。但当氮化镓技术达到汽车标准时,未来几年将会出现氮化镓、碳化硅与硅基功率器件三足鼎立的局面。

宽禁带半导体,哪种制造模式最优?

以意法半导体和罗姆为代表的垂直整合制造模式(IDM)厂商普遍认为, IDM最适合碳化硅和氮化镓等功率技术产品,因为可以向上游延伸,涉足材料领域。

意法半导体的Gianfranco DI MARCO表示:“IDM模式可以全盘掌控供应链,在企业内部能够生产一定比例的衬底。到2024年,公司40%的衬底需求由内部满足,其余则从几家供应商处采购。”他认为,这种模式可以提高供货的可靠性和安全性,进一步保证供货安全。

以6英寸碳化硅晶圆为例,衬底的价值约占一半,对供应链、技术、专利壁垒的要求很高。仅依靠外部厂商供应碳化硅衬底,可能会使企业面临不可预测的风险。所以意法半导体除了内部自主生产衬底计划和在意大利卡塔尼亚建立主厂之外,还在新加坡开建了第二个碳化硅晶圆厂。“在深圳和摩洛哥的布斯库拉(Bouskoura)设立封测厂也是这个道理,都是加强供应链韧性,以确保供货的可靠性和稳定性,” Gianfranco DI MARCO认为。

罗姆则利用IDM的优势,致力于碳化硅晶圆的大口径化来降低成本,在今年3月提出“8英寸新一代SiC MOSFET的开发”方案,旨在通过增加晶圆面积来提升产能,另外,罗姆还在日本福冈县筑后工厂投建了新的制造厂房。“自2009年收购了德国碳化硅晶圆厂商SiCrystal公司以来,罗姆构筑了从碳化硅衬底外延晶圆到封装的‘一条龙’生产体制,这有利于提升生产效率。”水原德健表示。

截至目前,全球仅有7家企业能够生产8英寸碳化硅衬底,包括英飞凌、Wolfspeed (Cree)、罗姆、意法半导体、II-VI(高意)、Soitec以及中国的烁科晶体。前不久, Wolf speed宣布其位于美国纽约州Mohawk Valley的碳化硅晶圆制造工厂正式开业,据称这是全球最大的8英寸碳化硅晶圆厂。

瑞能半导体和安森美认为, IDM和Fabless+Foundry的模式各有优

势。各家可以根据公司生产能力、生意规模、产出时间、投资偏好等因素，寻求不同的生产模式。

瑞能采用的是“虚拟IDM模式”，一方面借助Foundry成熟的工艺及丰富的经验，一方面积极与外延和衬底厂商深度战略合作，以此制定瑞能的特色设计路线。这种模式以制造为基点，IC设计公司制造、封测厂深度合作，依靠产业链各环节的快速响应来提升产业推进效率。随着台积电、联电等在该领域的积极布局，这种模式也被不少业内人士看好。邓佳佳表示，采用虚拟IDM模式，可以借助Foundry的专业经验，提供性能更稳定可靠的产品，还能加强定制应用与设计的沟通。

不过，无论是IDM还是Fabless+Foundry，都属于上游厂商之间的游戏，对于雨后春笋般的新能源车企来说，更看重的则是如何实现其品牌差异化！于是，已演进出来被多位受访人认可的第三种制造模式，即与车企直接合作的定制模式。这种模式的示例不乏如下：

- 比亚迪自建产线

该公司于前年自建碳化硅产线，技术如今已迭代至第三代，预计明年其旗下电动车将全面替代硅IGBT，改搭碳化硅电控；

- 苏州亿马半导体

与一汽集团合作

去年建立了碳化硅功率模块生产研发和宽禁带技术实验室；

- 正海集团与罗姆合作

于去年10月成立上海海姆希科半导体有限公司，主营以碳化硅为核心的功率模块业务；并对正海旗下的逆变器和模块开发技术与罗姆的模块生产技术及先进碳化硅技术进行了融合；

- 北京车和家汽车科技有限公司与湖南三安半导体合作

前不久宣布成立合营企业，从事新能源乘用车驱动电机控制器碳化硅芯片的研发，而三安半导体2021年投资160亿元的生产基地一期项目也已正式投产，据称这是国内首条、全球第三条碳化硅垂直整合生产线。

“双碳”机遇

随着中国碳达峰和碳中和的“双碳”目标的明确，作为全球名副其实的第一电动汽车大国，整个汽车行业迈向零排放的步子越来越大；今年4月，比亚迪已正式宣布停售燃油车；再加上汽车电池系统电压正在升级到800V，这些都会对宽禁带半导体产业起到助推作用，尤其是当下相对成熟的1200V碳化硅技术。

面临庞大的市场机遇，许多公司都在加速碳化硅产品的研发和部署。

为了抓住时间窗口，瑞能做了开发、验证、量产的权衡。邓佳佳表示，今年瑞能将着重开发车规级碳化硅产品，计划在下半年开始逐步量产。

Power Integrations最近也推

出了符合AEC-Q100标准、额定耐压1700V的碳化硅开关器件，适合于600V和800V级别的纯电池和燃料电池电动车。

罗姆早就开始布局碳化硅技术。2020年6月，该公司发布了其第4代低导通阻抗碳化硅MOSFET，适用于包括主机逆变器在内的车载动力总成系统和工业设备的电源。

同样，作为最早推出车规级碳化硅器件的企业之一，意法半导体公司目前正在执行90多个不同的碳化硅项目，其中大约50%涉及电动汽车平台，Gianfranco DI MARCO表示。

作为少数具备碳化硅垂直供应链的厂商之一，安森美为整个碳化硅供应链环节投入了大量的资源，包括基板衬底到最终产品的封装技术，尤其在收购SiC生产商GTAT之后，安森美进一步强化了其在碳化硅领域的优势，陆涛介绍道。

相较于硅基功率器件，目前宽禁带半导体的市场份额仍然很小，要全面普及，尚需应对当前产业链存在的一些问题。技术方面，要在衬底和器件方面同时发力；提高性能的同时，尚需继续降低成本；供应链方面则需要保证稳定输出，并与新能源车企优化协同合作，也是需要特别重视的一点。

所有这些，可能都是宽禁带半导体普及面临的挑战！ EET



文章链接
请扫描二维码