

第2章 电力电子器件

2.1 电力电子器件概述

2.2 不可控器件 – 电力二极管

2.3 半控型器件 – 晶闸管

2.4 典型全控型器件

2.5 宽禁带半导体器件

■ 模拟和数字电子电路的基础

——晶体管 and 集成电路等电子器件

电力电子电路的基础

——电力电子器件

■ 本章主要内容：

- ◆ 对电力电子器件的概念、特点和分类等问题作了简要概述。
- ◆ 分别介绍各种常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题。

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

2.1.3 电力电子器件的分类

2.1.4 本章内容和学习要点

■ 电力电子器件的概念

◆ **电力电子器件 (Power Electronic Device)** 是指可直接用于处理电能的主电路中，实现电能的变换或控制的**电子器件**。

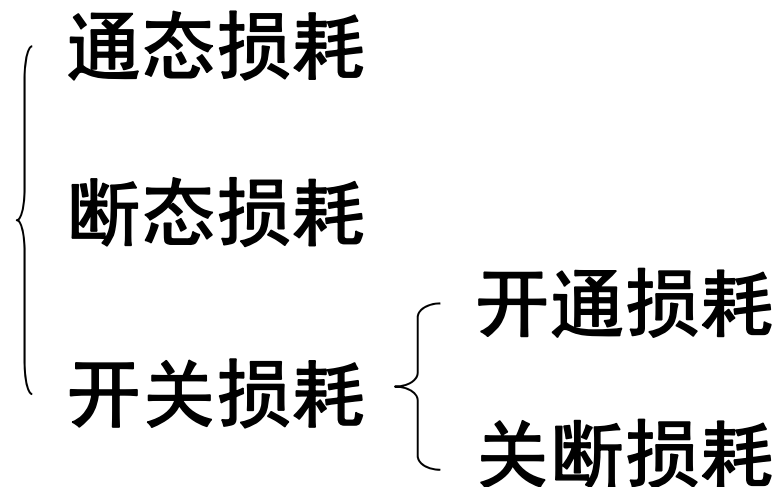
☞ **主电路**：在电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路。

☞ 广义上电力电子器件可分为电真空器件和半导体器件两类，目前往往专指电力半导体器件。

■ 电力电子器件的特征

- ◆ 所能处理**电功率**的大小，也就是其承受电压和电流的能力，是其最重要的参数，一般都远大于处理信息的电子器件。
- ◆ 为了减小本身的损耗，提高效率，一般都工作在**开关状态**。
- ◆ 由信息电子电路来控制，而且需要**驱动电路**。
- ◆ 自身的**功率损耗**通常仍远大于信息电子器件，在其工作时一般都需要安装**散热器**。

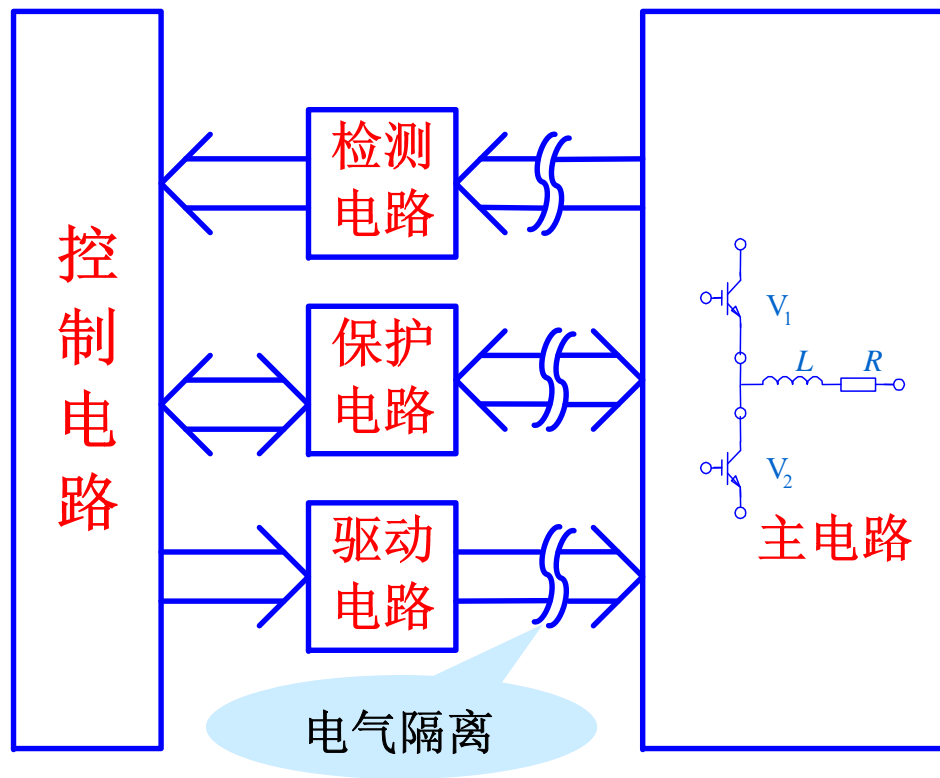
☞ 电力电子器件的功率损耗



- ☞ **通态损耗**是电力电子器件功率损耗的主要成因。
- ☞ 当器件的开关频率较高时，**开关损耗**会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

2.1.2 应用电力电子器件的系统组成

■ 电力电子器件在实际应用中，一般是由**控制电路**、**驱动电路**和以电力电子器件为核心的**主电路**组成一个系统。



■ 按照能够被控制电路信号所控制的程度

◆ 半控型器件

- ☞ 主要是指晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件。
- ☞ 器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

◆ 全控型器件

- ☞ 目前最常用的是 IGBT 和 Power MOSFET。
- ☞ 通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断。

◆ 不可控器件

- ☞ 电力二极管（Power Diode）
- ☞ 不能用控制信号来控制其通断。

■ 按照驱动信号的性质

◆ 电流驱动型

✎ 通过从控制端注入或者抽出**电流**来实现导通或者关断的控制。

◆ 电压驱动型

✎ 仅通过在控制端和公共端之间施加一定的**电压**信号就可实现导通或者关断的控制。

■ 按照驱动信号的波形（电力二极管除外）

◆ 脉冲触发型

✎ 通过在控制端施加一个电压或电流的**脉冲**信号来实现器件的开通或者关断的控制。

◆ 电平控制型

✎ 必须通过**持续**在控制端和公共端之间施加一定电平的电压或电流信号来使器件开通并**维持**在导通状态或者关断并维持在阻断状态

■按照载流子参与导电的情况

◆单极型器件

☞由一种**载流子**参与导电。

◆双极型器件

☞由**电子**和**空穴**两种载流子参与导电。

◆复合型器件

☞由单极型器件和双极型器件集成混合而成，
也称混合型器件。

■ 本章内容

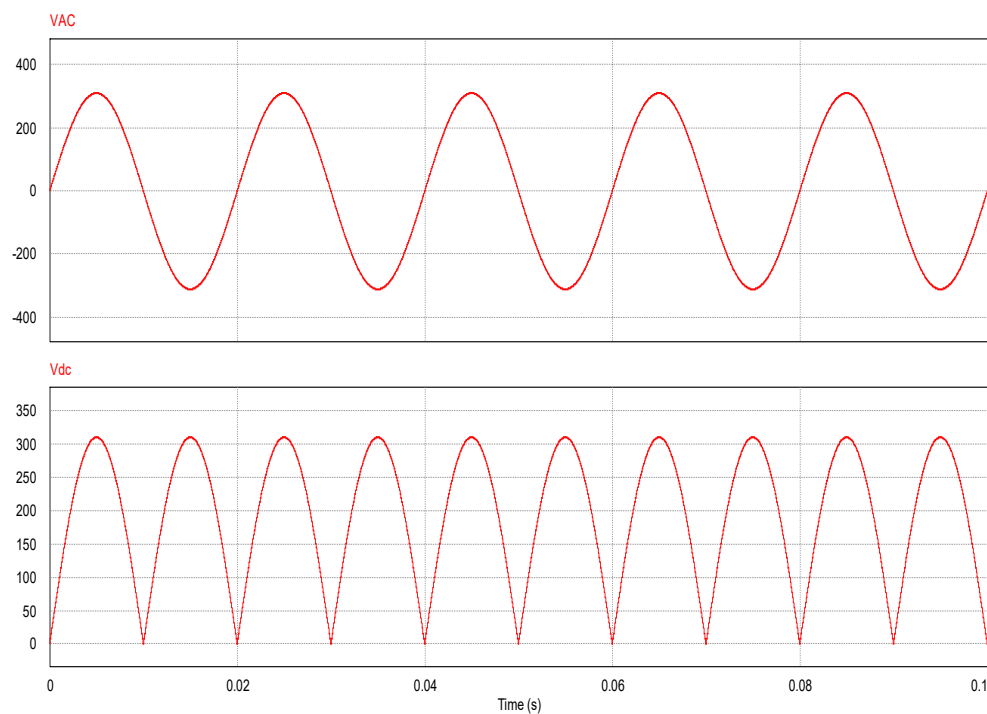
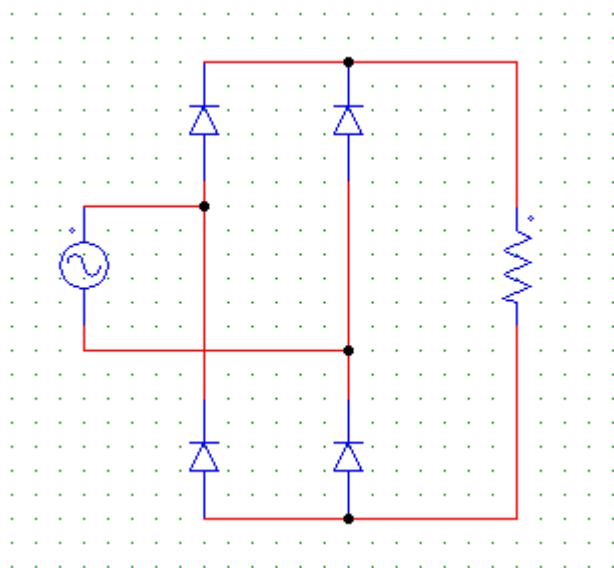
◆按照不可控器件、半控型器件、典型全控型器件和其它新型器件的顺序，分别介绍各种电力电子器件的**工作原理**、**基本特性**、**主要参数**以及选择和使用中应注意的一些问题。

■ 学习要点

- ◆最重要的是掌握其**基本特性**。
- ◆掌握电力电子器件的型号命名法，以及其**参数**和**特性曲线**的使用方法。
- ◆了解电力电子器件的**半导体物理结构**和**基本工作原理**。
- ◆了解某些主电路中对其它电路元件的特殊要求。

■ 如何把交流电变为直流电？

🔑 不控整流电路



🔑 电力二极管

2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理

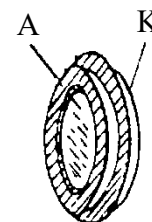
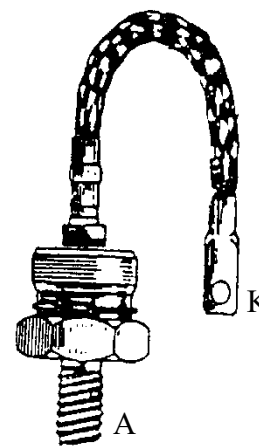
2.2.2 电力二极管的基本特性

2.2.3 电力二极管的主要参数

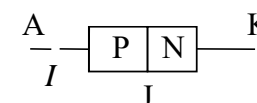
2.2.4 电力二极管的主要类型

2.2.1 电力二极管的工作原理

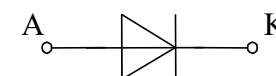
■ 电力二极管是以半导体PN结为基础的，实际上是由一个面积较大的PN结和两端引线以及封装组成的。从外形上看，可以有螺栓型、平板型等多种封装。



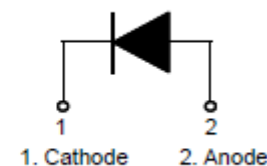
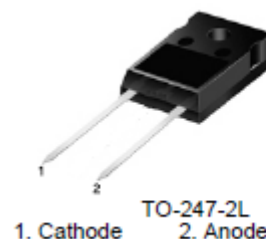
a)



b)



c)



■ 二极管的基本原理——PN结的单向导电性

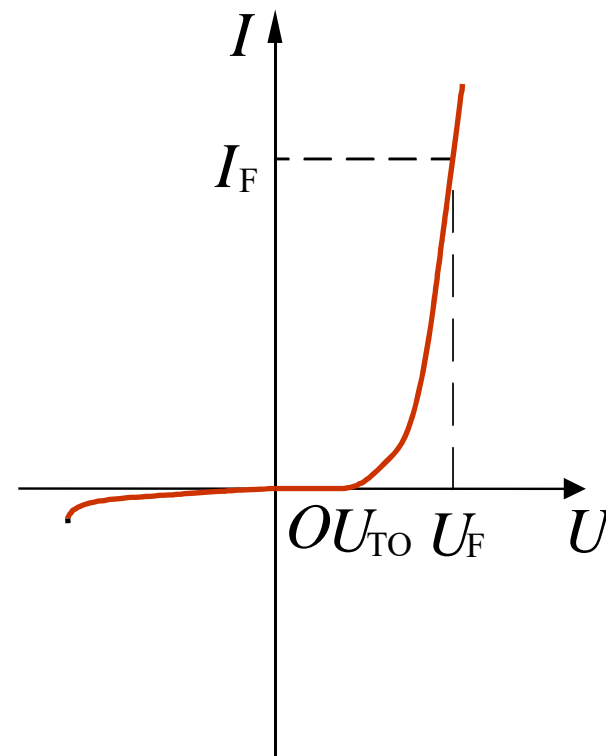
◆ 当PN结外加正向电压（正向偏置）时，在外电路上则形成自P区流入而从N区流出的电流，称为正向电流 I_F ，这就是PN结的正向导通状态。

◆ 当PN结外加反向电压时（反向偏置）时，反向偏置的PN结表现为高阻态，几乎没有电流流过，被称为反向截止状态。

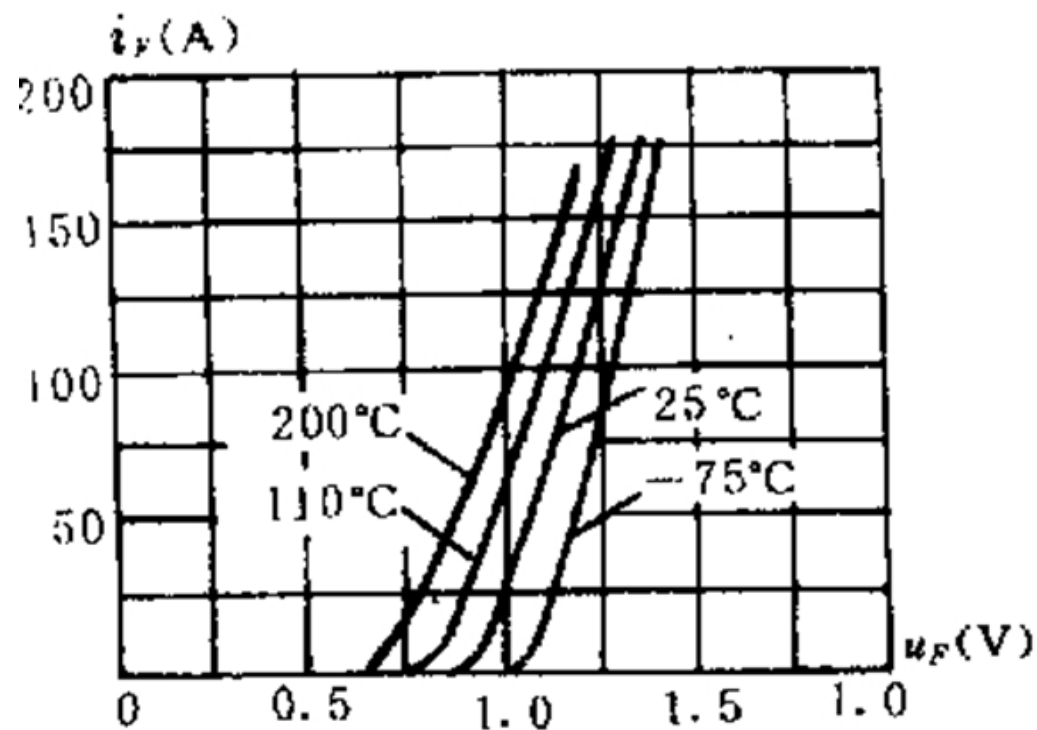
◆ PN结具有一定的反向耐压能力，但当施加的反向电压过大，反向电流将会急剧增大，破坏PN结反向偏置为截止的工作状态，这就叫反向击穿。机理不同有雪崩击穿和齐纳击穿两种形式。

■ 静态特性

- ◆ 主要是指其伏安特性。
- ◆ 正向电压大到一定值（门槛电压 U_{TO} ），正向电流才开始明显增加，处于稳定导通状态。与 I_F 对应的电力二极管两端的电压即为其正向电压降 U_F 。
- ◆ 承受反向电压时，只有少子引起的微小而数值恒定的反向漏电流。



- 温度特性：负温度系数



■ PN结的电容效应

◆ 称为**结电容 C_J** ，又称为**微分电容**

◆ 按其产生机制和作用的差别分为**势垒电容 C_B** 和**扩散电容 C_D**

☞ 势垒电容只在外加电压变化时才起作用，外加电压频率越高，势垒电容作用越明显。在正向偏置时，当正向电压较低时，势垒电容为主。

☞ 扩散电容仅在正向偏置时起作用。正向电压较高时，扩散电容为结电容主要成分。

◆ 结电容影响PN结的**工作频率**，特别是在高速开关的状态下，可能使其单向导电性变差，甚至不能工作。

2.2.2 电力二极管的开关特性

■ 动态特性

◆ 因为结电容的存在，电压—电流特性是随时间变化的，这就是电力二极管的动态特性，并且往往专指反映通态和断态之间转换过程的开关特性。

◆ 由正向偏置转换为反向偏置

✎ 电力二极管并不能立即关断，而是须经过一段短暂的时间才能重新获得反向阻断能力，进入截止状态。

✎ 在关断之前有较大的反向电流出现，并伴随有明显的反向电压过冲。

✎ 延迟时间： $t_d = t_1 - t_0$

电流下降时间： $t_f = t_2 - t_1$

反向恢复时间： $t_{rr} = t_d + t_f$

恢复特性的软度： t_f / t_d ，或称恢复系数，用 S_r 表示。

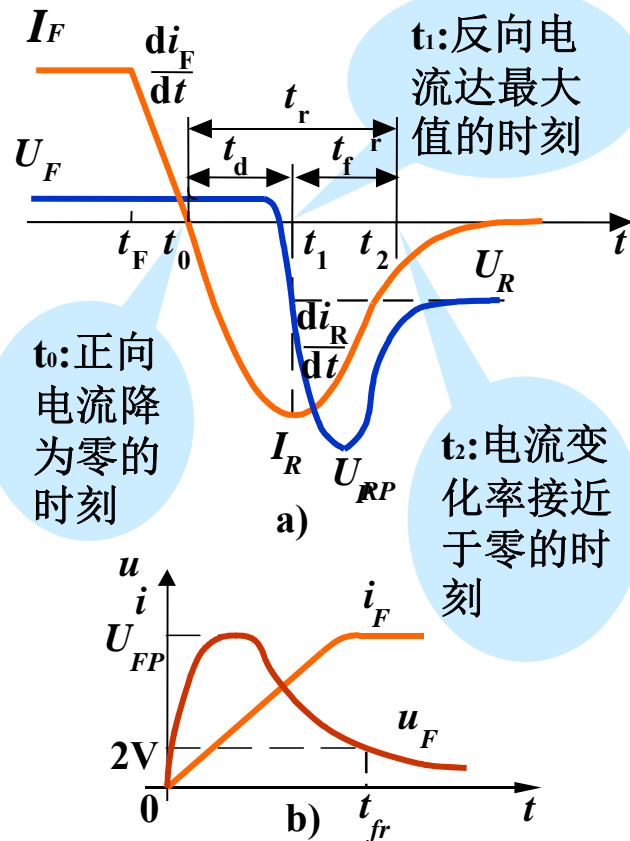


图2-6 电力二极管的动态过程波形

a) 正向偏置转换为反向偏置

b) 零偏置转换为正向偏置

■ 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

◆ 指电力二极管长期运行时，在指定的管壳温度（简称壳温，用 T_C 表示）和散热条件下，其允许流过的最大**工频正弦半波电流**的平均值。

◆ $I_{F(AV)}$ 是按照电流的发热效应来定义的，使用时应按**有效值相等**的原则来选取电流定额，并应留有一定的裕量。

■ 对于周期性函数 $f(t)$

平均值的定义

$$F_d = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t)$$

有效值的定义

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f^2(\omega t) d(\omega t)}$$

正弦半波的电流平均值与有效值

设电流峰值为 I_m ，则通态平均电流

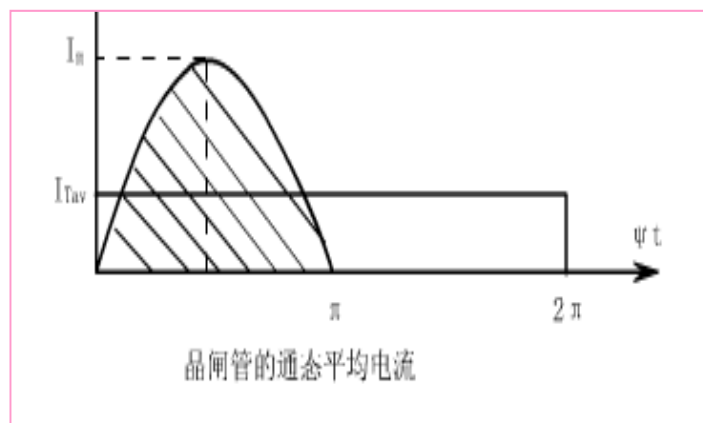
$$\begin{aligned} I_{Tav} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{I_m}{2\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi} \\ &= \frac{I_m}{\pi} \end{aligned}$$

该电流波形的有效值

$$\begin{aligned} I_T &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\ &= I_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \omega t}{2} \right) d(\omega t)} \\ &= \frac{I_m}{2} \end{aligned}$$

正弦半波电流波形系数 K_f 应有

$$K_f = \frac{I_T}{I_{Tav}} = \frac{I_m/2}{I_m/\pi} = 1.57$$



■ 正向压降 U_F

◆ 指电力二极管在指定温度下，流过某一指定的**稳态正向电流**时对应的正向压降。

■ 反向重复峰值电压

◆ 指对电力二极管所能重复施加的反向最高峰值电压。

◆ 使用时，应当留有**两倍**的裕量。

■ 反向恢复时间 t_{rr} 反向恢复问题的影响

- 引起较大的损耗
- di/dt 造成较大的电磁干扰, 以及尖峰电压($L_s di/dt$)
- 限制了二极管的开关速度

■ 最高工作结温 T_{JM}

- ◆ 结温是指管芯PN结的平均温度，用 T_J 表示。
- ◆ 最高工作结温是指在PN结不致损坏的前提下所能承受的**最高平均温度**。
- ◆ T_{JM} 通常在 $125\sim 175^{\circ}\text{C}$ 范围之内。

■ 浪涌电流 I_{FSM}

- ◆ 指电力二极管所能承受最大的连续一个或几个**工频周期**的**过电流**。

二极管的类型（重要！：名称、分类及应用场合）

- 按照正向压降、反向耐压、反向漏电流等性能，特别是反向恢复特性有不同的分类
- 应用时，应根据不同场合的不同要求，选择不同类型的功率二极管；
- 性能上的不同是由半导体物理结构和工艺上的差别造成的。

分类：

- 普通二极管 -- t_{rr} 大，适用于低频,如 1 kHz 整流电路
- 快恢复二极管
 $t_{rr} < 5 \mu s$ ，开关二极管，用于高频整流/斩波和逆变,其中超快恢复 $t_{rr} < 50 ns$
- 肖特基二极管

◆ 普通二极管（General Purpose Diode）

- ☞ 又称**整流二极管（Rectifier Diode）**，多用于开关频率不高（1kHz以下）的整流电路中。
- ☞ 其**反向恢复时间**较长，一般在 $5\mu\text{s}$ 以上。
- ☞ 其**正向电流定额**和**反向电压定额**可以达到很高，分别可达数千安和数千伏以上。

◆快恢复二极管（Fast Recovery Diode——FRD）

✎恢复过程很短，特别是反向恢复过程很短（一般在 $5\mu s$ 以下）。

✎快恢复外延二极管（Fast Recovery Epitaxial Diodes——FRED），采用外延型P-i-N结构，其反向恢复时间更短（可低于 $50ns$ ），正向压降也很低（ $0.9V$ 左右）。

✎从性能上可分为快速恢复和超快速恢复两个等级。前者反向恢复时间为数百纳秒或更长，后者则在 $100ns$ 以下，甚至达到 $20\sim 30ns$ 。

超快恢复二极管 Ultra Fast Recovery Diode

◆肖特基二极管（Schottky Barrier Diode——SBD）

☞属于多子器件

☞优点在于：反向恢复时间很短（ $10\sim 40ns$ ），正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲；在反向耐压较低的情况下其正向压降也很小，明显低于快恢复二极管；因此，其开关损耗和正向导通损耗都比快速二极管还要小，效率高。

☞缺点在于：当所能承受的反向耐压提高时其正向压降也会高得不能满足要求，因此多用于200V以下的低压场合；反向漏电流较大且对温度敏感，因此反向稳态损耗不能忽略，而且必须更严格地限制其工作温度。

1. 静特性

PN结特性

2. 开关特性

电容效应引起:

关断过程---反向峰值电流 I_{RR} , 反向恢复时间 t_{rr}

开通过程---正向恢复

3. 分类和适用场合

普通二极管: 1kHz 以下

快/超快恢复二极管: 高频

肖特基二极管: 高频低压 ($\leq 200V$)

4. 参数

额定正向平均电流 I_F

反向重复峰值电压

反向恢复时间

正向导通压降

思考：

- 1. 二极管的种类有哪些？各自的应用场合？**
- 2. 二极管的反向恢复带来哪些问题？**