

# 从SiC到薄型SiC：将功率二极管性能提升至新高度

作者：Sebastian Fahlbusch博士，功率产品应用能力中心经理

如今，碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)是频繁见诸科技媒体的热点话题。这是因为，使用这些宽禁带技术构建的器件在许多重要指标方面都优于硅器件，并可实现一些以前无法实现的新应用。本白皮书介绍SiC二极管的结构和应用，并说明其相对于硅器件的优势。此外，还介绍Nexperia为实现更薄器件结构而研发的一系列新型SiC二极管，并讨论这些新型SiC二极管较之于标准SiC二极管在功率应用中更多优势。

## 碳化硅相对于硅的优势

硅和4H-SiC（商用功率器件中常用的多型体）之间的特性差异如图1所示。

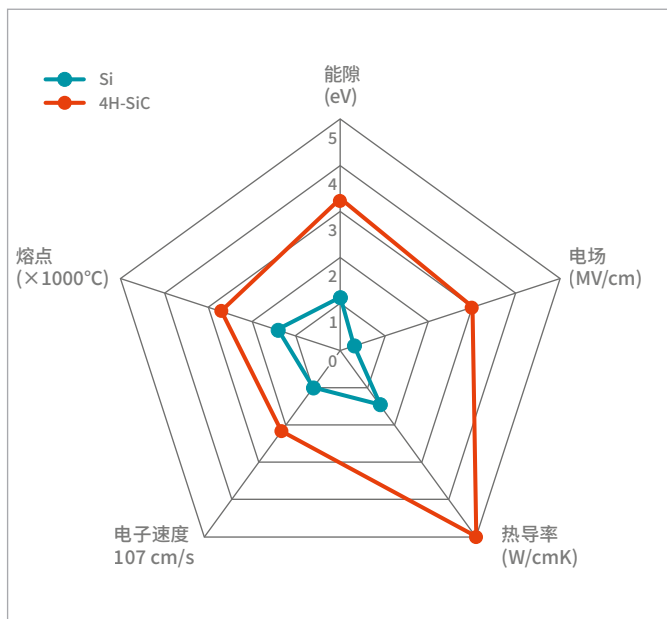


图1：硅和4H-碳化硅的特性比较。

较之于传统半导体（如硅），宽禁带半导体材料的能隙更大。在相同额定电压下，SiC的介电击穿场强比硅基器件高出10倍，且漂移层也更薄。因此，SiC的电阻率更低，传导性能更优，且芯片尺寸也比额定电压类似的其他产品更小。此外，SiC的热导率大约是Si基器件的3.5倍，因此其给定芯片面积耗散的功率也就更多。同时，SiC的最高工作温度几乎是Si基器件的两倍。尽管封装在持续运行期间通常是一个限制因素，但SiC会带来额外的裕量优势，有助于在瞬态热事件期间实现较优的性能。

此外，由于使用小尺寸芯片，在电流和额定电压给定的情况下，器件的固有电容和关联电荷都会更低。结合SiC的更高电子饱和速度，这可以实现比Si基器件更快的开关速度和更低的损耗。

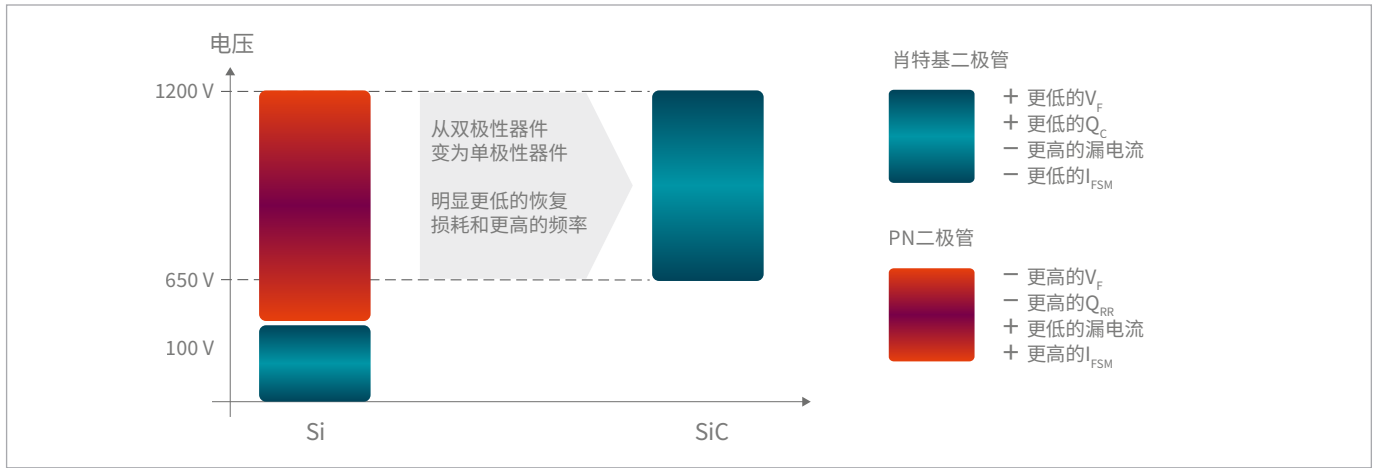


图2: Si和SiC功率二极管与截止电压的比较。

### SiC 功率二极管的工作特性

SiC 二极管是单极性肖特基金属半导体器件，其中只有多数载流子（即电子）才能传输电流，因此，当二极管正向偏压时，耗尽层存储的电荷可忽略不计。相比之下，P-N 结二极管是双极性二极管，且会存储在反向偏压期间必须去除的电荷。图 2 显示了这些差异。

这会导致反向电流尖峰，并增加二极管、开关晶体管和缓冲器的功率损耗，并且随着开关频率的增加而增大。此外，SiC 二极管在反向偏压下会由于其固有电容放电而产生反向电流尖峰，但其峰值仍比 P-N 结二极管低一个数量级，这意味着二极管和相应开关晶体管的功耗都更低。SiC 二极管的最大正向压降可与超快硅二极管相媲美，并且仍在不断改进，在更高的额定截止电压下，两者存在细微差异。尽管是肖特基类型的二极管，但在反向偏压下，高压 SiC 二极管的反向漏电流和由此产生的功耗相对较低，类似于同等电压和电流级别的超快 Si 二极管。由于 SiC 二极管不存在反向电荷恢复效应，所以 SiC 二极管和超快 Si 二极管之间由正向压降和反向漏电流变化引起的任何微小功耗差异都比降低 SiC 动态损耗所抵消的功耗更大。在“MPS 二极管的反向恢复特性”一节中会对此进行详细阐述。

硅二极管的恢复电流和恢复时间随温度变化而存在巨大差异，从而加大了电路优化的难度，但 SiC 二极管却不存在这种变化。在一些电路中，如“硬开关”功率因数校正级，典型单相 AC 输入情况下从大电流正向偏置到典型值 400V 的反向偏置，充当升压整流器的硅二极管可以主导其损耗。SiC 二极管的特性可显著提高该应用的效率。

SiC 二极管与 Si 二极管相比还有一个优势，它们可以并联连接，因为其正向压降具有正温度系数（在 I-V 曲线的应用相关区域），这有助于纠正所有电流不均流。相比之下，当器件并联连接时，Si P-N 二极管的负温度系数可能会导致热失控，需要使用明显降额或附加的有源电路，以迫使器件实现均流。

SiC 二极管类似的软开关性能还带来另一个优势，它可以显著降低 EMI。将 Si 二极管用作开关整流器时，反向恢复电流的潜在快速尖峰（及其宽频谱）可能导致传导和辐射发射。这些发射会产生系统干扰（通过各种耦合路径），从而可能超过系统 EMI 限值。在这些频率下，由于存在这种杂散耦合，滤波可能会比较复杂。此外，设计用于衰减开关基频和低谐波频率（通常低于 1 MHz）的 EMI 滤波器通常都具备比较高的固有电容，从而会降低其在更高频率下的滤波效果。缓冲器可在硅快速恢复二极管中用于限制边沿速率以及抑制振荡，从而减少对其他器件产生的应力，降低 EMI。但是，缓冲器会耗散大量能量，因而对系统效率会有不利影响。还有一个往往会被忽视的损耗来源，即正向恢复。从关断状态向导通状态转换期间，硅二极管压降会暂时增大，从而产生过冲、振铃和额外损耗。这种效应与 Si 基 P-N 二极管结的初始导电性较低有关，而 SiC 二极管却不存在这种效应。

由于 SiC 二极管中不存在少数载流子，所以其效率非常高。因此，散热要求低，有助于在更小巧的产品中实现更高的功率密度。由于开关损耗（器件本身和相应晶体管）明显降低，SiC 二极管可实现更高的开关频率。因此，耗散的热量随之减少，通过使用较简单的 EMI 滤波组件和更小巧的磁性组件可节省更多成本。此外，器件结可耐受更高温度，具有更高的耐用性和可靠性，且不会出现热失控危险。

## Nexperia 的合并 PiNSiC 肖特基二极管：进一步了解高端碳化硅功率二极管

与硅快速恢复二极管相比，我们可以进一步提高基本 SiC 肖特基二极管的一些特性，包括漏电流（金属-半导体接面的缺陷导致）和浪涌电流额定值（与器件的单极性和相对较高的漂移层电阻有关）。采用更厚的漂移层可减小漏电流，但也会增加电阻和热阻，从而不利于功率应用。Nexperia 的“合并 PiN 肖特基”（MPS 是混合型 SiC 肖特基和 P-N 结二极管）可克服该限制，同时在出现浪涌电流期间提供更高的稳健性。图 3 中的 MPS 结构将这两种二极管（肖特基二极管和 P-N 二极管）有效地并联在一起。

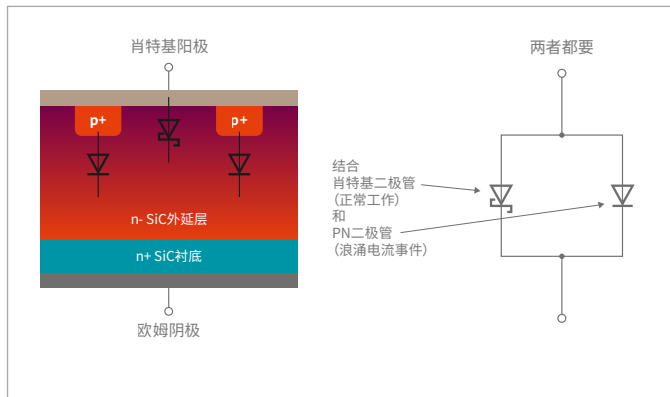


图3: Nexperia 的“合并PiN肖特基”混合二极管。

在传统肖特基结构的漂移区内嵌入 P 掺杂区，与肖特基阳极的金属构成 P 欧姆接触，并与轻度掺杂 SiC 漂移或外延层构成 P-N 结。在反向偏压下，P 阱将“驱使”最高场强的通用区域向下移动到几乎没有缺陷的漂移层，远离有缺陷的金属势垒区域，从而减小总漏电流。其效果如图 4 所示。

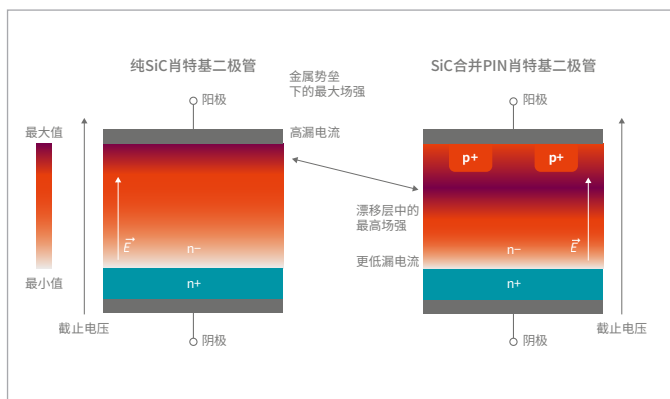


图 4: 在 SiC 肖特基二极管中添加 P 阱可使反向偏压下的最高场强区域远离阳极金属区域。

P 阱的物理位置和面积（与肖特基二极管的尺寸相比）以及掺杂浓度都会影响其最终特性，同时正向压降会抵消漏电流和浪涌电流。因此，在漏电流和漂移层厚度相同的情况下，MPS 器件可在更高的击穿电压下运行。双极性器件的差分电阻低于单极性器件，因而可提高浪涌电流的额定值。尽管肖特基区域具有更低的压降（在低电流下），并且会传导所有电流（甚至高浪涌），但该电压会超过 P-N 二极管的开启电压，从而开始以更低的差分电阻传导。这可以转移电流，同时限制耗散的功率，并消除 MPS 二极管的热应力（图 5）。

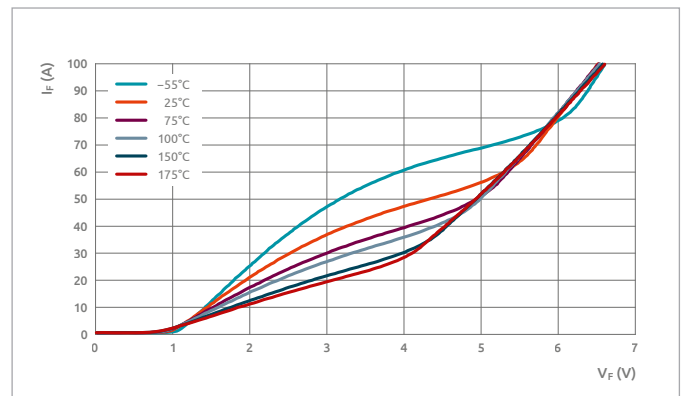


图5: SiC MPS 二极管的静态 I-V 行为（包括过流）。

在正常条件下，P-N 结不导通，总体表现为单极性二极管行为，且几乎不存在任何反向恢复损耗。如果只使用肖特基二极管，而不使用 P-N 二极管，并且目标应用中可能会出现瞬时过流事件，则必须使用尺寸明显超规格的肖特基二极管。为限制过流，可并联连接器件（或添加额外电路），但这会增加成本。同样，P 阱的尺寸和掺杂需要在正向压降（正常运行期间）与浪涌承受能力之间进行权衡。具体优化选择取决于应用，Nexperia 提供适合各种硬开关和软开关应用的二极管。

## MPS 二极管的反向恢复特性

除了静态优势，SiC MPS 二极管在开关模式下动态操作期间也具有优势。其与硅基 P-N 二极管相比的一个显著优势与反向恢复特性有关。如前所述，SiC MPS 二极管在标称条件下的行为就像肖特基二极管。与传统的 Si 快速恢复二极管不同，只有多数载流子才会影响 SiC 二极管的总电流。因此，这些二极管表现出纯电容式开关行为，从而导致其反向恢复电荷低于具有相同电气额定值的 Si 快速恢复二极管。反向恢复电荷是造成损耗的一个主要原因，因此对转换器效率会有不利影响。

图 6 描述了不同参数对反向恢复特性的影响，如二极管关断电流和结温。SiC 在这些参数变化的情况下表现出几乎恒定的行为，几乎不会有 Si 快速恢复二极管的非线性特性。因此，功率设计人员更容易预测出 SiC 的行为，因为他们无需考虑各种环境温度 and 负载条件。这两种二极管技术具有一个类似的特性，即截止电压都会对整体恢复电荷的电容部分产生影响。对于硅基 P-N 二极管，这部分影响相对较小，因为在关断期间，由存储的少数载流子控制恢复电荷。因此，电容电荷的电压依赖性通常可以忽略不计。相比之下，由于 SiC 二极管中不存在少数载流子，所以电容电荷是反向恢复电荷的唯一影响因素，因此在开关期间会造成损耗。

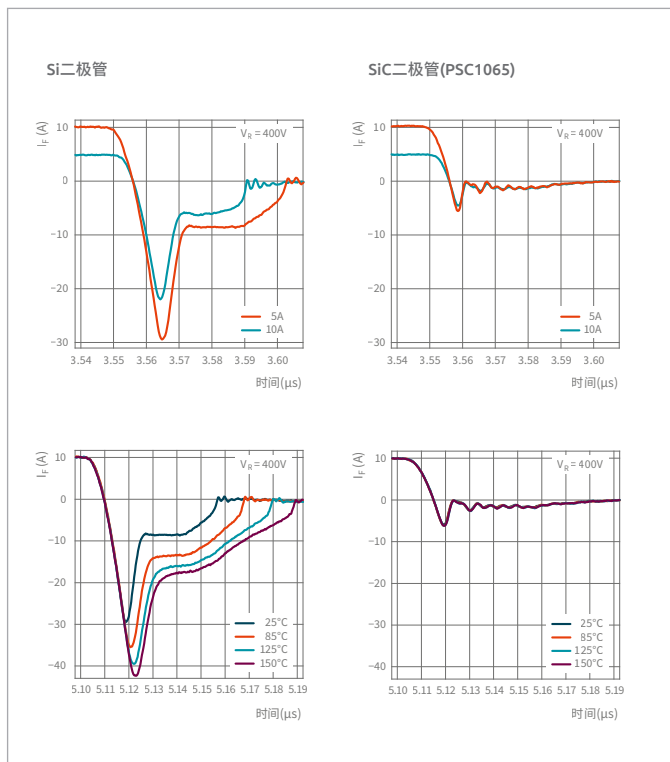


图6: Si和SiC在各种工作条件下的反向恢复特性比较。

## “薄型 SiC” 二极管结构可带来额外优势

Nexperia 的“合并 PiN 肖特基”不仅具有更低的漏电流和浪涌电流额定值，而且由于在制造过程中减少了芯片厚度，还具有其他优势。未经处理的 SiC 衬底为 N 掺杂衬底，并会生长出 SiC 外延层，以形成漂移区。衬底最初的厚度可达 500 μm，但在外延后，这会给背面金属的电流和热流路径增加额外的电阻和热阻。因此，给定电流下的正向压降和结温也会变得更高。针对该问题，可将衬底的底面“磨薄”。在此工序中，材料质量和研磨精度至关重要，以避免厚度不均匀，进而降低二极管的性能，并且可能会导致现场故障。此外，考虑到 SiC 的硬度更高（莫氏硬度等级为 9.2 至 9.3，而硅的硬度等级约为 6.5），该工艺需要先进的制造技术。

图 7 显示了该工艺的效果，通过使用 Nexperia 的“薄型 SiC”技术将衬底厚度减少到原来的三分之一。因此，从结点到背面金属的热阻显著降低，从而降低工作温度，提高器件可靠性，延长其使用寿命，提高浪涌电流能力，并降低正向压降。

SiC 的固有优势和 Nexperia 的先进制造工艺相辅相成，造就出了与理想二极管性能非常接近的器件。

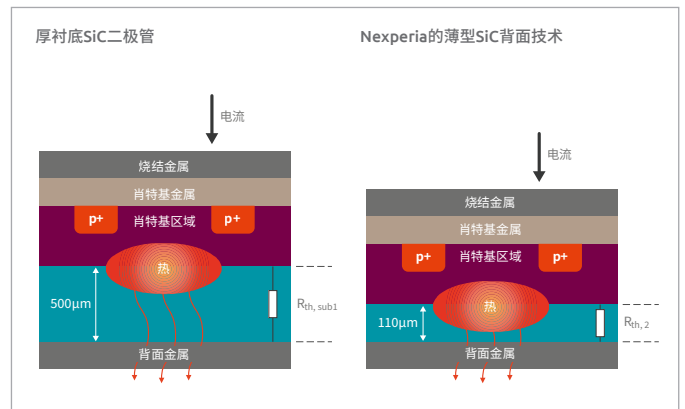



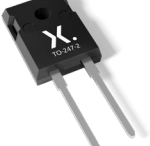


图7: 与标准的SiC二极管结构(左)相比, Nexperia的“薄型SiC”工艺(右)可提高二极管的电气性能和热性能。

## 产品范围

认证标准	$V_{RRM}$ (V)	$I_F$ (A)	TO-252-2 (DPAK R2P)	TO-263-2 (D2PAK R2P)	TO-220-2	TO-247-2
汽车和工业	1200	6				
		8				
		10				
		16				
		20				
	650	6				
		8				
		10				
		16				
		20				

## 结论

与硅二极管相比，SiC 二极管具有更明显的技术优势（如明显更出色的开关性能），有助于系统工程师改进其功率应用。SiC 二极管可提高效率、功率密度和可靠性，并降低 EMI 和系统复杂性。此外，还可实现更高的开关频率，同时不会降低输出功率或整体系统效率。因此，可使用更小的磁性和其他无源组件，从而缩小转换器尺寸，降低总拥有成本。

为此，Nexperia 推出了 SiC 肖特基二极管技术，将先进的合并 PIN 肖特基结构与“薄型 SiC”技术优势融为一体，可充分提高器件性能。现有产品的额定电压为 650V，但未来的器件可采用 DPAK、D2PAK、TO-220 和 TO-247 封装，工作电压和电流将会高达 1200V 和 20A。

## 参考文献

- 1 [www.nexperia.com](http://www.nexperia.com)
- 2 [二极管应用手册设计工程师指南](#)

### 关于 Nexperia

Nexperia 总部位于荷兰，是一家在欧洲拥有丰富悠久发展历史的全球性半导体公司，目前在欧洲、亚洲和美国共有 15,000 多名员工。作为基础半导体器件开发和生产的领跑者，Nexperia 的器件被广泛应用于汽车、工业、移动和消费等多个应用领域，几乎为世界上所有电子设计的基本功能提供支持。Nexperia 为全球客户提供服务，每年的产品出货量超过 1,000 亿件。这些产品在效率（如工艺、尺寸、功率及性能）方面成为行业基准，获得广泛认可。Nexperia 拥有丰富的 IP 产品组合和持续扩充的产品范围，并获得了 IATF 16949、ISO 9001、ISO 14001 和 ISO 45001 标准认证，充分体现了公司对于创新、高效、可持续发展和满足行业严苛要求的坚定承诺。

在[此处](#)查找您的地区销售办事处

© 2023 Nexperia B.V.

保留所有权利。未经版权所有者优先书面同意，禁止复制本文全部或部分内容。本文档中所提供的信息不构成任何报价或合同的一部分，且被认为是准确可靠的，如有变更，恕不另行通知。对于使用本文档所产生的任何后果，出版方概不承担任何责任。出版内容既不传达也不暗示专利或者其他工业或知识产权下的任何许可。

[nexperia.com](http://nexperia.com)

发布日期：

2023年4月

