

功率半导体的未来： 高性能碳化硅 (SiC) 晶体管

过去几年来，基于碳化硅 (SiC) 的功率半导体解决方案的使用大幅增长，

这是半导体行业的一场革命。推动这一市场发展的动力包括以下趋势：

节能、缩减尺寸、系统集成和提高可靠性。

The use of SiC based power semiconductor solutions has shown a huge increase over the last years, it is a revolution to rely on. Driving forces behind this market development are the following trends: energy saving, size reduction, system integration and improved reliability.

作者：英飞凌科技股份有限公司Peter Friedrichs博士和Marc Buschkühle博士

碳化硅器件能够很好地应对上述所有市场挑战。全新宽禁带技术并非像前几代硅功率器件一样，是对现有技术的改良，而是有能力真正颠覆行业规则。基于碳化硅的系统能够确保性能实现质的飞跃，这对以创新和颠覆性的解决方案为目标的设计师来说具有极大的吸引力。结合碳化硅二极管的IGBT或超结MOSFET已在很多应用中成为标配，比如太阳能、充电桩或电源。这种快速硅基开关搭配碳化硅二极管的组合，通常被称为“混合”解决方案。近年来，英飞凌已经制造出数百万混合模块，而且这些混合模块已安装到各种客户产品中。世界首款混合模块就是基于英飞凌的EconoPACK封装平台在十几年前研发而出的。



图1：世界首款混合模块解决方案，2006年开始投产。

某些细分应用市场始终热衷于尝试采用新技术，而其他细分市场则会根据系统价值，在新技术的性价比具备足够的吸引力时才会转而采用新的先进技术解决方案。在采用碳化硅二极管的成熟设计用于高端电源后，英飞凌已认识到这项新技术最可能惠及光伏逆变器和升压电路领域。不间断电源

(UPS) 和充电桩等相关细分市场可能紧随其后。据预计，更多传统细分市场，比如电机传动、牵引和汽车应用（长远来看）未来对大规模采用新半导体技术兴趣盎然。

以往，能源效率是光伏逆变器取得成功的关键设计要素和营销亮点。碳化硅二极管，例如用作升压电路的一部分，是实现98%甚至更高能源效率的最佳解决方案。

现今，太阳能领域用半导体器件的主要趋势包括：通过降低开关损耗提升功率密度，减小散热片尺寸，提高工作频率和缩小磁性元件的尺寸。碳化硅二极管日益成为现代组串式光伏逆变器解决方案和微型逆变器的一个重要组件。近来，英飞凌的碳化硅二极管已升级至第5代。碳化硅二极管通过采用制程微缩方案取得了进一步发展，以提升成本吸引力。另外，与前几代产品相比，新技术的特性将为客户带来更多裨益，例如降低正向压降，从而减少导通损耗、提高承受浪涌电流能力和提高击穿电压等级。目前，混合模块解决方案是全球光伏逆变器的一个标配组件。因拥有超过15年的供货经验、骄人的业绩和可靠的大批量生产能力，英飞凌已成为本技术领域值得信赖的合作伙伴。

通过贯彻集成制造理念，即碳化硅芯片制造与量产化硅功率芯片共用相同的生产线，英飞凌能够保证碳化硅产品与硅产品具备相同的可靠性和工艺稳定性。另外，这一集成理

念带来了产量灵活性,这是能够在快速变化的细分市场应对新兴技术需求的关键因素。基于对系统的深入了解和重点关注于成本效益,通过优化硅基和碳化硅基半导体组合实现成功的产品立项已然成为可能。从仅依据半导体技术进行产品立项,向为目标系统量身定制解决方案的转变,被视为碳化硅在未来获得成功的关键因素。立足于自身在二极管技术领域的丰富经验,英飞凌将在今后几年推出类似的碳化硅晶体管。这是碳化硅迈向主流技术道路上的重要一步。如上所述,关键因素将包括:

- 成熟可靠的稳定性
- 极具吸引力的性价比造就显著的系统优势
- 批量生产能力
- 产品立项基于对系统的了解

过去几年来,相关深入研究主要旨在了解碳化硅的系统裨益。采用单极碳化硅晶体管的逆变器开关频率的提高,将大大减小磁性元件的体积和重量。英飞凌开展的一项研究表明,采用碳化硅器件的逆变器的体积,仅为目前的硅基标准解决方案的三分之一,重量为硅基解决方案的25%。

由于体积和重量大大减小,系统成本也可降低20%以上。

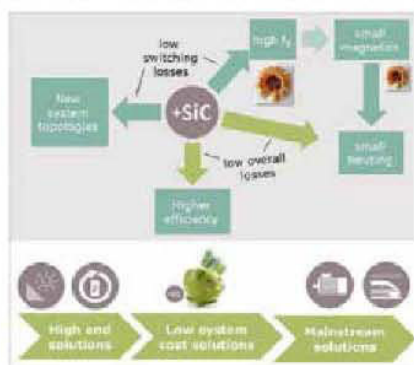


图2: 碳化硅在特定领域和应用中的裨益。

今后几年内,碳化硅解决方案将扩展到其他应用领域,比如工业或牵引传动。这得益于市场不断要求降低损耗,这不仅是为了提高效率,也是为了缩小封装体积,而封装体积的减小需要减小散热片尺寸。如图2所示,碳化硅已经用于高端和利基解决方案。发挥这些优势的设计将降低特定应用领域的系统成本。

未来,越来越多的应用将受益于采用碳化硅解决方案降低总体损耗这一优势。就这一点而言,下一步的重大举措将是推出碳化硅开关。要了解硅和碳化硅解决方案之间的差别,必须弄清楚一点:碳化硅器件属于所谓的宽禁带半导体器件。图3为硅和碳化硅材料的性能比较。快速单极肖特基二极管和基于场效应的碳化硅开关(MOSFET、JFET)的电压范围可以扩展到1000V以上。这一点之所以成为可能得益于碳化硅材料的固有特性:

- 可以减少高压肖特基二极管的泄露电流,这是因为

碳化硅肖特基二极管金属半导体势垒比硅基肖特基二极管高出一倍。

- 与硅基器件相比,单极碳化硅晶体管可以实现极具吸引力的比导通电阻,这是因为其击穿电场强度大约是硅基器件的10倍。

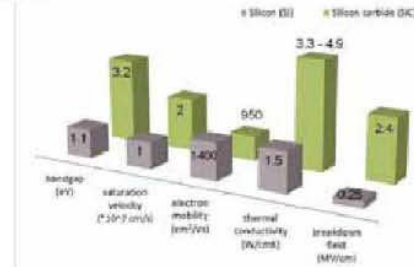


图3: 硅和碳化硅的材料性能比较。

图4显示了不同半导体在期望阻断电压下的最小比导通电阻(此处仅考虑漂移区,忽略衬底对电阻率的影响)。每条线的终点表示采用单极配置的指定半导体的电压范围,超结MOSFETS除外。

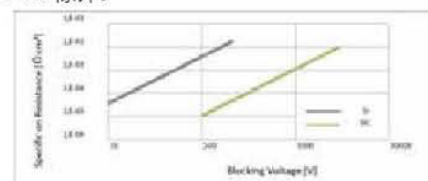


图4: 碳化硅基和硅基器件的导通电阻和阻断电压比较。

碳化硅晶体管将成为目前工业电力电子领域的成熟IGBT技术的一种极具吸引力的替代方案。碳化硅的独有材料特性,为实现无数载流子的单极器件设计创造了条件,它们可取代高阻断电压下需要电导调制的IGBT器件。这主要基于宽禁带提供的高临界电场。IGBT的损耗极限是由少数载流子的运动造成的。在MOSFET中,没有少数载流子参与导电。测量结果表明,碳化硅基MOSFET最高dv/dt可达100kV/μs以上。起初与IGBT相比,碳化硅晶体管在1200V及以上电压范围内优异的动态性能被视为最重要的优势。然而,最新研究结果表明IGBT技术具有重要潜力,正如英飞凌的TRENCHSTOP™5技术所彰显的那样。

然而从长远来看,IGBT和单极碳化硅开关的根本区别将受到越来越多的关注。两大主要区别在于:第一,输出特性的线性无阈值I-V曲线;第二,集成的体二极管可实现同步整流。基于这些特性,该器件在同步整流模式下提供无阈值导通特性。另外,所需组件数量减少一半。这大大减小了功率模块所需的占板空间。

从系统层面来说,无阈值导通特性具有重大的降低损耗潜力。很多系统在其寿命周期的大部分时间内均在部分负载条件下工作,与标准IGBT技术相比,碳化硅开关的导通损耗

将大大降低。即使在小于5 kHz的极低频率和 dv/dt 斜率不变的条件下,与目前的商用化IGBT解决方案相比,配备集成体二极管的无阈值开关在同步整流模式下损耗可能降低50%。损耗比较如图5所示。

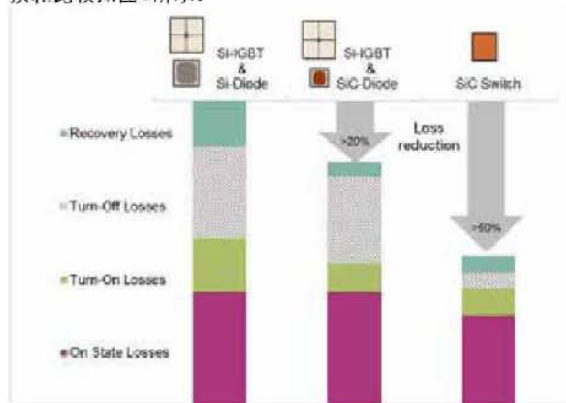


图5: 与IGBT相比,即便工作频率为5kHz,碳化硅开关的损耗也可降低一半(dv/dt 相似)。

显然,在无 dv/dt 限制和更高开关频率的应用中,损耗降低幅度更大。这在直流-直流升压或升/降压拓扑结构中十分常见,允许使用更小、更轻和更低成本的磁性元件。大量研究已经证明,在众多应用中,即使是使用更昂贵的功率开关,整体系统的物料成本也可得以降低。预计随着碳化硅元件成本不断降低,中期应用数量将有所增长。

碳化硅晶体管设计的目标在于尽可能地实现最低的单位面积导通电阻。这十分合乎逻辑,因为这一参数决定着成本,也间接影响芯片电容值造成的动态损耗。特定电阻的晶片越小,电容值越低。

高缺陷密度反映在碳化硅MOS器件的各种特质或特性中。例如,与硅基功率MOSFET相比,碳化硅MOS器件跨导特性较弱,且阈值电压较低。

另一个效应在于导通电阻非物理温度特性。物理研究表明,导通电阻会随温度的上升而上升。而现有的器件有时表现出与温度没有相关性,甚至存在负相关性。事实上,缺陷相关的电阻具有负温度系数,因此能够观察到不同的温度特性。导通电阻随温度增加的幅度越小,沟道缺陷对器件性能的影响就越大。降低缺陷对导通电阻的贡献,需要提高施加在栅极氧化层上的电场,通常会高于硅基MOS功率器件通用使用值。由于导通状态下的施加在氧化层上的高电场可能加速阻断能力下降,因此被认为是具有长期可靠性风险。

总体目标是在确保安全的氧化层电场条件下,仍能够发挥碳化硅器件的低导通电阻潜力。在导通模式下,其实现方式是抛弃缺陷密度较高的平面布局,选用其他更有利的表面布局。碳化硅 α 面的MOS通道的缺陷密度低至少10倍。出于

这一原因,一种可能的方式是采用与很多现代硅基功率器件类似的沟槽结构。除降低沟道电阻外,这类结构的单元密度比平坦表面要高,因此可提高材料利用率。另外,这还会降低面比导通电阻。然而,在沟槽结构元件中,沟槽角落氧化物承受的场应力是一个关键问题,特别是在碳化硅器件中,这可能是一个决定性的论据。普遍认为碳化硅半导体芯片的工作电场要比硅基解决方案高10倍左右。有效屏蔽临界区域的方法有很多,例如深pn元件。相比于DMOS面临的导通电阻困境,阻断状态下的挑战可以通过巧妙的设计应对。

强大碳化硅开关具有与硅基元件类似的成熟坚固性,将在电力电子应用领域迎来光明未来,即使新技术仍面临着新挑战。在早期阶段,业界仍需在以最佳和最有效地方式利用技术方面加入努力。挑战包括更快开关带来的电磁干扰问题,或更高功率密度造成的冷却挑战。后者是不可避免的,再加上芯片缩小的影响,这是预期的损耗降低效益无法抵消的。

有效解决这些问题对于加快碳化硅晶体管技术的渗透大有裨益。就这一点而言,至关重要,通过与客户合作最大程度简化这项新技术必需的设计和和实施过程。

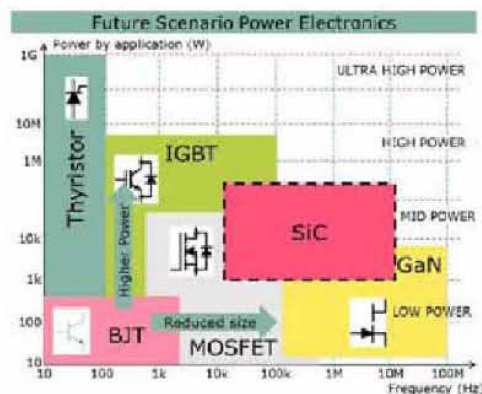


图6: 碳化硅开关市场1kW-500kW @ 10kHz-MHz。

显然,在功率半导体应用领域,新半导体技术将成为满足日益增长的提升功率密度和应用效率的需求的关键驱动因素。然而,完全代替硅基元件在未来几年不可能实现。宽禁带技术能够补充硅基解决方案,特别是新技术能够打开目前技术无法满足需求的新应用领域市场。碳化硅是面向阻断电压达到100V以上且额定功率高达数百千瓦的元件的工业级功率应用的一大主要创新,如图6所示。在市场上成功推出碳化硅二极管技术之后,碳化硅基晶体管将是下一个重要里程碑。到目前为止,业界期望宽禁带材料实现更高性能水平。要想迅速赢得市场认可,坚固性和系统导向产品功能将是关键因素。

www.infineon.com/power