

快恢复二极管在高频电路中的选型策略与应用研究

DOI:10.12238/jpm.v6i5.7991

邓军

杭州汉安半导体有限公司

[摘要] 快恢复二极管是电源电路中的重要组成部分，在保障电路正常运行方面发挥着一定的作用。但是，如果在选型方面出现问题，容易出现器件过热、线路电磁兼容问题。为此，本文围绕快恢复二极管在高频电路中的选型、应用进行了具体探究，首先阐述了快恢复二极管的工作原理、主要特点，然后分析了它的开关特性，接着从反向恢复时间、正向压降、反向电压三个角度分析了快恢复二极管的选型策略，最后总结了快恢复二极管在高频电路中的应用情况。

[关键词] 快恢复二极管；高频电路；选型策略；应用领域

Selection strategy and application of fast recovery diode in high frequency circuit

Deng Jun

Hangzhou Hanan Semiconductor Co., LTD.

[Abstract] Fast recovery diodes are a crucial component in power circuits, playing a significant role in ensuring the proper operation of these circuits. However, if there are issues with selection, problems such as device overheating and electromagnetic compatibility issues can easily arise. This paper specifically explores the selection and application of fast recovery diodes in high-frequency circuits. It first explains the working principle and main characteristics of fast recovery diodes, then analyzes their switching behavior. Next, it examines the selection strategies for fast recovery diodes from three perspectives: reverse recovery time, forward voltage drop, and reverse voltage. Finally, it summarizes the application scenarios of fast recovery diodes in high-frequency circuits.

[Key words] fast recovery diode; high frequency circuit; selection strategy; application field

随着技术的不断发展，电子设备发生了巨大变化，其中，开关电源的变化尤为明显，主要变化趋势为小型化、高频化。而快恢复二极管是电路中的重要器件之一，在电路中可以发挥出整流、逆变、续流等作用，受到了广泛关注。为了匹配不同的电源线路，要重视二极管选型工作，选择与线路最为合适的快恢复二极管。如果在选型方面出现问题，容易发生电磁兼容等问题。特别是在选型过程中如果没有选好反向恢复时间，会导致二极管的功耗增加，引发器件过热等问题。减少二极管开关损耗对优化电源效能具有一定的作用。此外，功率变换电路

的性能指标水平也受快恢复二极管选型的影响。因此，本文将重点探究快恢复二极管在高频电路中的选型策略以及应用情况。

一、快恢复二极管概述

(一) 工作原理

快恢复二极管的工作原理主要和 PN 结的特性有关，从组成结构上看，它由两个 PN 结组成，在设计方面应用了定向掺杂、特殊结构设计，因而可以在正向偏置的情况下快速导通，

在反向偏置的情况下快速截止。进一步分析这两种情况: 在正向偏置方面, 当快恢复二极管的正极、负极分别连接高、低电位时, PN 结会变为导通状态, 为通电流提供保障。在这种状态下, 二极管的正向压降偏低, 功耗与产热少。在反向偏置方面, 当二极管的正极、负极分别连接低、高电位时, PN 结会变为截止状态, 在这一状态下, 反向电流会在短时间内降为 0。在这一变化中, 因为二极管的反向恢复用时很短, 所以可以在短时间内响应电压、电流的变化, 维护电路运行的稳定性和高效性。

(二) 主要特点

第一, 反向恢复用时短。快恢复二极管最突出的特点是反向恢复用时短, 一般采用纳秒作为时间单位, 用时介于数十至数百纳秒之间。这表面, 在反向电压下, 二极管可以快速变换状态, 由导通转变为截止, 由此可以减少反向恢复电流、开关损耗。

第二, 低正向压降。快恢复二极管和一般的二极管在正向压降方面存在区别, 前者的正向压降更低, 介于 0.4~0.6V 之间。在正向导通状态下, 正向压降越低, 功耗、产热量越少, 电路效率越高。

第三, 高反向耐压能力。在反向电压值比较高的情况下, 快恢复二极管也能从导通状态下稳定地转变至截止状态, 电路可靠性高。

第四, 温度特性良好。快恢复二极管具有良好的耐高温特性, 即便工作环境的温度比较高, 依然可以很好地控制电流、转换能量, 环境适应性良好。

二、快恢复二极管的开关特性

对于电路电压而言, 在其切换正反时, 由于 PN 结存储、释放电场电荷有一个过程, 所以开通、关断无法在瞬间完成, 存在一个影响开关时间的势垒电容, 在高频电路中, 它的阻抗比较小, 在势垒电容容值变化的过程中吗, 当达到某个界限时, 二极管的开关性能会受到严重影响, 甚至短路失效。

(一) 开通特性

分析二极管的开通时间变化情况, 在开通最初一段时间, 正向峰值电压 U_{FP} 比较高, 然后电压开始呈现出下降式变化特点。二极管正向开通时间 T_{FR} 指的是电压为稳态正向压降 1.1 倍时的时间。当选择工作在开关状态下的二极管时, 应该重点关注正向峰值电压和正向开通时间, 这两种指标水平对二极管损耗、运行温度有所影响。在一些电路中, 若正向峰值电压超过一定的限值, 会阻碍电路的正常运行, 出现工作失常的问题。

(二) 关断特性

在快恢复二极管中, 如果正向电流大, 且反向电压骤增, 则反向阻断能力的恢复曲线如下所示。

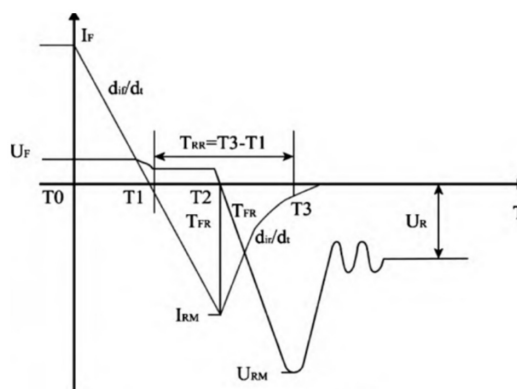


图1 反向恢复特性

在 T_0 时刻, 正处于正向通电状态下的二极管会受到反向电压的作用, 此时正向电流 (I_F) 呈现出降低的变化特点, 变化速率为 dI_F/dt , 变化速率的值主要和反向电压 (U_R)、分布电感有关。在 T_1 时刻, 二极管中的正向电流为 0, 因为 PN 结的电荷注入、抽取并不是瞬时完成的, 因此, 存储电荷变化为零需要一定的时间, 并且在此期间, 二极管的阻断能力都不能恢复, 电流的变化速率不会发生变化, 会朝着反向持续增大, 在这一过程中, 正向压降虽然会出现变化, 但是变化幅度比较小, 变化方向为由高变低。在 T_2 时, 电流变化反向电流的最大值, 即 I_{RM} 。自这一时间点之后, 二极管逐步恢复阻断能力, 其可以承受的反向电压骤增, 反向电流快速降低, 速率为 dI_R/dt , 当通过线路电感时, 电压水平高, 联合反向电压, 得到反向电压最大值, 即 U_{RM} 。在 T_3 时, 反向电流为 I_{RM} 的十分之一。从 T_1 到 T_3 , 总时长为反向恢复时间, 即 T_{RR} 。

高频电路中的快恢复二极管对电路的影响比较大, 尤其是反向恢复特性, 其对电路性能的影响巨大。在高频电路中, 要想保证二极管能够正常发挥作用, 二极管的反向恢复时间不能过大, 否则, 即便电路可以运行, 也会导致二极管出现严重损耗, 电路效率不理想。但是, 如果只考虑反向恢复时间, 不重视反向恢复中的最大反向电流、反向电流变化速率, 容易发生电磁震荡。

结合图 1 分析, 反向恢复时间分为两部分, 即 $T_1 \sim T_2$ 与 $T_2 \sim T_3$ 。在第一部分中, 二极管承受反向电压, 电流从 0 反向变为最大反向电流, 最大反向电流的值主要和存储电荷量、正向电流的变化速率有关。在正向电流变化速率不变的情况下, 最大反向电流的值越大, $T_1 \sim T_2$ 的时间越长, 反向恢复时间也会增加。在第二部分中, 最大反向电流受反向电压的影响减小, 变化速率为 dI_R/dt 。站在工作频率、损耗的角度分析, 反向恢复时间越短越好。但是从局部来看, 第二部分的时间长一点更好, 即 dI_R/dt 不能过高。如果这一变化速率过高, 反向特性就

会越“硬”，受分布电感、电容的影响，容易出现严重的振荡现象，不利于电路正常运行，并且如果这一变化速率过大，还会导致反向电路的变化速率与反向电压迭加，导致最大反向电压过大，容易损坏二极管。

为了评估反向恢复特性，掌握该特性的软硬情况，可以引入软度系数 S ，计算方式如下所示：

$$S = \frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1}$$

结合上式可知， S 实际上是反向恢复中两个时间段之比，若软度系数值比较大，则表明恢复特性比较软，反之，则表明恢复特性比较硬。

根据软度系数的计算公式分析，增加第二部分的时间或者缩短第一部分的时间都可以使得软度系数值增大。在分析二极管的反向恢复特性时，一般将正向电流的变化速率设为定值进行测试，所以软度系数值主要取决于这一变化速率，其可以反映恢复特性的软硬程度。

在快恢复二极管选型中，为了匹配高频电路，反向恢复时间不能过大，但是在保证这一点的同时也不能使恢复特性过硬。所以反向恢复时间比较小的二极管，它的最大反向电流不能过大，如果反向恢复时间比较短，但是最大反向电流没有小，则会导致恢复特性偏硬，不利于电路正常运行。可以用反向电压/最大反向电压来衡量恢复特性的软硬程度，二者的比值和恢复特性的硬度呈负相关的关系。

举例说明，在反向恢复时间一致的前提下，对比反向过冲电流不同的两个快恢复二极管的表现，其中，反向过冲电流大，二极管引发严重的振荡、噪声，不利于电磁兼容测试通过；而反向过冲电流小的二极管，电磁兼容测试通过。

三、快恢复二极管选型策略

当前市场上的快恢复二极管分为三个系列：（1）快恢复二极管属于 FR 系列，它的开关时间介于 150~500 纳秒之间，正向压降为 1.05V，反向耐压为 600~1000V；（2）高效率二极管属于 HER 系列，它的开关时间介于 50~75 纳秒之间，正向压降为 1.38V，反向耐压为 600~1000V；（3）超快二极管属于 SF 系列，它的开关时间介于 200~35 纳秒之间，正向压降为 1.4V，反向耐压为 200~600V。

选型时需要兼顾以下方面：第一，二极管的功耗；第二，输出效率；第三，减少电磁振荡。基于此，特分析如下：

（一）反向恢复时间

在高频电路中应用快恢复二极管时，要选好反向恢复时间，为了保障电路正常运行，该指标水平不能过高，一般为频率倒数的百分之一。例如，若电路频率为 100KHz，则二极管的反向恢复时间不能超过 100 纳秒，同时还要兼顾到反向恢复特

性，不宜过硬。在生产常见给出的规格信息中一般没有软度系数，要想获得该值，可以应用反向恢复曲线。

（二）正向压降

在一定范围内，正向压降越小越好，由于该指标水平越低，反向恢复时间越高，因此在频率不高的电路中，如果普通的二极管符合时间要求，则不用考虑超快二极管。

（三）选择适当的反向电压

在快恢复二极管选型中，反向耐压越大越好，但是因为该指标和正向压降为正相关的关系，因此在选型时，反向电压余量达到 50%及以上即可。如果二极管在使用过程中电流、正向功耗不大，可以不考虑正向压降。

四、二极管在高频电路中的应用

第一，信号检波器。二极管可以转换电流信号，使其从交流变为直流，所以在收音机、电视等方面的应用较多，在具体应用时，应该选择反向电容小、饱和电流高的二极管。

第二，倍频器。二极管在频率乘法器中可以控制信号，在选择适合用于倍频器中的二极管时，应该优先选择饱和电流高、反应速率快、斜率电阻低的二极管。

第三，混合器。二极管可以在混频电路中将两个不同频率的信号变为一个信号，在混合器中选择二极管时，应该优先选择噪声功率低、饱和电流高的二极管。

总结

综上所述，在高频电路中选择、应用快恢复二极管时，应该重点考虑发热功耗、线路震荡等问题，通常根据线路频率选择反向恢复时间，并且要确保恢复曲线具有一定的软度，除此之外，还要考虑到正向压降和反向耐压。由于反向恢复时间会受温度的影响，所以在选择二极管时还要考虑到通电高温环境中反向恢复时间的变化率，确保二极管选型的合理性，从而充分发挥出快恢复二极管在高频电路中的应用优势。

【参考文献】

[1]和峰, 刘钺杨, 刘江, 李翠, 王耀华, 晁武杰, 金锐, 魏晓光. 电力系统用高电压快速恢复二极管坚固性优化[J]. 固体电子学研究进展, 2022, 42(6): 435-440.

[2]王学良, 钱敏. 快恢复二极管技术综述[J]. 河南科技, 2022, 41(12): 36-41.

[3]郑志霞, 陈轮兴, 张丹. PIN 快恢复二极管掺铂工艺改进[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(4): 539-543.

作者简介: 邓军, 出生年月: 1971 年 6 月, 男, 民族: 汉, 籍贯: 湖北省荆门市, 学历: 本科, 职称: 工程师, 研究方向: 半导体信息技术。