

## 光伏逆变器中功率电子器件的选择技巧

### 简介

太阳能光伏系统的应用领域越来越广泛。尤其是移动系统，不用花一分钱，就从太阳能中受益。同时由于常规电能成本不断攀升，太阳能对家庭应用具有很大的吸引力。太阳能电池本身和连接太阳能电池与公共电网或分布电源的太阳能逆变器的能源效率，是这一技术取得成功的关键所在。如今，最大输出功率为5kW的高级太阳能逆变器拥有两级拓扑。图1显示了此类太阳能逆变器的多组配置。

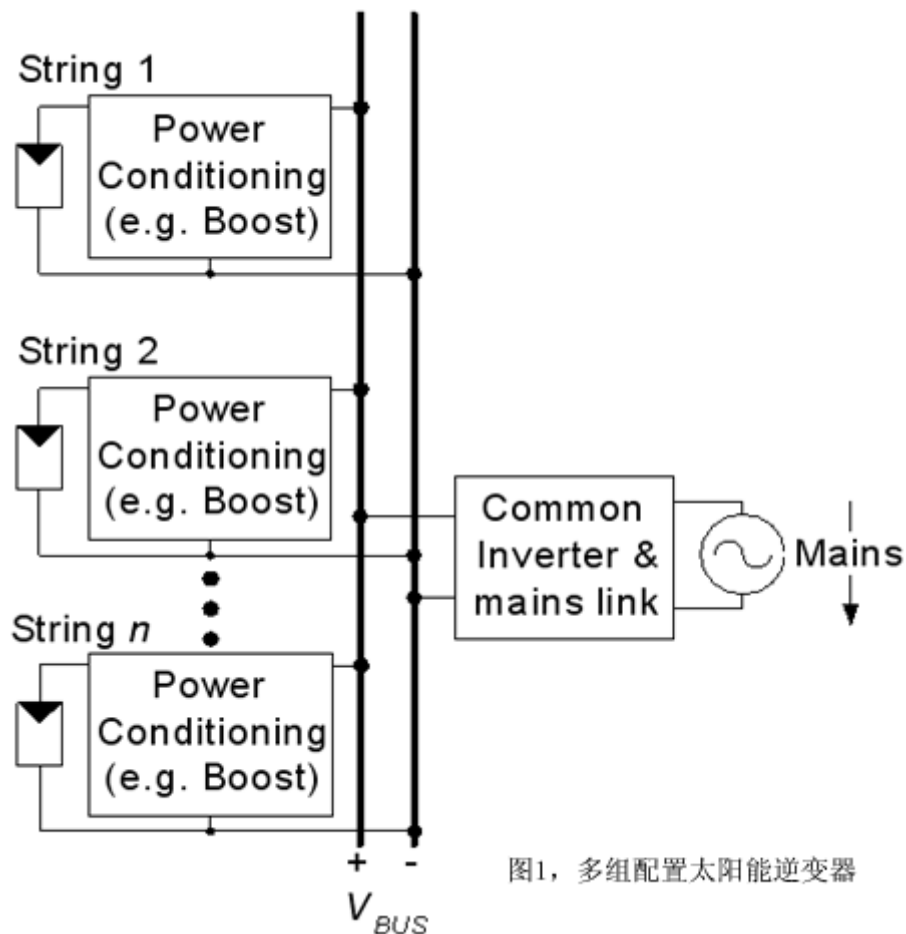


图1，多组配置太阳能逆变器

每组都和自己的功率调节器相连，然后连接至共用直流母线。功率调节器能够使太阳能电池以最大效率工作。太阳能逆变器可产生馈入市电的交流电压。请注意，图1所示的电源网是一种可用于任何逆变器拓扑的虚设电路，外加一个市电变压器和一个输出滤波器，变压器可阻止直流分量进入市电。

但是，也有一些系统是不用变压器的，这取决于太阳能逆变器销售所在国家的法律背景。允许不采用变压器的国家的目的是提高系统效率，因为变压器导致效率下降 1~2 个百分点。另一方面，逆变器必需避免直流分量，要求电流小于 5mA。虽然这很难做到，但是为了获得更高的效率，我们还是成功地实现了。表 1 给出了每一级对系统损耗、系统尺寸和系统成本的贡献值。

表 1, 在多组系统中, 太阳能逆变器各级对系统损耗、系统尺寸和系统成本的贡献值的估算

|            | 损耗贡献值 | 尺寸贡献值 | 成本贡献值 |
|------------|-------|-------|-------|
| DC/DC (升压) | 0     | 0     | 0     |
| 逆变器        | +     | +     | +     |
| 变压器        | ++    | ++    | ++    |
| 输出滤波器      | +     | +     | ++    |

很容易可以看出，变压器是系统损耗和成本的主要贡献者。然而，变压器在许多国家是必须使用的，因此，它不在减小损耗的考虑范围之内。输出滤波器可减弱由输出逆变器级产生的电流纹波，该滤波器的大小和成本与逆变器开关频率成反比。开关频率越高，滤波器的尺寸越小、价格越便宜。但是，这种关系与硬转换状态下开关频率和开关损耗之间的关系形成了折衷——开关频率越高，损耗越大，因此效率就越低。从 16kHz~20kHz 的开关频率，由于具备较低音频噪声和较高效率，可以满足太阳能逆变器的要求。因此，功率电路还有待于进一步研究。

下文将比较适用于这两级的几种半导体技术的优势。

### 用于 DC/AC 升压变换器的功率半导体

DC/DC 变换器是在 100kHz 或以上的开关频率下状态下运行的。变换器以连续模式运行，这意味着，升压电感器内的电流在额定条件下会产生连续波形。当晶体管关闭时，二极管作为续流二极管使用时，晶体管可为电感器充电。这就是说，当晶体管再次打开时，二极管可以主动关闭。下图给出了常用硅二极管的典型反向恢复特性（图 2 中的黑色和红色曲线）。

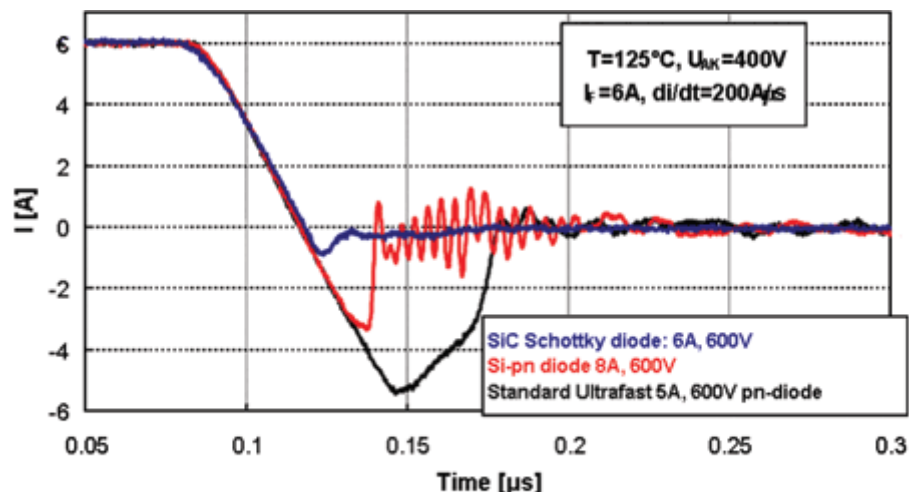


图2，常用硅二极管（黑色和红色曲线）和碳化硅肖特基二极管（蓝色）的反向恢复特性

硅二极管的反向恢复特性，在升压晶体管 and 相应的二极管中都会产生较高的损耗。而碳化硅二极管就没有这一问题（如图 2 中蓝色曲线所示）。只是由于电容性产生一个二极管瞬间负电流，这是由二极管的结电容电荷引起的。碳化硅二极管可大大减少晶体管的开通损耗和二极管的关断损耗，还可减少电磁干扰，因为波形非常平滑，没有振荡。

以往曾经报道过很多避免由二极管的反向恢复特性造成损耗的工艺，例如零电压开关的零电流开关等。所有这些都会大大增加元件数量和系统的复杂程度，结果经常使稳定性下降。特别值得提出的是，即使是在硬开关状态下通过使用碳化硅肖特基二极管，也可以用最少的元件实现软开关相同的效率。

高开关频率同样要求高性能的升压晶体管。超级晶体管（如 CoolMOS）的引进，为进一步降低 MOSFET 的单位面积导通电阻  $R_{DS(on)}$  带来了希望，如图 3 所示。

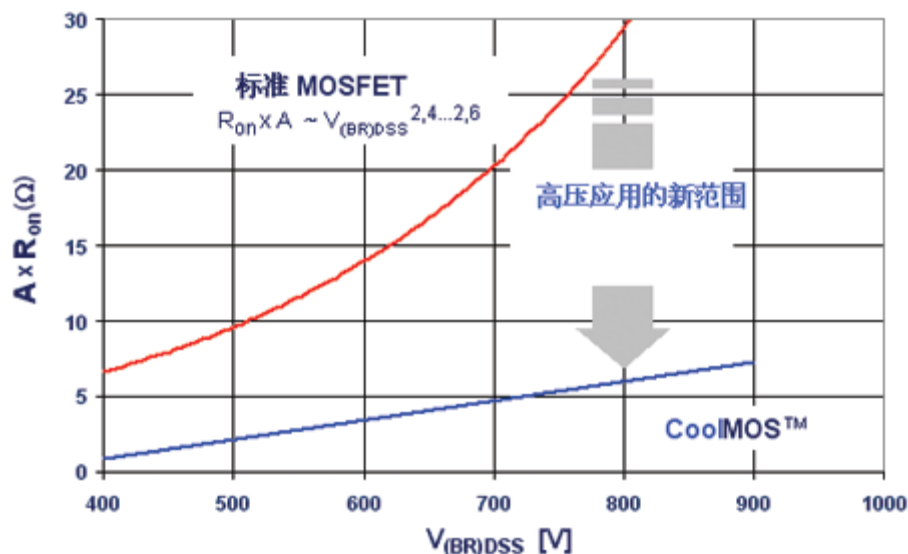


图3, CoolMOS工艺和共用MOSFET工艺的单位面积的R<sub>DS(on)</sub>比较

很容易可以看出，与标准工艺相比，单位面积 R<sub>DS(on)</sub> 大概比 CoolMOS 低 4 倍~5 倍。这意味着，在标准封装中，CoolMOS 可实现最低绝对导通电阻值。这将带来最低导通损耗和最高效率。CoolMOS 工艺的单位面积 R<sub>DS(on)</sub> 表现出更好的线性度。当电压为 600V 时，CoolMOS 的优势显而易见，如果电压更高，其优势就会加大。目前，最高的电压级为 800V。

经多次研究表明：使用碳化硅二极管和超级结 MOSFET 如 CoolMOS，优于采用标准的 MOSFET 和二极管工艺（如图 4 所示）解决方案。

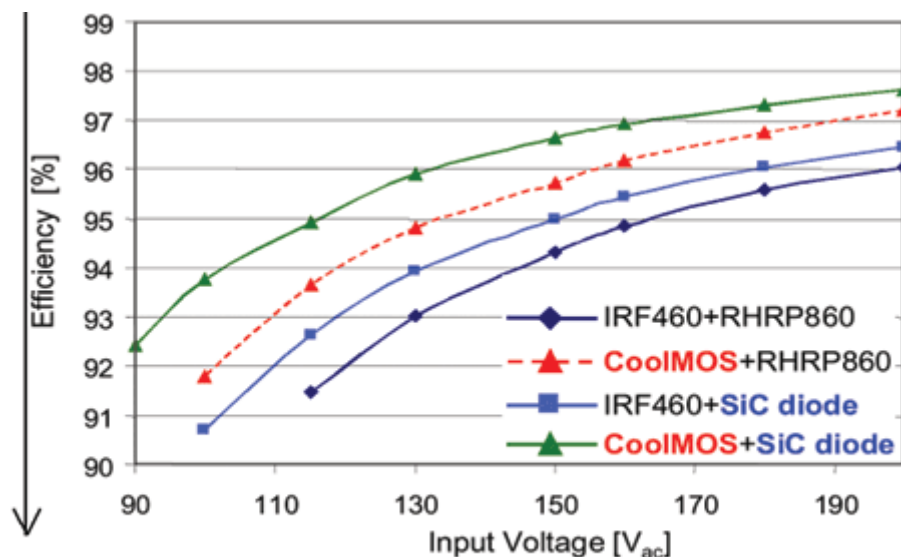


图4, 升压晶体管 and 升压二极管特定组合的效率

### 用于逆变器的功率半导体

输出逆变器连接直流母线和电网。通常, 开关频率没有 DC/DC 变换器的高。输出变换器必须处理由所有组变换器产生的电流总和。绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 是在这一逆变器使用的理想器件。图 5 给出了 IGBT 工艺的两个横截面。

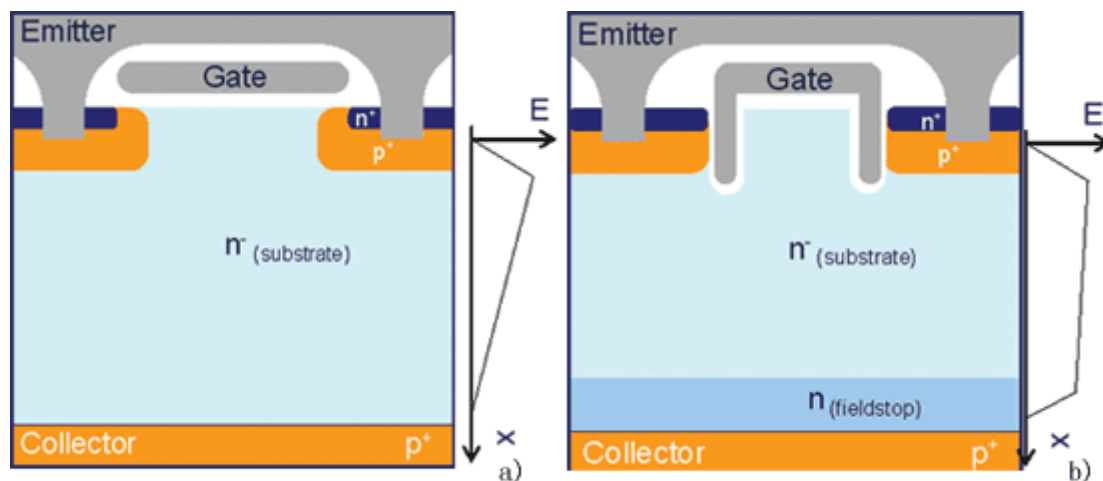


图5, IGBT工艺的横截面

两种工艺都采用了晶圆减薄工艺, 旨在降低导通损耗以及由衬底厚度太大造成的开关损耗。标准工艺和 TrenchStop 工艺是非外延 IGBT 工艺, 没有采用晶体管生长工艺, 因为此类工艺流程的成本很高, 因为阻断电压是根据增长晶体的厚度来决定的。

在断开状态下，标准 NPT 单元在半导体内部形成了一个三角形的电场。所有阻断电压都被衬底的 n 区域

吸收（取决于其厚度），以使电场在进入集电极区域之前降到 0。600V 芯片的厚度是 120 $\mu$ m，1200V 芯片的厚度是 170 $\mu$ m。饱和电压为正温度系数，从而简化了并联使用。

TrenchStop 工艺是先进的沟槽栅 (trench gate) 和场终止层 (fieldstop) 概念的结合，可以进一步降低导通损耗。Trench gate 工艺提供更高的沟道宽度，从而减小了沟道电阻。ndoped 场终止层只执行一项任务：以极低的断态电压值抑制电场。这为设计出电场在 n 衬底层中几乎是水平分布的创造了条件。这说明，材料的电阻非常低，因而在导通过程中，电压降很低。电场终止层的优势，可通过进一步降低芯片的厚度得以发挥，从而实现上述所有优越性。采用 TrenchStop 工艺也可实现并联。

表 2 给出了阻断电压为 600V 和 1200V 的 IGBT 的比较。对于这三种工艺来说，所使用的晶体管的额定功率都保持恒定。这就是说，电压为 600V 时器件的电流，是电压为 1200V 时器件的两倍。也就是说，一个 50A/600V 的器件相当于两个 25A/1200V 的器件。

表 2，在硬开关状态下，600V 和 1200V IGBT 工艺的饱和电压  $V_{CEsat}$  和总开关能量的典型值的比较

|  | IGBT 600V<br>TrenchStop | IGBT 1200V<br>Fast | IGBT 1200V<br>TrenchStop |
|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| Typ. $V_{CEsat}$<br>( $T_{vj} = 150^{\circ}C$ )                          | 1.8 V                   | 3.7 V              | 2.1 V                    |
| Typ. $E_{ts}$<br>( $T_{vj} = 150^{\circ}C; V_{CE} = 2/3 * V_{(BR)CES}$ ) | 3.45 mJ                 | 6.7 mJ             | 9.3 mJ                   |
| 芯片厚度   | 90 $\mu$ m              | 170 $\mu$ m        | 120 $\mu$ m              |

从上表可以看出，与 1200V 的器件相比较，600V TrenchStop 工艺可以将开关和导通损耗降低 50%。因此，对于整个系统来说，尽可能地使用 600V 工艺的优异性能是很重要的。1200V TrenchStop 工艺专为实现低导通损耗而进一步优化。因此，Fast 工艺或 TrenchStop 产品家族哪个更具有优异性能，取决于开关频率。

IGBT 通常还需要一个续流二极管，以使其能够续流，这是 EmCon 工艺的一个特殊优化版本。它是根据 600V 系列器件的 15kHz 开关频率进行优化的。过去认为，续流二极管必须具备非常低的导通电压以实现最低总损耗。根据应用要求可进行其它优化，以使二极管和 IGBT 中的总损耗更低。这说明，在频率约为 16kHz 的 IGBT 和二极管的应用中，为实现低开关损耗，更高的正向电压降更为合适。

这一点在图 6(600V 系列)中得以说明。左柱表示 TrenchStop IGBT 和 EmCon3 工艺中 EmCon 二极管的损耗。右柱表示 TrenchStop IGBT 和为实现低传导损耗而进行优化后的二极管（称为 Emcon2 工艺）的损耗。右柱中的同一二极管与采用英飞凌的 Fast 工艺（600V）的 IGBT 结合使用。条形图中黄色和橙色的部分分别代表 IGBT 的导通损耗和开关损耗。深蓝色和浅蓝色部分分别是二极管的导通损耗和开关损耗。

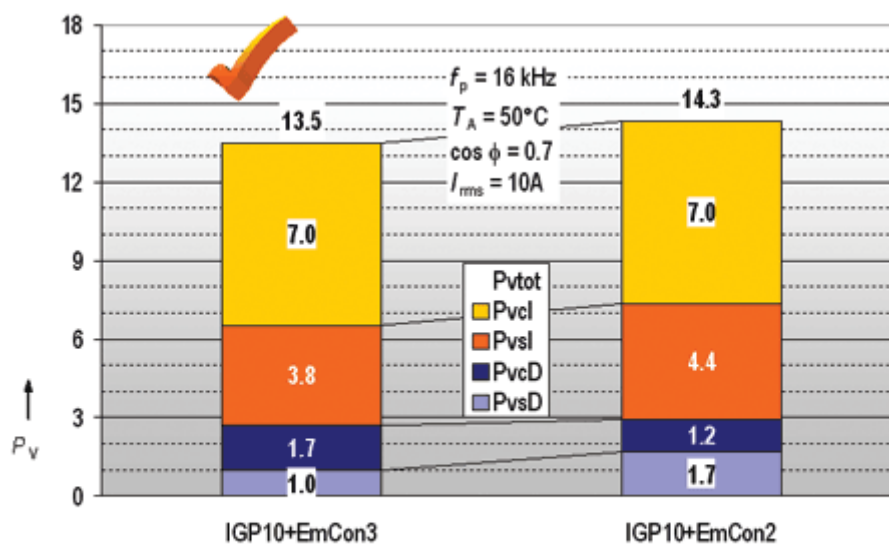


图 6，应用优化的二极管（左）和  $V_F$  优化二极管的 TrenchStop IGBT (10A / 600V) 的损耗比较

很容易看出，在开关频率为 16kHz，负荷角的余弦值为 0.7 和额定电流的情况下，Emcon3 二极管在导通过程中会产生更高损耗（深蓝色），但能得到更好的开关性能。因此，就这一点而言，二极管本身已经是很好的选择了。此外，它还降低了 IGBT 在开通过程中的开关损耗。上述第 2 部分的考虑事项同样适用于此处。使用优化的 EmCon 二极管可使损耗降低 1W 左右，这是它的一个优势。请注意，当负荷角接近 1 的时候，开关损耗将成为主要的损耗，因为二极管只在输出逆变器死区期间导通。

## 结论

功率半导体器件需要具备不同的特性,才能在太阳能逆变器应用中达到最高效率。新工艺的出现,如碳化硅半导体二极管或 TrenchStop IGBT 等,正在帮助人们实现这一目标。当然,要实现这一目标,不仅要单个器件进行优化,而且还要对这些器件组合在一起发生作用的方式进行优化。这将实现最小损耗和最高效率,而这正是太阳能逆变器最重要的两项指标。

作者: Frank Wolfgang, 英飞凌科技公司汽车、工业及多元化电子市场事业部消费类电源技术市场部