

热稳定性科学： 确保反向偏置二极管的最佳性能

 Nima Lotfi, Nexperia产品应用工程师

 Surabhi Hlremath, Nexperia产品应用工程师

二极管通常用于它们需要以反向偏置方式工作的整流器和电源转换应用。二极管在反向偏压下工作时产生的漏电流会导致自热，严重影响其安全工作的能力。二极管可以安全工作的边界条件称为安全工作区(SOA)。在整流器应用中使用二极管时，器件必须保持在其SOA范围内，并具有足够的安全裕量，以确保稳健可靠的工作。在乘员安全至关重要的高功率密度（意味着高温）汽车应用中，这一点尤为重要。

本白皮书研究反向偏置二极管的热稳定性并探讨热失控的概念。文本还将演示如何计算二极管的SOA，讨论影响整流器应用中器件热限值的因素，包括技术和封装类型。

二极管作为热系统

除了漏电流引起的自热之外，反向偏压下二极管的热稳定性还取决于通过其工作所在系统的热阻散发热量的能力。在热平衡期间，器件的结温可以使用以下等式进行描述，其中固定环境温度 T_a 可视为热“接地”：

$$T_j = R_{th(j-a)} \times P_{dissipated} + T_a$$

$R_{th(j-a)}$ 是结与周围环境之间的热阻， $P_{dissipated}$ 是器件中耗散的功率。在图1中，因为这两个竞争过程而达到了稳态条件。

1. 热系统通过热阻（用深绿色线表示）散热的能力。
2. 由反向漏电流（和潜在的开关损耗）产生的器件自热，其中漏电流水平随着结温的增加而增加（由橙色线表示）。

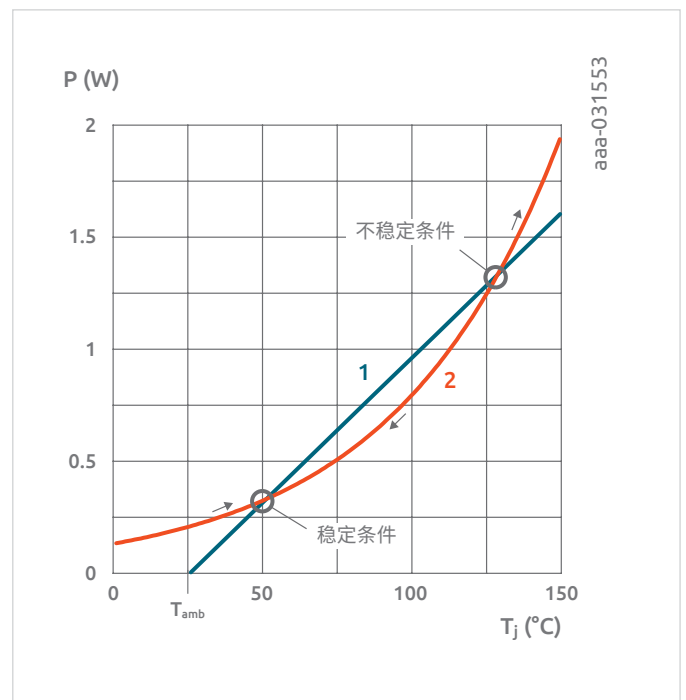


图1. 稳态热平衡工作条件

深绿色线（代表耗散功率）在环境温度下与x轴相交，然后以与系统热导率(1/R_{th})成比例的斜率上升。二极管漏电流（橙色线）产生的功率随着结温的升高而呈指数增长。两条曲线交点的坐标就是热平衡条件。第一个交点对应于系统的稳定热平衡。此时，只要通过器件自热产生的功率低于耗散的功率，结温就会降低并收敛到热稳定的工作条件。然而，如果产生的功率高于可耗散的功率（图中代表不稳定条件的交点），器件结温将继续升高，最终变得热不稳定，这个发展过程称为“热失控”。因此，该器件将继续消耗更多电流，直到由于热过载而彻底失效。

图2显示了因热失控而失效的器件的X射线图像。

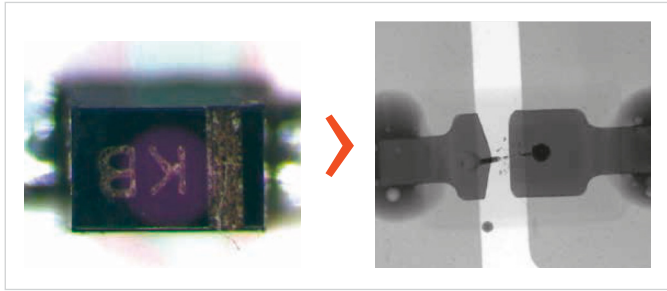


图2. 热失控导致器件失效

在这里，损坏是由于超过焊线的熔断电流而造成的。然而，对于夹片粘合封装器件，热过载会损坏半导体芯片。环氧模塑料明显变色，表明出现过高温。

系统的安全裕量是稳定条件和不稳定条件之间的温差。随着环境温度的升高，安全裕量会缩小，直到稳定和不稳定平衡条件重合（图3），此时满足热失控条件：

$$\frac{dP_{generated}}{dT} = \frac{1}{R_{th}}$$

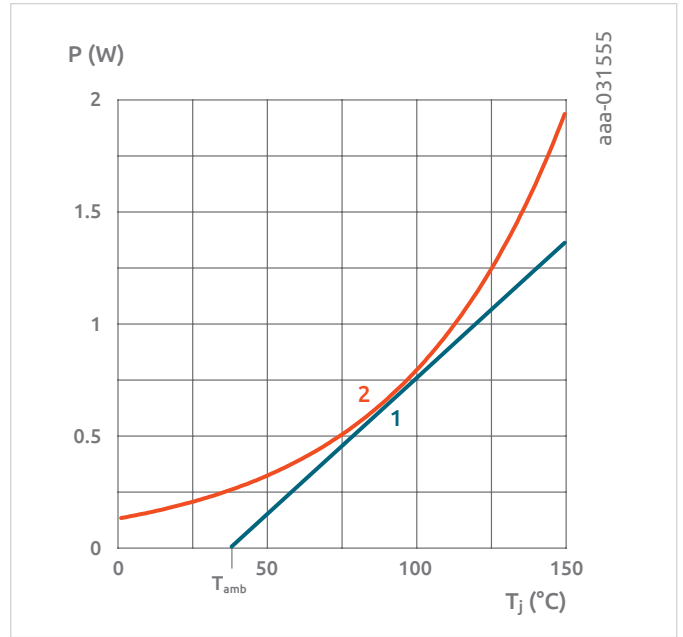


图3. 环境温度持续升高，导致热安全裕量降低，热失控风险增加

热失控条件的限值定义了反向偏压下二极管的安全工作区域。对于给定的反向偏压V_R，相应的漏电流I_R是随结温变化测量的。应用以下公式：

$$\frac{dP_{generated}}{dT} \times R_{th} \geq 1 \text{ (with } P_{generated} = V_R \times I_R \text{)}$$

可根据给定热阻(R_{th})，计算每个反向偏压点的热失控温度限值。该方程如图4所示，其中显示了基于结温的二极管最大热稳定反向电压。

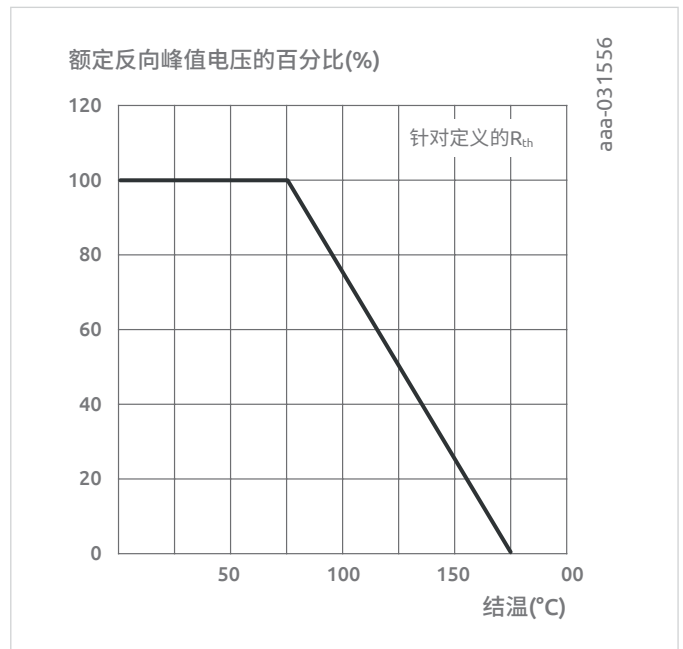


图4. 二极管最大反向电压与结温的关系

在实践中，SOA图的用法如下：

所需的最大反向电压决定了已知产品 $R_{th(j-a)}$ 的给定应用的最大结温。可以考虑整流器数据手册中给出的给定反向电压和结温下器件的泄漏电流，从而计算出产生的功率。可使用下述公式轻松计算出允许的最大环境温度：

$$T_{amb_max} = T_{j_max} - P_{dissipated} \times R_{th(j-a)}$$

器件技术对SOA的影响

根据以下公式，二极管的SOA受到热阻的重大影响：

$$\frac{dP_{generated}}{dT} = \frac{I}{R_{th}}$$

因此，可以使用结至焊点热阻 $R_{th(j-sp)}$ 较低的封装或具有更好热性能的PCB和衬底（例如陶瓷PCB）来增加SOA。用于构建二极管的半导体技术也会影响SOA，因为反向漏电流决定了给定偏压点产生的功率。在比较不同技术的漏电流时，最好使用电流密度而不是实际漏电流。这种方法可消除芯片尺寸的影响，并能够对不同技术进行对等比较。图5显示了五种不同二极管技术（反向偏压为100 V）的漏电流密度和结温之间的关系，包括：

- › 100 V低漏电流平面肖特基二极管
- › 100 V低 V_f 平面肖特基二极管
- › 200 V超快速恢复二极管
- › 120 V SiGe（锗化硅）二极管
- › 100 V Trench肖特基二极管

该图解释如下：

- › 正如预期一样，低 V_f 肖特基二极管（用低功函数金属制造）表现出最高的漏电流
- › 相比之下，低漏电流平面肖特基器件的漏电流密度低两个数量级，这表明势垒高度对漏电流造成了指数级影响
- › 超快速恢复二极管的漏电流密度也较低
- › 有趣的是，新型SiGe二极管技术的漏电流密度与超快速恢复二极管相同
- › 相较于低漏电流平面肖特基技术，Trench肖特基技术表现出更高的反向漏电流密度（因为采用了沟槽结构）

决定二极管反向偏压热稳定性的决定性因素不是实际漏电流，而是漏电流随温度变化的增加速度。为了帮助更好地理解这一点，图6是对之前的图5根据温度得出的衍生图。反向漏电流密度随温度变化的指数性质意味着这些衍生图也具有指数性质，因此在对数尺度上呈线性。尽管如此，如果器件的阶保持不变，SiGe和超快速技术表现出最大的热稳定性潜力，而低 V_f 平面肖特基的潜力最小。

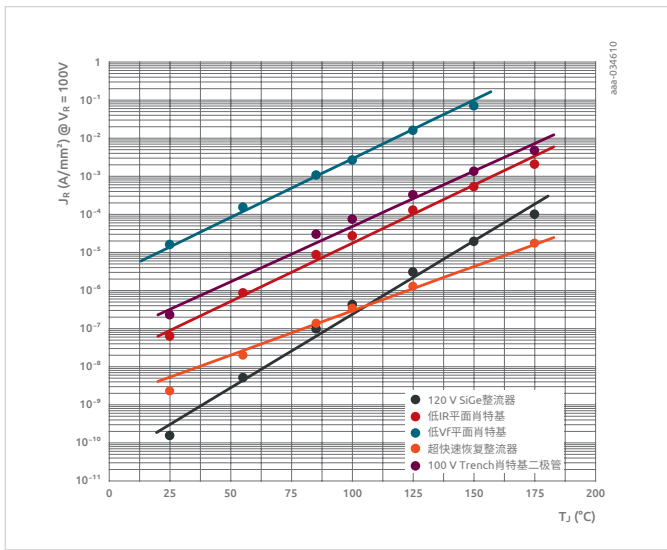


图5. 在100 V电压下测量的五种不同整流器技术的漏电流密度

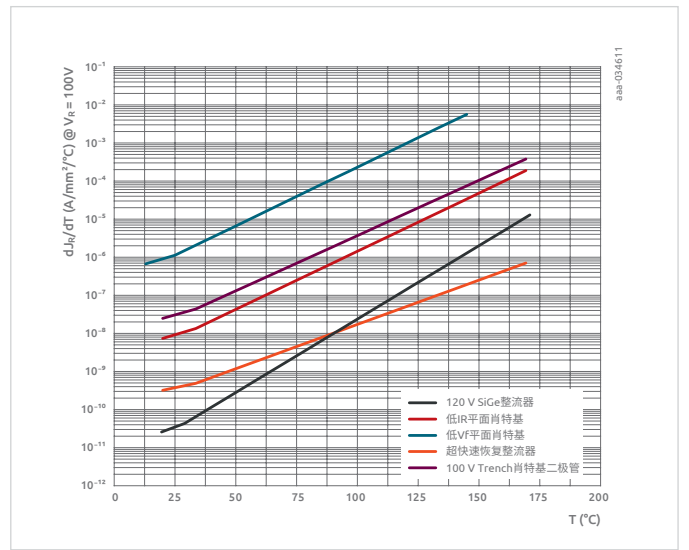


图6. 100 V反向偏压下漏电流密度相对于结温的衍生图

封装类型对SOA的影响

探究封装类型对采用特定技术构造的二极管的SOA有何影响时，我们仍要使用标准化电流（目的是排除晶体尺寸的影响）。因此，热阻也必须标准化。为此，热阻根据封装的管脚尺寸进行标准化。这种方法允许针对给定的反向偏压计算稳定性系数，如下所示：

$$\frac{dJ_R}{dT} \times V_R \times R_T$$

如果使用该方程计算的值小于1，则系统保持热稳定状态。相反，值大于1的系统最终将变得热不稳定。图7显示了SOT23封装中不同技术的稳定性限值。在此比较中，标准管脚尺寸和单层PCB上的SOT23 $R_{th(j-a)}$ 已根据建议的SOT23封装面积进行了标准化。这表明，在这些工作条件下，100 V反向偏压下的平面低 V_f 肖特基二极管只能在最高41°C的结温下工作，才能防止发生热失控。另一方面，SiGe二极管和超快速恢复二极管可以支持超过150°C的结温，同时保持热稳定性。

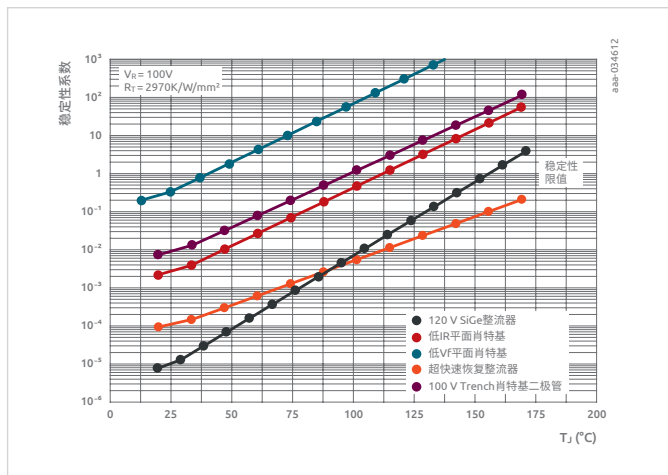


图7. SOT23封装中不同技术在100 V反向电压下的稳定性系数

图8显示了在DFN1110D-3 (SOT8015)封装上执行的类似实验的结果。在这里，平面低 V_f 肖特基技术在100 V反向电压下的稳定性限值上移至 $T_j = 62^\circ\text{C}$ 。这一结果凸显了DFN封装的出色热性能。需要注意的是，虽然其结至环境热阻的绝对值大于SOT23封装，但DFN的管脚尺寸要小得多。

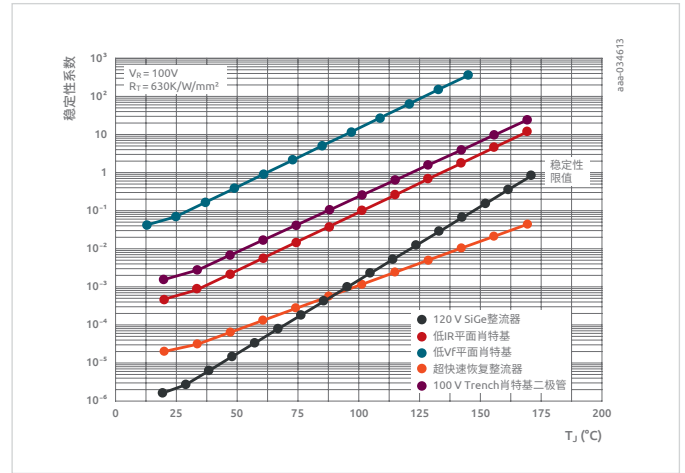


图8. DFN1110D-3 (SOT8015)封装中不同技术在100 V时的稳定性系数

结论

二极管通常用于整流器应用，这些应用要求它们在反向偏压下工作，因此对温度敏感。确保二极管在其SOA中工作需要了解其热行为。本白皮书研究了反向偏置二极管的热稳定性并探讨热失控的概念。文本还演示了如何计算二极管的SOA，讨论影响整流器应用中器件热限值的因素，包括技术和封装类型。SiGe技术填补了超快速二极管和肖特基二极管之间的空白，更好地权衡了漏电流（对应于SOA）和正向压降。SiGe整流器对汽车应用中可能出现的浪涌电流表现出出色的稳健性。

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

发布日期:

2023年6月

