

## 基于 SiC 的高电压电池断开开关的设计注意事项

Microchip Technology Inc.  
碳化硅业务部  
资深顾问级应用工程师  
Ehab Tarmoom

得益于固态电路保护，直流母线电压为 400V 或以上的电气系统（由单相或三相电网电源或储能系统（ESS）供电）可提升自身的可靠性和弹性。在设计高电压固态电池断开开关时，需要考虑几项基本的设计决策。其中关键因素包括半导体技术、器件类型、热封装、器件耐用性以及电路中中断期间的感应能量管理。在本文中，我们将讨论在选择功率半导体技术和定义高电压、高电流电池断开开关的半导体封装时的一些设计注意事项，以及表征系统的寄生电感和过流保护限值的重要性。

### 宽带隙半导体技术的优势

在选择最佳半导体材料时，应考虑多项特性。目标是打造兼具最小导通电阻、最小关断泄漏电流、高电压阻断能力和高功率能力的开关。图 1 显示了硅（Si）、碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）三种半导体材料的特性。SiC 和 GaN 的电击穿场大约是硅的十倍。这使得设计漂移区厚度为等效硅器件十分之一的器件成为可能，因为漂移区厚度与电击穿场成反比。此外，漂移区的电阻与电击穿场的立方成反比。这使得漂移区电阻降低了近 1000 倍。在固态开关应用中，所有损耗都是导通损耗，高电击穿场是一项显著的优势。此外，电阻降低还意味着无需担心动态闩锁问题，否则较高的  $dV/dt$  瞬变可能会分别触发硅功率 MOSFET 和 IGBT 中的寄生 NPN 晶体管或晶闸管。

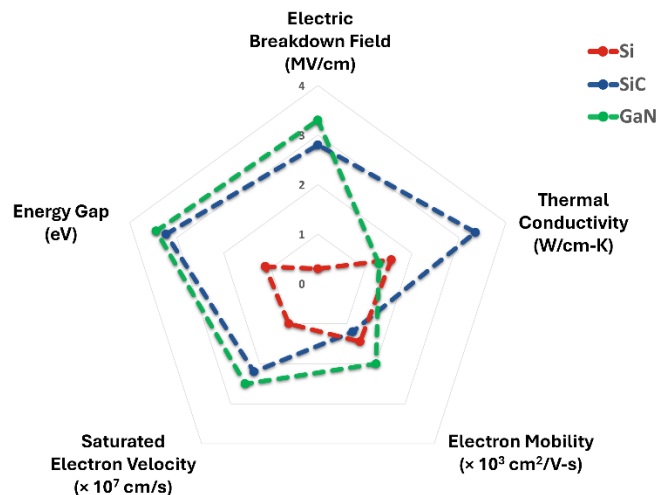


图 1、Si、SiC 和 GaN 三种材料的特性

碳化硅的热导率是 Si 和 GaN 的三倍，可显著提高芯片散热能力，使其运行温度更低并简化热设计。或者，对于等效目标结温来说，这意味着支持更高的工作电流。更高的热导率搭配高电击穿场可以降低导通电阻，从而进一步简化热设计。

碳化硅是一种宽带隙（WBG）半导体材料，其能隙几乎是硅的三倍，因此能够在更高的温度下工作。半导体在高温环境下将无法发挥半导体的功能。更宽的能隙使得碳化硅能够在高出硅几百摄氏度的温度下正常工作，因为其自由载流子的浓度较低。但是，基于当今技术的其他因素（如封装和栅极氧化层泄漏）将器件的最大连续结温限制在 175 °C。WBG 技术的另一项优势是其关断泄漏电流较低。

考虑到以上特性，碳化硅是该应用的最佳半导体材料。

### 以下器件类型之间的差异：IGBT、MOSFET 和 JFET

晶体管的类型是下一个关键因素。大多数情况下，导通损耗是需要面临的最大的设计挑战。为了满足系统的热要求，应最大限度地减少导通损耗。一些系统采用液体冷却，而其他系统可能使用强制风冷或依靠自然对流。除了大幅度地减少导通损耗之外，还必须将压降保持在最低水平，以便最大限度地提高所有工作点（包括轻载条件）的效率。这对于电池供电系统尤为重要。许多系统（包括直流系统）中还有一个重要因素，即电流都是双向的。通常需要兼具低导通损耗、低压降和反向导通能力的晶体管。可以考虑的晶体管通常包括 IGBT、MOSFET 和 JFET。

尽管 IGBT 在峰值负载电流下的导通损耗与 MOSFET 相当，但一旦负载电流减小，基于 IGBT 的解决方案就会变得效率低下。这是因为压降由两部分组成：一部分压降接近恒定，与集电极电流无关；另一部分压降与集电极电流成正比。使用 MOSFET 时，压降与源电流成正比。它没有 IGBT 的开销，这使得所有工作点（包括轻载条件）都能实现高效率。MOSFET 允许第一象限和第三象限的通道导通，这意味着电流可以正向和反向流过器件。MOSFET 在第三象限工作有一个额外的好处，即其导通电阻通常比在第一象限略低。而 IGBT 仅在第一象限导通电流，并且需要通过反并联二极管来实现反向电流导通。JFET 是一种旧技术，但目前正在复兴，它既可以正向导通也可以反向导通，并且与 MOSFET 一样，其压降与漏极电流成正比。JFET 与 MOSFET 的不同之处在于它是一种耗尽型器件。也就是说，JFET 属于常开器件，需要通过栅极偏置来抑制电流的流动。这给设计人员在考虑系统故障条件时带来了挑战。作为一种变通方法，可以使用包括串联低电压硅 MOSFET 的共源共栅配置来实现常闭器件。串联硅器件的加入增加了复杂度，进而削弱了 JFET 在高电流应用中的一些优势。SiC MOSFET 属于常闭器件，兼具许多系统中所需的低电阻和可控性。

### 热封装

SiC 功率模块可实现高级别的系统优化，这很难通过并联分立 MOSFET 来实现。Microchip 的 mSiC™ 模块具有多种配置以及电压和电流额定值。其中包括共源配置，该配置以反串联的方

式连接两个 SiC MOSFET，从而实现双向电压和电流阻断。每个 MOSFET 均由多个芯片并联组成，以实现额定电流和低导通电阻。对于单向电池断开开关，两个 MOSFET 在功率模块外部并联连接。

为了使芯片保持较低的运行温度，需要较低的导通电阻和热阻。模块中使用的材料是决定结至外壳热阻及其可靠性的基本要素。具体来说，芯片粘接、基板和底板材料特性是形成模块热阻的主要因素。选择高热导率的材料有助于最大限度地降低热阻和结温。除了热性能之外，选择热膨胀系数（CTE）紧密匹配的材料可以降低材料界面和内部的热应力，从而延长模块的使用寿命。表 1 汇总了这些热特性。氮化铝（AlN）基板和铜（Cu）底板是 mSiC 功率模块的标配。氮化硅（Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>）基板和铝碳化硅（AlSiC）底板的可靠性更高。图 2 给出了采用通过 DO-160 认证的标准 SP3F 和 SP6C 封装以及高可靠性无底板 BL1 和 BL3 封装的共源功率模块。

	材料	CTE (ppm/K)	热导率 (W/cm-K)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
芯片	Si	4	136	
	SiC	2.6	270	
基板	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	25	
	AlN	5	170	
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3	60	
	CuW	6.5	190	17
底板	AlSiC	7	170	2.9
	Cu	17	390	8.9

表 1. 芯片、基板和底板的热特性

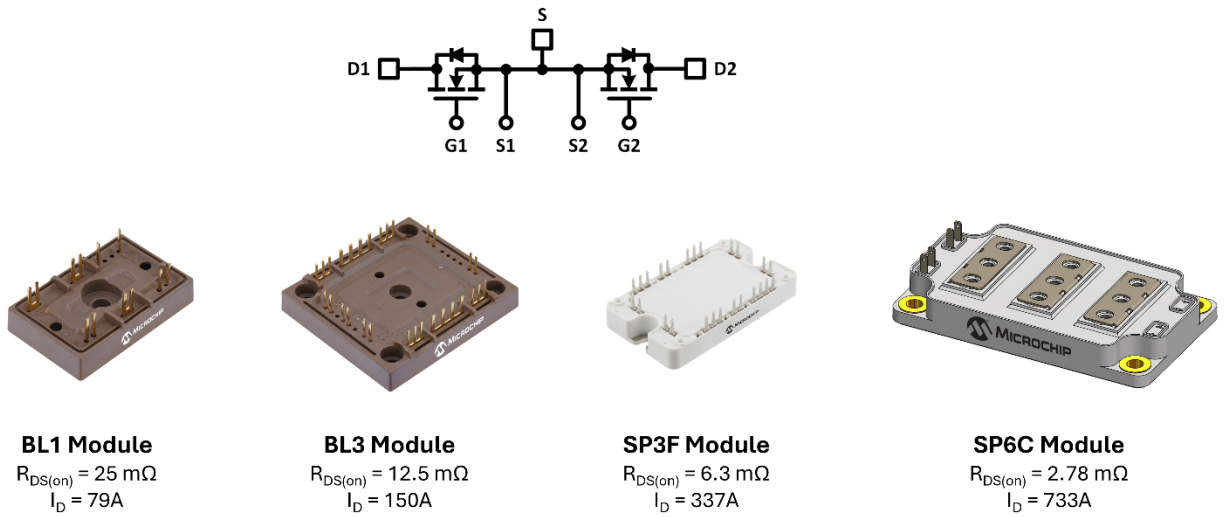


图2. 采用共源配置的 Microchip mSiC™ 模块

## 器件耐用性和系统电感

除了模块的热性能和长期可靠性之外，电路中断器件的另一个设计注意事项是高感应能量。继电器和接触器的循环次数是有限的。它们通常指定无负载机械开关循环，极少指定电气负载开关循环。系统中的电感会导致触点间产生电弧，进而在电流断开时导致性能下降。因此，电气循环额定值的工作条件被明确定义，并对其寿命有很大影响。即便如此，在使用接触器或继电器的系统中仍然需要连接上游熔丝，因为在较高的短路电流下，触点可能会熔接关断。固态电池断开开关不会受到这种性能下降的影响，因此有助于打造可靠性更高的系统。尽管如此，对于管理中断高电流时存在的感应能量来说，了解系统的寄生和负载电感与电容也是至关重要的。

感应能量与电感以及中断时系统中电流的平方成正比。开关输出端子发生短路会导致电流快速增加，其上升速率等于电池电压与源电感之比。举例来说，800V 母线电压和 5 μH 的源电感会导致电流以每微秒 160A 的速度增加。5 μs 的检测和响应时间将导致电路中产生 800A 的额外电流。由于不建议在雪崩模式下操作 SiC 功率模块，因此需要使用缓冲电路或钳位电路来吸收这种感应能量以保护模块。但是，当经过适当设计以满足爬电距离和间隙要求时，缓冲电路引入的寄生效应会进一步限制其有效性。因此，开关应足够缓慢地关断，以限制模块内部电感引起电压过应力和电流突然下降。采用低电感设计的模块有助于进一步最大限度地降低该电压应力。

在硅功率器件中，高电流的快速中断会带来触发寄生 NPN 或晶闸管的风险，进而导致无法控制的闩锁并最终引发故障。在 SiC 器件上，非常快速的关断可能会导致每个芯片在关断过程中发生低能量雪崩击穿，直到缓冲电路或钳位电路吸收掉高能量为止。Microchip 的 mSiC MOSFET 经过专门设计和测试，具有非钳位电感开关（UIS）耐受性，可在缓冲电路或钳位电路的

性能开始下降时提供额外的安全裕度。图 3 给出了与市场上其他 SiC 器件的单触发和重复 UIS 性能对比。

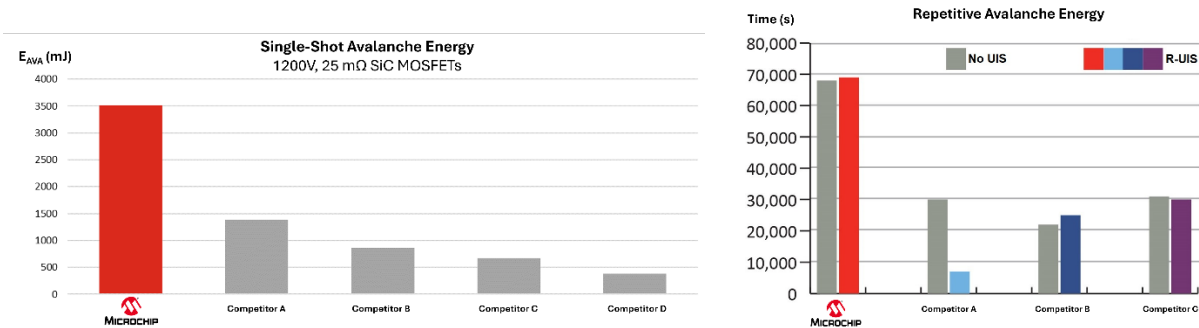


图 3，单触发（左）和重复（右）雪崩能量性能

尽管应了解器件级抗短路能力，并且 IGBT 的器件级抗短路能力确实比 MOSFET 更出色，但在实际系统中会面临不同的应力条件。由于系统电感固有的限流特性，模块不太可能达到其短路电流额定值。限制因素为缓冲电路或钳位电路设计。为了设计出外型小巧的高性价比缓冲电路，允许的系统级峰值短路电流将被限制在远低于模块短路电流额定值的范围内。例如，在由 9 个芯片并联组成并设计用于防止短路电流超过 1350A 的 500A 电池断开开关中，每个芯片导通 150 安培的电流（假定电流均匀分布）。这比器件级短路测试中的电流要低得多，器件级短路测试期间的电流会超过几百安培。电压钳位器件的优化是稳健型固态电池断开开关设计的关键环节。

### 其他设计注意事项

除了功率器件之外，还有一些与控制电子器件相关的设计注意事项，其中包括电流检测技术、过流检测和保护以及功能安全。对于低寄生电感系统的设计来说，是否使用电流检测电阻或磁性技术进行电流检测的决策非常重要，因为快速的响应时间至关重要。是否使用硬件、软件或两者结合进行过流检测也是一项重要的决策，尤其是在需要满足功能安全要求时。

以上讨论了关于固态电池断开开关中高电压功率器件的选择和设计的一些关键方面。与传统机械断开开关相比，固态断开开关之所以具有系统级优势，关键在于碳化硅和功率半导体封装的优势。得益于碳化硅技术，器件现在能够兼具较低的导通电阻和热阻，从而实现许多系统中所需的低导通损耗，同时还可以采用保证高可靠性的材料。