

# SiC应用的成本分析



提到碳化硅（SiC），人们的第一反应是其性能优势，如电气（更低阻抗 / 更高频率）、机械（更小尺寸）和热性质（更高运行温度），非常适合制造很多大功率电子器件；如果说到应用，大多数人都会说它的成本太高，推广起来需假以时日，云云。

事实上，在一些有性能、效率、体积、散热，甚至系统成本要求的应用中，SiC 器件已开始在取代硅。

### **制造成本逐步走低已成大势所趋**

的确，就器件本身来讲，同等规格的碳化硅器件比硅器件单个管芯价格高三到五倍，但在一个晶圆上，碳化硅尺寸可以做得很小，平均每个器件的成本就会降低。

另外，随着良率的提升和采用更大尺寸的晶圆，一个晶圆上可以切割出来的碳化硅器件会更多。

况且，面对不断增长的市场需求，包括晶圆厂在内的众多碳化硅厂商已经意识到必须扩大投资，提升产能，以抢得市场先机。

随着科锐（Cree）、意法半导体（ST）、英飞凌（Infineon）及罗姆（ROHM）等日系厂商的加大投入，未来保证供货应该不成问题。

今天并不谈这些供应链上游的问题，而是从应用角度聊聊使用成本，看看在哪些应用中碳化硅已经抢占了先机，又是怎样节省了成本。

意法半导体汽车和分立器件产品部大众市场业务拓展负责人及公司战略办公室成员 Giovanni Luca Sarica 在回答碳化硅什么时候可以生产 300 毫米晶圆时表示：“目前 SiC 是在 6 英寸（150mm）晶圆上制造的，下一步是 8 英寸（200mm）。

当今电源解决方案市场井喷，电气化正在推动需求强劲增长。”



他说：“通过比较我们发现，电动汽车整车半导体平均总成本是传统汽车的两倍，而电动汽车 50% 的总成本与功率器件有关。

因此，对于功率芯片市场最大供应商之一的 ST 来说，通过制造 12 英寸（300mm）功率芯片来扩大硅片产能，增强产品竞争力，是非常具有战略意义的。

另一个重要的制造策略目标是将 SiC 从 6 英寸迁移到 8 英寸生产线。

今天还没有 SiC 在 8 英寸晶圆上制造的先例。

根据我们的产能扩张计划，8 英寸制造对于我们的整体战略非常重要。”

怎么解决 SiC 本身的成本问题呢？Giovanni Luca Sarica 回答：

“随着制造规模变大，SiC 技术改进，SiC 与硅之间的成本差距正在收窄，已低于一年前独立分析机构的测算数据。

重要的是，与硅基器件相比，SiC 的成本优势不在于器件本身，而是体现在系统总体成本方面，可为合适的应用节省很多钱。”

## 电动汽车成为 SiC 应用推手

汽车市场无疑是碳化硅最重要的驱动力，仅比较碳化硅器件和硅器件的成本是不行的。

ROHM 半导体（北京）有限公司技术中心所长水原德健表示：

“将 SiC 逆变器用于电动汽车所带来的经济效益显而易见。

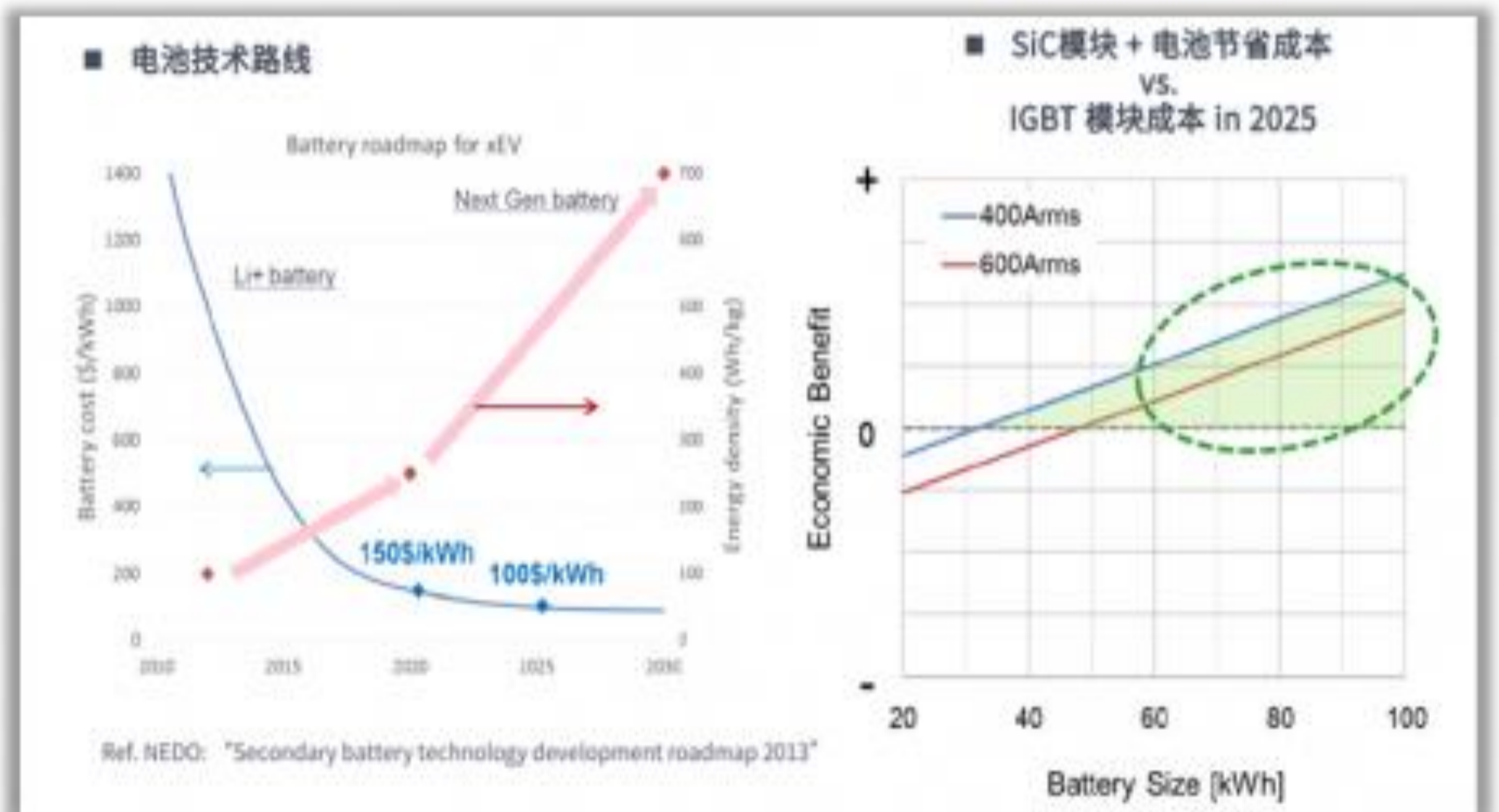
利用 SiC 可以提高 3%-5% 的逆变器效率，降低电池容量、尺寸及成本，同时带来电动汽车总成本的下降；而由于碳化硅的热性能，制造商还可以降低冷却动力总成部件的成本，对电动汽车的重量和成本产生积极的影响。”



他认为，SiC MOSFET 有很大机会率先引入高档车，因为其电池容量更大，有缩减的需求。

大约在 2021 年，采用碳化硅的汽车整体价格会走低。

而在 xEV 市场，出于竞争因素，许多 xEV 供应商在看到同行采用全 SiC 系统方案获得了更长的行驶里程后，也竞相效仿，因为相比 IGBT-SiC 混合方案，使用全 SiC 模块逆变器能够以更低的系统成本提供更好的性能。



### 逆变器中碳化硅和硅对成本的影响

意法半导体亚太区功率分立和模拟产品器件部区域营销和应用副总裁 Francesco Muggeri 认为：“电动汽车采用 SiC 最重要的是 SiC MOSFET 在牵引逆变器方面的优势，且 SiC 在电动汽车制造中可能节约成本。

在电动汽车驱动电机和逆变器中，可以使用 IGBT 也可以使用 SiC MOSFET，两者相比，采用后者的逆变器有以下优势：开关损耗可降低 80%；可以直接集成逆变器；无需另外安装液体冷却器；热管理性能更好；充电时间更快。”



他说，据统计，在汽车中 SiC MOSFET 增加的成本大约为 300 美元，而估计节省的成本可达 2000 美元。

因此，2019 至 2030 年，SiC MOSFET 市场将占功率半导体增量增长的半壁江山。



汽车中使用 SiC MOSFET 增加的成本比节省的成本少很多

Giovanni Luca Sarica 解释说：“当采用 SiC 时，开关频率可以设计得更高，这将提高器件的能效，降低无源元件的尺寸和成本，因为无源元件在应用系统总成本中占比很高。

此外，当采用较小的无源元件时，还可以缩减模块的整体尺寸，可以再一次降低整体成本。

在节省成本方面，汽车制造商还可以获得其他重要好处。

例如，当使用 SiC 解决方案获得更高能效时，可以降低动力电池冷却系统的尺寸，电池冷却系统是总体成本增加的主要因素。”

他相信，这些都是 SiC 给汽车制造商带来的实实在在的成本效益。

同时，SiC 有助于提高车辆性能，延长新能源汽车续航里程，带来更好的综合用户体验，并使车辆充电速度更快。

所有这些要素对于新能源汽车的市场普及极为重要，政府产业鼓励政策固然重要，但是，真正的市场需求，越来越多的可选车型，更好的用户体验，以及产品优势，才是引爆电动汽车市场的关键。

## **快速充电桩接踵而至**

紧随其后的是电动汽车快速充电桩，采用 SiC 的成本和性能优势正在体现。

电动汽车市场的增长为建立充电桩配套基础设施带来了机遇。

市场分析公司 Market Insights 报告估计，电动汽车充电桩市场在 2019 年至 2024 年间的复合年增长率将超过 38%。

Wolfspeed 认为，快速充电桩客户要求充电器体积小、坚固、可靠、高效，同时还提供少于 30 分钟的充电时间。

通常 3 到 7kW 的车载充电器需要 4 个小时或更长时间才能为今天的电动汽车充电。

为了缩短充电时间，快速非车载充电器必须提供更高的功率（80kW 到 350kW）。

基于 220kW 全桥谐振 LLC 转换器实现的设计，其额定输入范围为 650V 至 750V，输出范围为 300V 至 550V，最大输出电流为 35A；在 750V 输入和 570V 输出下达到 98.3% 的峰值效率。

与硅基设计相比，SiC 解决方案可用减小大约 25% 的空间提供 33% 的高功率。

在 AC/DC 转换部分，使用 MOSFET 和 IGBT 的 AC/DC 转换器有几种常见的硅实现方式。

硅 MOSFET 的问题是，在保持芯片尺寸小和获得高开关效率的同时，阻断电压不可能超过 650V 很多。

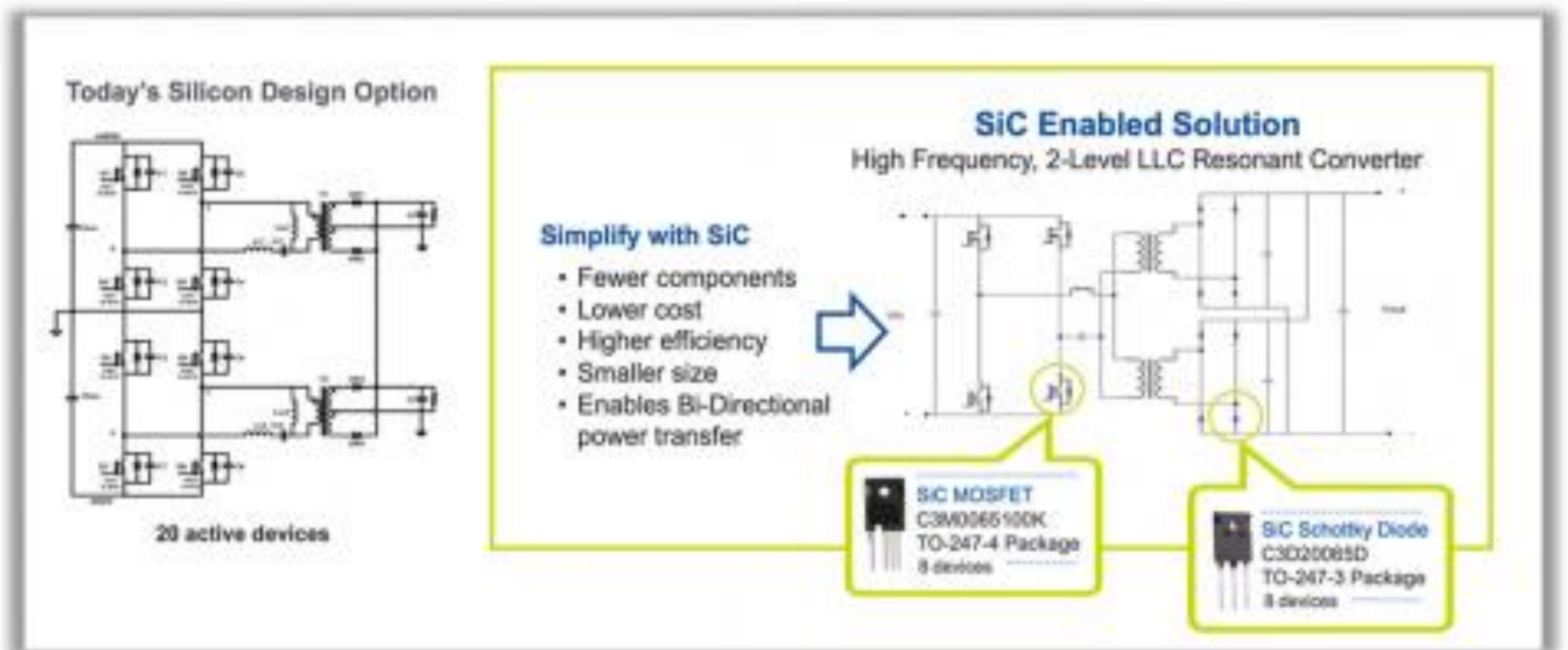
尽管采用 Si IGBT 的两级拓扑结构可以提供高达 1.2kV 的电压，但其尺寸和效率仍然是一个挑战。

基于碳化硅的 AC/DC 转换器可以解决所有与硅有关的问题。

使用 65mΩ 的 1kV 闭锁器件的设计，利用 48kHz 的高开关频率，可向快速充电器的 DC/DC 部分输出 800V。



实验结果表明，该电路在 480V 输入时可达 98.5% 以上的峰值效率。



用 SiC MOSFET 设计的两级拓扑比硅 AC/DC 转换器更简单、更小、更高效

图中的 SiC 电路还显示了在元件数量方面的显著节省——基于 SiC 的设计中有 6 个有源元件，而基于 Si MOSFET 的设计中有 12 个有源元件，两级 IGBT 设计中有 18 个有源元件。

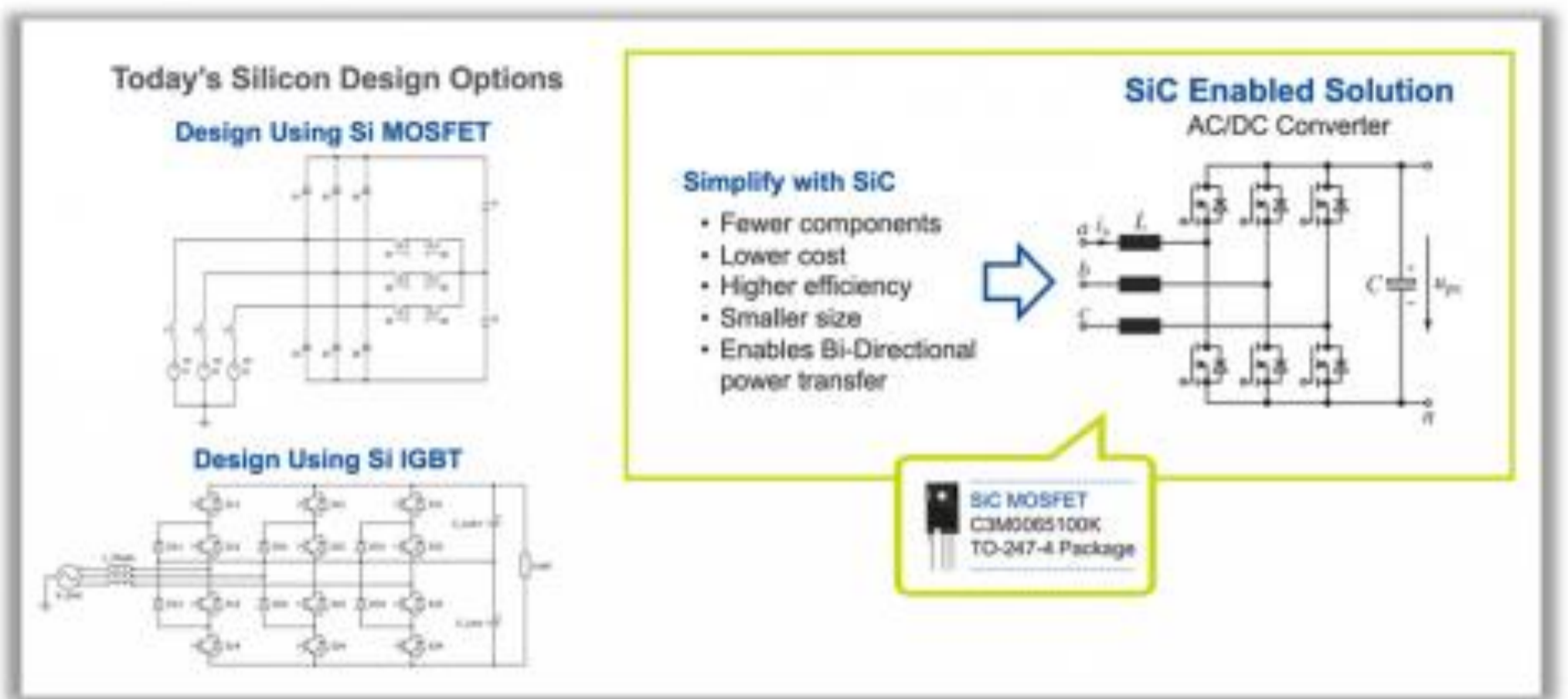
在尺寸方面，基于 SiC 的电路所占的面积减少了 25% 到 30%。

再看快速充电器的 DC/DC 部分，这部分需要将近 800VDC 的电压转换为最大 570VDC 的电压。

通过比较发现，在 DC/DC 转换器中，Si 实现比 SiC 解决方案使用更多的有源元件。

基于 SiC 的设计使用两个 65mΩ MOSFET，每个开关位置并联 1kV 阻断能力，电路中总共 8 个。

该电路的整流部分采用 8 个 20A 650V 的 SiC 肖特基二极管。



SiC 在 DC/DC 部分同样具有效率高、体积小、组件数量少、成本低等优点

未来，快速充电桩将连接到智能电网，因此电流可能是双向的，与硅相比，用碳化硅器件可以更简单地实现这一点。

快速充电器还可能会提供额外的功能，如娱乐和电子商务或电子零售（e-tailing）服务，同时为多达四辆电动汽车快速充电。

## 太阳能逆变器需要 SiC 来升级

英飞凌科技电力电子设计高级应用工程师 Mostafa Khazraei 认为，在实现高效率、高功率密度逆变器设计时，用 SiC MOSFET 直接替代 IGBT 和 SJ MOSFET，无需改变逆变器拓扑结构。

SiC MOSFET 能够以更高的频率开关，这就大大减小了磁性元件、电容器和外壳尺寸。

随着功率水平的提高，尺寸和重量的减小都将节省成本。



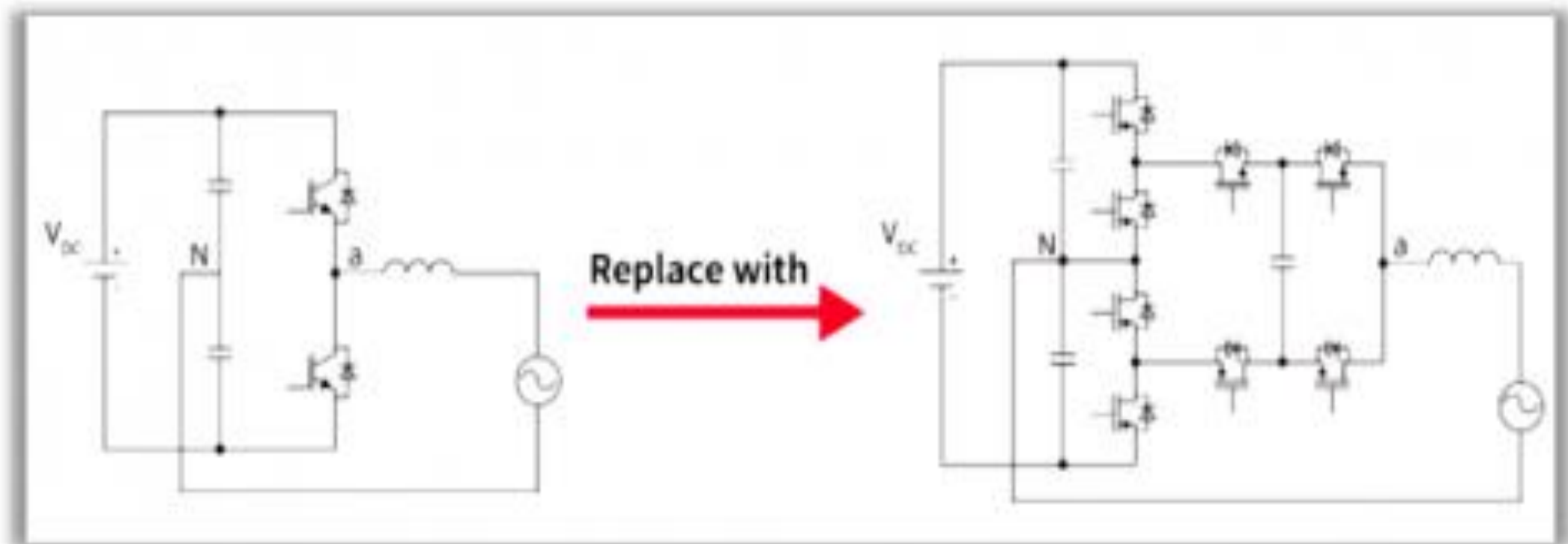
与传统设计相比，多电平逆变器的电感和电容滤波器尺寸要小很多倍。

这一点，再加上需要更小的冷却系统，使得设计更轻，外壳更小。

另一方面，由于 MV-MOSFET 额定电压较低，与传统拓扑结构相比，更多的 MOSFET 被用于多电平设计。

这也意味着，由于多电平逆变器的功率损耗而产生的热量（比传统的设计要小）分布在更多的器件中。

结果表明，多电平逆变器的热管理更加有效，为无散热和无风扇设计铺平了道路。



用多级拓扑代替传统拓扑提高效率 and 功率

在典型的单相串级逆变器（功率 $\geq 3\text{kW}$ ）中，半导体通常占总成本的不到 10%。

然而，冷却系统和磁性元件通常比较昂贵。

虽然半导体器件的价格在不断下降，但诸如磁性元件和散热器等其他元件的成本仍保持不变。

这意味着对于全功率容量大于 3kW 的单相太阳能逆变器，其中机械部件的成本是设计的重要部分，使用多电平逆变器有助于节约生产成本。

多电平逆变器的另一大优点是，每个 MOSFET 损耗较低，允许使用 SMD 封装器件。

利用 SMD 封装有助于通过自动拣选安装工艺来节省装配成本。此外，封装电感的减小改善了高频开关的性能。

碳化硅光伏逆变器效率可达 99% 以上，能量转换损耗可降低 50% 以上，这将极大地降低逆变器的成本和体积。

### **高频转换器才是降低成本和损耗的正确选择**

电力电子说白了就是将功率转来转去，都离不开转换器，而采用高频转换器将可以发挥碳化硅的诸多优势，成本的节省更是不在话下。

STMicroelectronics 高级市场与应用开发工程师 Luigi

Abbatelli 认为，在 1200V 开关领域，碳化硅比硅具有更多优

势，是那些希望提高功率密度、更安全热操作、更高效率、降低系统尺寸及显著减小无源元件尺寸和成本的设计师的最佳选择。



他阐述了 SiC MOSFET 如何在最大化高频转换器整体性能的同时降低了整体系统成本。

这项工作最重要的方面在于利用 SiC MOSFET 极低的开关损耗，利用其高频工作能力，从而降低了系统尺寸、重量和成本，还有物流成本。

在电力电子新设计中，对提高效率的需求越来越重要，同时也越来越需要更轻更小的系统。

在 1200V 器件范围内，碳化硅正成为硅技术的一个极好的替代品。

SiC MOSFET 保证导通阻面积值远低于最新的硅 1200V MOSFET 超级结技术，同时工作频率限制远远超过了市场上最先进的 IGBT 所能达到的频率限制。

为了证明 SiC MOSFET 的性能和成本优势，ST 开发了一个 5kW DC/DC CCM 升压转换器参考设计，使用新的碳化硅 1200V 45A MOSFET。

高性能碳化硅功率器件的使用表明，与实现更高频率（高达 125kHz）的 IGBT 相比，效率有了显著提高。

基于散热片和无源元件的成本分析，将 SiC MOSFET 与传统 IGBT 的系统总成本进行了对比。

先来看无源元件的成本节约，提高升压转换器的开关频率有利于减小电感和 / 或输出电容。

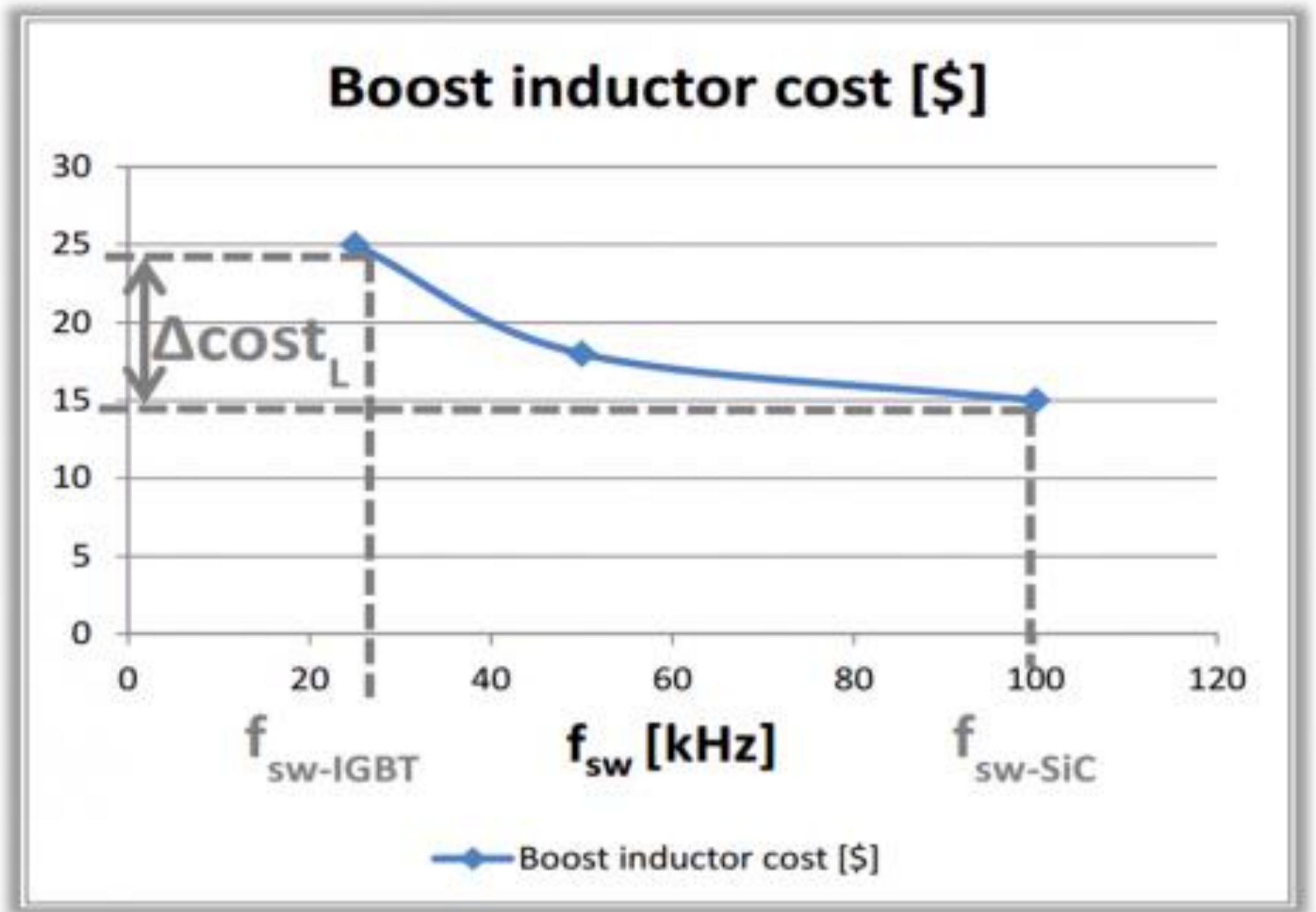
假设将输出电压、输出功率和输出电压纹波作为输入设计规范，根据最大平均电感电流来选择无源元件。

通常执行两种不同策略：a) 开关频率越高，电感值越低；b) 保持 IGBT 低频运行时选择的电感值不变，然后通过增加频率来减小电流纹波。

因此，可以缩小输出电解电容器的尺寸。

第三种策略是在 a) 和 b) 之间选择一个折衷方案，以实现更低的电感和电容。

通过遵循 a) 选项，由于较高的开关频率，可以通过减小电感值的大小来降低相关电感成本。



DC-DC 升压转换器中电感器相对于频率的典型成本趋势

再看冷却系统的成本节约，由于 SiC MOSFET 允许更高的最高结温（ $200^{\circ}\text{C}$ ）以及其固有的高导热性，在应用中，SiC MOSFET 的工作温度为  $125^{\circ}\text{C}$ ，而 IGBT 的工作温度为  $100^{\circ}\text{C}$ 。

为了确保高可靠性，需要在温度方面有相应的安全裕度。

由于相同的损耗水平（SiC MOSFET 在 4 倍大的开关频率下大致消耗与 Si IGBT 相同的功率），不同的工作温度意味着 100kHz 工作时散热片较小。

这个 5kW 升压转换器（25kHz 对 100kHz）的真实案例研究表明，在电力电子应用中，磁性元件主要得益于较高的开关频率。

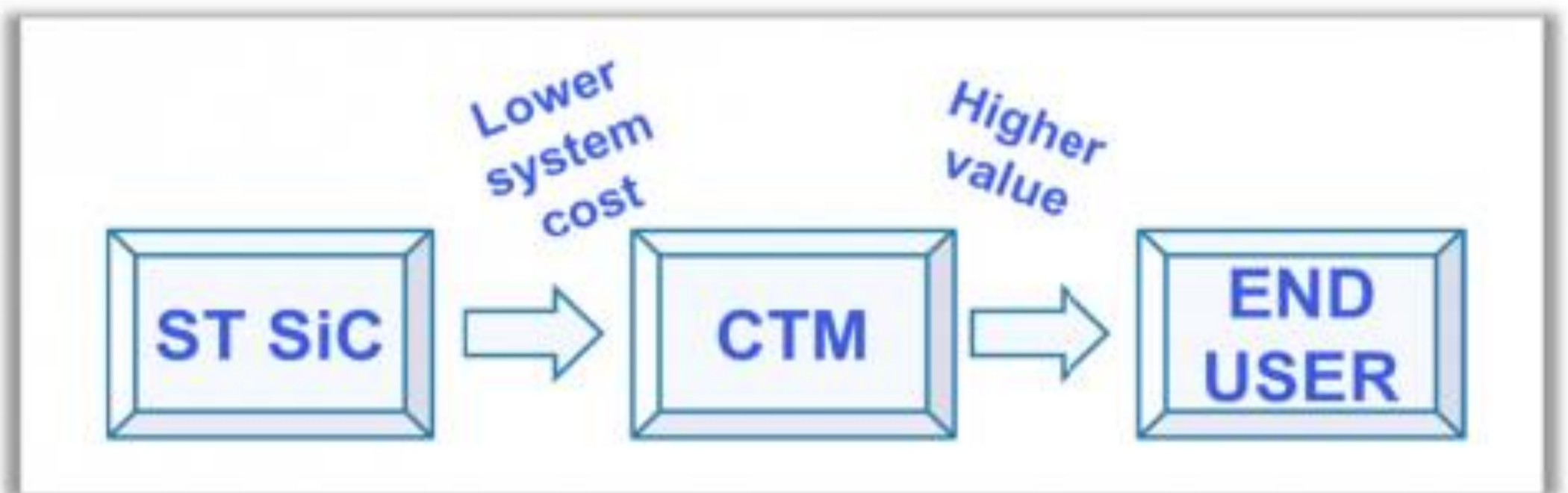
一旦为 SiC 和 IGBT 方法选择了频率，就很容易计算升压 LC 值。

首选策略是降低电感，从而降低扼流圈的成本、重量和体积。

值得注意的是，其主要好处来自于最小化的磁性元件。

此外就是物流成本的节约了，由于运输和贮存产品的物流成本会侵蚀公司的利润，其很大程度上取决于产品的总体尺寸和重量，那么，体积密度（ $W/l$ ）和重量密度（ $W/kg$ ）对以下物流可变成本都有影响：仓库、劳动力、汽油和运输。

很简单，根据质量定律，利用 SiC MOSFET 提高频率时，就可以根据节省的尺寸和重量来计算节省的资金了。



好处是降低了从半导体制造商到最终用户的整个生产链成本

需要注意的是，SiC MOSFET 可以提高功率电子应用的开关频率、效率和功率密度。

尽管其本身的成本较高，但上述优点可以转化为较低的总体系统成本。

为了降低成本，可以采取不同策略，而所有潜在效益（磁性元件最小化、提高效率 and / 或功率密度等）的最佳权衡取决于应用、输出功率和其他因素。



## 还有更多应用在等待 SiC

今天，碳化硅器件已在对效率、功率密度、系统成本敏感的应用中率先应用。

SiC MOSFET 的优势在于，不必像 IGBT 那样串联起来才能提高单元功率；采用 SiC MOSFET 的 DC/DC 电路可以大大简化电路拓扑设计，减少元器件数量，缩小无源元件间距，控制和驱动电路也更加简单；此外，还可以减小磁性元件的尺寸和成本。

虽然目前碳化硅器件价格还比较高，但它节省整个系统成本的优势正在慢慢体现出来。

总之，由于功率损耗的降低，能量的有效性，加上应用方面的优势，碳化硅器件正在使系统设计更紧凑，成本效益更高，其渗透率也随之大幅上升。