

快速晶闸管关断时间影响因素的深度剖析

郑锦春

杭州汉安半导体有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i5.8030

[摘要] 快速晶闸管作为电力电子领域的关键器件，关断时间直接影响着系统的性能与效率。本文深入探讨快速晶闸管关断时间的影响因素，涵盖材料特性、内部结构设计、工作条件、外部电路等多个维度。通过分析，详细阐述了各因素对关断时间的作用机制，为提升快速晶闸管在电力电子系统中的应用性能提供理论依据。

[关键词] 快速晶闸管；关断时间；影响因素

A deep analysis of the factors affecting the turn-off time of fast thyristor

Zheng Jinchun

Hangzhou Hanan Semiconductor Co., LTD.

[Abstract] As a key component in the field of power electronics, fast thyristors have their turn-off time directly impacting system performance and efficiency. This paper delves into the factors influencing the turn-off time of fast thyristors, covering material properties, internal design, operating conditions, and external circuits. Through analysis, it elaborates on how each factor affects the turn-off time, providing a theoretical basis for enhancing the application performance of fast thyristors in power electronic systems.

[Key words] fast thyristor; turn-off time; influencing factors;

在高电压、大功率的电力电子系统中，晶闸管得到了广泛应用，其关断恢复问题也日益受到关注。为避免真空触头出现延时击穿情况，同时降低真空灭弧室分断时的燃弧能量，可采用并联晶闸管提前进行自然换流的方式，以此缩短燃弧时间，进而实现减小燃弧能量的目的。依据晶闸管关断原理，在一定时间后，晶闸管两端会产生正向电压，若此时恢复时间不足，就可能导致晶闸管重新导通，造成关断失败。所以，深入研究影响晶闸管恢复的因素很有必要。以往关于晶闸管关断方式的研究，大多是通过改变电源电压极性，使阳极电流换向，从而实现晶闸管关断。在晶闸管关断恢复期间，其承受的较大反向电压会对恢复过程产生一定影响。本文主要研究晶闸管强迫换流过零的情况，让晶闸管中流过的电流小于其维持电流，最终使晶闸管关断。当晶闸管过零后，并联的二极管会逐渐失去钳

位作用，并与关断支路构成续流回路，通过二极管续流，可让晶闸管两端的恢复电压变为零。

一、快速晶闸管的工作原理与关断过程

（一）基本结构与工作原理

快速晶闸管本质上是一种 pnpn 四层三端半导体器件，由 P1N1P2N2 四层结构组成，具有阳极（A）、阴极（K）和门极（G）三个电极。其工作原理基于内部载流子的传输与复合过程。在正常工作时，当门极施加正向触发信号，使 P1N1 结和 P2N2 结正偏，N1P2 结反偏，器件内部形成强烈的正反馈，导致大量载流子注入，晶闸管迅速导通，阳极电流急剧上升。此时，即使撤掉门极信号，晶闸管仍能保持导通状态，因为内部正反馈机制依然存在，依靠阳极电流维持导通。

（二）关断过程详解

快速晶闸管的关断过程较为复杂，可分为以下几个阶段：一是电流下降阶段，当需要关断晶闸管时，首先要使阳极电流下降。这通常通过减小阳极电源电压或增加负载电阻等方式实现。随着阳极电流的减小，器件内部的载流子浓度开始降低，但此时晶闸管仍处于导通状态，其两端电压较低；二是反向恢复阶段，阳极电流下降到一定程度后，进入反向恢复阶段，此时，由于内部 PN 结存在结电容以及存储电荷，当阳极电压反向时，会出现反向恢复电流。这个电流的大小和持续时间与器件的结构、材料以及工作条件等因素密切相关。反向恢复电流会在电路中产生额外的损耗，并且可能影响电路的稳定性；三是关断完成阶段，经过反向恢复阶段后，当反向恢复电流衰减到零，且晶闸管两端的反向电压能够维持在阻断状态时，晶闸管完成关断过程，此时，器件恢复到阻断状态，能够承受正向和反向电压。在整个关断过程中，各个阶段的时间总和即为关断时间。关断时间的长短直接影响着晶闸管的开关速度和在高频应用中的性能。例如，在高频逆变电路中，如果关断时间过长，会导致器件在一个周期内无法及时关断，从而影响输出波形的质量和系统的工作频率。

二、快速晶闸管关断时间影响因素的深度剖析

（一）材料特性因素对关断时间的影响

1. 半导体材料类型

目前，快速晶闸管主要采用硅（Si）材料制造。硅材料具有良好的电学性能和成熟的制造工艺，但随着对器件性能要求的不断提高，其固有特性在一定程度上限制了关断时间的进一步缩短。与硅相比，碳化硅（SiC）等新型宽禁带半导体材料具有更高的临界击穿电场、电子饱和漂移速度和热导率。采用 SiC 材料制造的快速晶闸管，理论上能够实现更短的关断时间，因为其内部载流子的复合速度更快，且能够承受更高的电压和电流变化率。例如，研究表明，在相同的工作条件下，SiC 快速晶闸管的关断时间可比硅基快速晶闸管缩短数倍。

2. 杂质浓度与分布

在制造过程中通过精确控制杂质的掺杂浓度和分布，可以调节器件内部的载流子寿命和迁移率。例如，增加基区的掺杂浓度，可以缩短少子寿命，从而加快关断过程中载流子的复合速度，缩短关断时间。然而，过高的掺杂浓度可能会导致其他问题，如导通压降增加，影响器件的导通性能。因此，需要在

关断时间和导通性能之间进行优化平衡。同时，杂质分布的均匀性也至关重要。不均匀的杂质分布可能导致器件内部电场分布不均匀，影响载流子的传输和复合过程，进而延长关断时间。

（二）内部结构设计因素对关断时间的影响

1. 基区厚度

较薄的基区可以缩短载流子在基区的传输距离，加快关断过程中载流子的抽取和复合速度，从而有效缩短关断时间。然而，基区厚度的减小也会带来一些负面影响，如器件的阻断能力下降，容易发生击穿现象。因此，在设计基区厚度时，需要综合考虑关断时间和阻断电压等性能指标。例如，在一些高压应用场景中，为了保证足够的阻断电压，基区厚度不能过小，这就需要通过其他方式来优化关断时间，如采用特殊的结构设计或材料处理工艺。

2. 阴极短路点

阴极短路点可以提供额外的载流子复合路径，加速关断过程中存储电荷的消散。当晶闸管进入关断状态时，阴极短路点处的复合作用使得基区中的少子能够更快地被复合掉，从而缩短反向恢复时间，进而缩短关断时间。同时，阴极短路点还可以改善器件的通态电流临界上升率（ di/dt ）性能，提高器件在高电流变化率应用中的可靠性。但是，阴极短路点的引入也会对器件的导通压降产生一定影响，需要在设计时进行权衡。

3. 门极结构

合理设计门极的形状、尺寸和与其他电极的相对位置，可以优化门极触发信号的传输和对器件内部载流子的控制能力。例如，采用较大的门极-阴极周界长度，可以增加门极触发时的初始导通面积，提高 di/dt 耐量和导通扩展速度，有利于快速建立导通状态。在关断过程中，良好的门极结构设计可以更好地控制载流子的抽取和复合，加快关断速度。此外，门极与阴极之间的电容和电阻特性也会影响关断时间。

（三）工作条件因素对关断时间的影响

1. 温度因素

随着结温的升高，半导体材料内部的载流子热运动加剧，载流子的复合率发生变化。一般来说，温度升高会导致少子寿命延长，这是因为高温下电子-空穴对的产生率增加，而复合中心的活性也可能发生改变。在关断过程中，较长的少子寿命意味着存储电荷消散所需的时间增加，从而延长了关断时间。

例如，当结温从常温（25℃）升高到 100℃时，快速晶闸管的关断时间可能会增加 50%以上。这种结温对关断时间的影响在高温环境应用或大功率器件中尤为明显，因为大功率器件在工作时会产生大量的热量，导致结温升高。除了对载流子复合的影响外，温度还会对快速晶闸管的其他参数产生影响，进而间接影响关断时间。例如，温度升高会使器件的导通压降降低，这会影响关断过程中阳极电流的下降速度。同时，温度变化还会导致 PN 结的电容和电阻特性发生改变，影响反向恢复过程中的电流和电压特性。此外，高温环境下，器件内部的材料性能可能会发生变化，如半导体材料的禁带宽度变窄，这也会对关断时间产生一定的影响。

2. 电流大小与变化率

当阳极电流较大时，器件内部存储的电荷量相应增加，在关断过程中，需要更长的时间来消散这些存储电荷，从而导致关断时间延长。例如，在额定电流为 100A 的快速晶闸管中，当阳极电流从 50A 增加到 100A 时，关断时间可能会从 $5\mu\text{s}$ 延长到 $8\mu\text{s}$ 。这是因为较大的阳极电流会使器件内部的载流子浓度更高，复合和抽取过程变得更加复杂。此外，过大的阳极电流还可能导致器件发热严重，进一步影响关断时间，甚至可能损坏器件。在关断过程中，较高的 di/dt 会在器件内部产生较大的感应电动势，这可能会导致反向恢复电流增大，从而延长关断时间。同时，过大的 di/dt 还可能对器件的内部结构造成损伤，影响器件的可靠性。例如，在一些高频开关应用中，如果电流下降率过快，快速晶闸管的关断时间会明显增加，并且可能出现电压尖峰等问题，对电路中的其他元件造成威胁。因此，在实际应用中，需要通过合理设计电路参数来控制电流下降率，以优化快速晶闸管的关断性能。

3. 电压条件

在晶闸管关断瞬间如果正向阳极电压过高，可能会导致反向恢复电流增大，延长反向恢复时间，进而增加关断时间。例如，当正向阳极电压从额定值的 50%增加到 100%时，快速晶闸管的反向恢复时间可能会增加 30%左右。此外，正向阳极电压的变化速率（ dv/dt ）也会对关断时间产生影响。过高的 dv/dt 可能会导致器件误触发或提前导通，影响关断过程的正常进行；在关断过程中，施加适当的反向电压可以加速存储电荷的消散，缩短关断时间。然而，如果反向电压幅值过大，超过了

器件的反向击穿电压，会导致器件损坏。一般来说，在一定范围内，增加反向电压幅值可以有效缩短关断时间，但需要在保证器件安全的前提下进行优化。例如，在某些应用中，可以通过合理设计反向偏置电路，在关断瞬间提供合适的反向电压，以提高器件的关断速度。

（四）外部电路因素对关断时间的影响

一是驱动电路的阻抗匹配，如果驱动电路的输出阻抗与门极输入阻抗不匹配，会导致信号传输过程中出现反射和失真，影响门极驱动信号的质量。例如，当输出阻抗过高时，门极信号的上升和下降沿会变缓，使得晶闸管的导通和关断速度变慢，关断时间延长。二是快速且有效的撤除门极驱动信号并在门极施加适当的反向偏置电压，可以加快关断过程中载流子的抽取，缩短关断时间。例如，采用高速的门极驱动芯片，能够实现门极信号的快速切换，可将关断时间缩短 10%-20%。此外，门极驱动信号的幅值和波形也会影响关断时间。合适的门极驱动幅值能够确保晶闸管在导通和关断过程中工作在最佳状态，而稳定、无畸变的驱动波形可以避免因信号干扰导致的关断异常。

总结

通过对快速晶闸管关断时间影响因素的系统分析可知，材料特性、内部结构设计、工作条件与外部电路均对其关断时间有着显著影响。随着电力电子技术向高频化、大功率化方向发展，一方面要加强新型半导体材料的研发与应用的研究，实现关断时间的大幅缩短与效率的显著提升。另一方面，要借助先进的仿真技术与微纳加工工艺，开发更加精细、高效的内部结构，以实现关断时间与其他关键性能指标的最佳平衡。

【参考文献】

- [1]茹梦歌, 彭振东, 杨晨光, 等.影响快速晶闸管关断时间的因素分析[J].船电技术, 2024, 44(5).
- [2]赵成勇, 叶蕴霞, 展瑞琦, 等.电压跌落影响换流阀晶闸管可靠关断的机理研究[J].中国电机工程学报, 2022(012).
- [3]王伟.晶闸管过零关断零电压介质恢复阻断影响因素的分析[J].[2025-04-21].

作者简介：郑锦春，出生年月：1967 年 07 月，男，民族：汉，籍贯：辽宁省沈阳市，学历：本科，职称：工程师，研究方向：半导体信息技术。