



全国高等教育自学考试指定教材 机电一体化工程专业(独立本科段)

# 模拟、数字及电力电子技术(下册)

附：模拟、数字及电力电子技术课程自学考试大纲

[1999年版]

组编/全国高等教育自学考试指导委员会  
主编/余孟尝

机械工业出版社

全国高等教育自学考试指定教材  
机电一体化工程专业（独立本科段）

# 模拟、数字及电力电子技术

（附：模拟、数字及电力电子技术课程自学考试大纲）

下 册

全国高等教育自学考试指导委员会 组编

余孟尝 主编



机械工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

模拟、数字及电力电子技术/余孟尝主编.-北京:机械工业出版社,  
1999.10

全国高等教育自学考试指定教材 机电一体化工程专业:独立本科段  
ISBN978-7-111-07428-1

I. 模… II. 余… III. ①模拟电路-高等教育-自学考试-教材②数字  
电路-高等教育-自学考试-教材③电力系统-电子技术-高等教育-自学考试-  
教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 61915 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王世刚 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

印刷:北京市鑫霸印务有限公司

1999 年 10 月第 1 版

2012 年 10 月第 17 次印刷

787mm×1092mm 1/16 34.25印张 835千字

定价:46.00 元 (上、下册)

本书如有质量问题,请与教材供应部门联系。

版权所有,不得翻印

## 编者的话

本书下册电力电子篇由李鹤轩（第九、十、十一、十二章）和李杨（第十三章）编写。

下册既可与上册模拟和数字篇一起使用，为适应不同类型教学的需要也可单独作为电力电子技术基础的教材使用。

电力电子技术是以功率处理，电能变换为主要对象的现代工业电子技术。包括电力半导体器件，功率变换器及其控制系统。本篇内容共分五章，首先介绍几种主要电力半导体器件的工作原理、特性及主要参数，目的是为了能正确地使用它们。后几章内容是根据不同电能变换形式介绍由电力半导体器件组成的各种功率变换电路。

本篇内容反映当前电力电子技术的发展趋势，注重基本概念和各种电路工作原理的阐述并具有工程实用性。力求分析问题深入浅出，总结规律，图文结合，便于自学。自学时更应注意每章小结。

编者 1999 年 6 月

# 目 录

编者的话

## 电 力 电 子 篇

|                           |     |                            |     |
|---------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 概述 .....                  | 1   | 第三节 不可逆输出 PWM 变换器 .....    | 132 |
| <b>第九章 电力半导体器件</b> .....  | 3   | 第四节 可逆输出 PWM 变换器 .....     | 134 |
| 第一节 电力半导体器件的发展概况 .....    | 3   | 第五节 PWM 变换器的控制电路 .....     | 141 |
| 第二节 功率二极管 .....           | 5   | 本章小结 .....                 | 149 |
| 第三节 晶闸管 .....             | 9   | 习题 .....                   | 149 |
| 第四节 功率晶体管 .....           | 32  | <b>第十二章 脉宽调制 (PWM)</b>     |     |
| 第五节 功率场效应晶体管 .....        | 46  | <b>逆变器</b> .....           | 150 |
| 第六节 绝缘栅双极晶体管 .....        | 57  | 第一节 PWM 逆变器的工作原理           |     |
| 第七节 几种新型场控器件 .....        | 68  | 和分类 .....                  | 150 |
| 本章小结 .....                | 71  | 第二节 晶闸管逆变器 .....           | 152 |
| 习题 .....                  | 75  | 第三节 单相桥式 PWM 逆变器 .....     | 160 |
| <b>第十章 晶闸管相控变换器</b> ..... | 77  | 第四节 三相桥式 PWM 逆变器 .....     | 164 |
| 第一节 晶闸管相控整流电路的            |     | 第五节 逆变器输出电压的谐波 .....       | 169 |
| 相控原理 .....                | 77  | 第六节 PWM 逆变器的同步调制和异         |     |
| 第二节 单相桥式相控整流电路 .....      | 80  | 步调制 .....                  | 173 |
| 第三节 三相半波相控整流电路 .....      | 87  | 第七节 PWM 逆变器的数字和微处理器        |     |
| 第四节 三相桥式相控整流电路 .....      | 93  | 控制 .....                   | 174 |
| 第五节 变压器漏抗对整流电路的影响 .....   | 100 | 本章小结 .....                 | 178 |
| 第六节 功率因数 .....            | 101 | 习题 .....                   | 179 |
| 第七节 晶闸管相控有源逆变电路 .....     | 104 | <b>第十三章 交流电压调整器和周波</b>     |     |
| 第八节 晶闸管的触发电路 .....        | 111 | <b>变换器</b> .....           | 181 |
| 第九节 晶闸管的保护 .....          | 118 | 第一节 交流电压调整器 .....          | 181 |
| 本章小结 .....                | 121 | 第二节 周波变换器 .....            | 191 |
| 习题 .....                  | 124 | 本章小结 .....                 | 196 |
| <b>第十一章 直流脉宽调制 (PWM)</b>  |     | 习题 .....                   | 197 |
| <b>变换器</b> .....          | 127 | <b>参考文献</b> .....          | 199 |
| 第一节 直流斩波器的工作原理 .....      | 127 | <b>附录 模拟、数字及电力电子技术课程自学</b> |     |
| 第二节 晶闸管直流斩波器 .....        | 129 | <b>考试大纲</b> .....          | 201 |

# 电力电子篇

## 概述

1948 年第一只晶体管发明引起了第一次电子工业革命。半导体器件首先被用于小功率领域，如通信、信息处理和计算机，以后出现的集成电路，发展的集成度越来越高，集成规模越来越大，各种功能越来越全，构成当今的微电子技术和信息电子技术。1958 年美国通用电气（GE）公司研制成功第一个工业用晶闸管（SCR）开始，大大扩展了半导体器件的功率控制范围。电子技术开始迈入强电领域。电能的变换和控制从旋转变流机组、离子变流器而进入了以电力半导体器件为组成的固态变流器时代，标志着电力电子技术的新纪元。随后随着各种新型电力半导体器件的陆续涌现，大功率变压、变频的突破，高效、节能、省材地使用电能的新时代正一步一步地到来，人类将会更科学更合理地用电，创造更加繁荣的物质文明和精神文明。

电力电子技术是以功率处理，电能变换为主要对象的现代工业电子技术。一般包括电力半导体器件，功率变换器及其控制系统。近年来，功率变流技术得到迅猛的发展，通过变流技术处理的电能在整个国民经济总耗量中所占的比例越来越大。发达国家现在电能的 75% 左右经过电力电子技术变换和控制后使用，预计到 2000 年以后将发展到 95% 以上。

电能的变换形式如图 9.0-1 所示。可以概括为以下四种：

(1)  $AC \rightarrow DC$  把交流电能转换为直流电能。实现上述转换的装置统称为整流器。如用于充电、电镀、电解和直流电动机速度调节等。

(2)  $DC \rightarrow AC$  把直流电能转换为交流电能。实现上述转换的装置统称为逆变器。逆变器输出可以是恒频，如用于恒压恒频（CVCF）电源或不间断供电设备（UPS）；也可以变频，如用于各种变频电源、高频感应加热、电焊机电源、有功功率电源调节器和交流电动机的变频调速等。

(3)  $AC \rightarrow AC$  将交流电能的任一参数（幅值、频率和相位）加以转换。实现这种转换的装置统称为交流变换器。其中，对交流电压幅值进行转换的电路称为交流调压器；对交流频率进行转换的电路则为变频器。如用于调温、调光、交流电动机的变频调速等。

(4)  $DC \rightarrow DC$  将直流电能的任一参数（幅值和极性）加以转换。实现这一转换的装置称为直流变换器或称直流斩波器。主要用于直流电压变换器、开关电源和电车、地铁、矿车、搬运车等的直流电动机的牵引传动。

由此可见，电力电子技术在工农业生产、交通运输、邮电通信、航空航天等国民经济各部门以至于家用电器（空调机、冰箱、洗衣机等）各方面有着广泛的应用。有人形象地作过

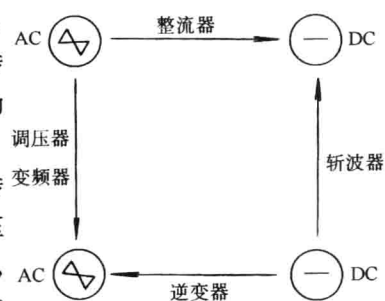


图 9.0-1 电能变换形式

比喻：如果说计算机是现代化生产设备的大脑，电动机和各种电磁执行元件是手足，那么电力电子装置就是支配手足动作的肌肉和神经，足可以说明它在国民经济中的地位。它是机电融合的重要一环，它的发展是推动机电一体化产品发展的强大动力，它也是改造传统产业的新兴技术。

本篇共分五章：第九章电力半导体器件，介绍几种主要的电力半导体器件的工作原理、特性及主要参数，如何正确使用它们。后几章内容是根据不同电能变换形式介绍由电力半导体器件组成的各种功率变换电路。第十章晶闸管相控变换器，包括相控整流电路和相控逆变电路，介绍  $AC \rightarrow DC$  和  $DC \rightarrow AC$  的晶闸管功率变换电路。第十一章  $DC \rightarrow DC$  变换器（斩波器），重点介绍由高频自关断器件组成的脉宽调制（PWM）变换器的工作原理和控制。第十二章  $DC \rightarrow AC$  逆变器，重点介绍由高频自关断器件组成的脉宽调制（PWM）无源逆变器的工作原理、性能和控制。第十三章  $AC \rightarrow AC$  变换器，包括交流电压调整器和周波变换器，介绍  $AC \rightarrow AC$  电压和频率的变换。

## 第九章 电力半导体器件

电力半导体器件是电力电子技术的基础。本章从应用角度讨论了几种主要的电力半导体器件的工作原理、特性及主要参数，以便能正确地使用它们。

### 第一节 电力半导体器件的发展概况

我们从本篇绪论中已经了解电力电子技术的发展概貌。电力半导体器件从 1958 年第一只工业用晶闸管问世，算作第一代电力半导体器件以来，至今已 40 年，一代一代的电力半导体器件在国外相继问世。下面列出了几种主要电力半导体器件：

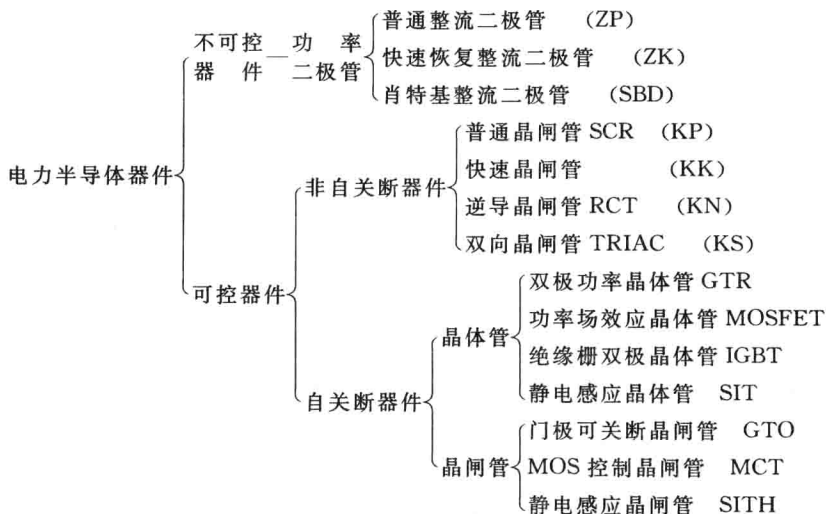


图 9.1-1 中示出了几种主要电力半导体器件的控制容量和开关频率范围。

在电路中，电力半导体器件是处于受控通、断的开关状态，从这意义上说，器件可分如下三大类型：

(1) 不可控器件 这类器件通常为两端器件，它只有整流的作用，而无可控的功能，如功率二极管。

(2) 半控型器件（亦称非自关断器件） 这类器件通常为三端器件。在它的控制端（门极）施加控制信号只能控制其开通，而不能控制其关断，故由此而得名。普通晶闸管（SCR）及其大部分派生器件属这一类。

(3) 全控型器件（亦称自关断器件） 这类器件也为三端器件。通过控制端（门极或栅极或基极）施加控制信号，既可以控制其导通，又可以控制其关断，故称之为全控型器件。主要有门极可关断晶闸管（GTO）、功率晶体管（GTR）和各种场控器件。

根据器件内部导电的机理，电力半导体器件又可分为双极型、单极型和混合型（复合型）三种类型。凡由电子和空穴两种载流子都参与导电过程的半导体器件称为双极型器件，这

类器件是电流控制器件，具有通态压降低、阻断电压高、电流密度大等特点，但控制功率较大、存在二次击穿问题。常见的有 GTR、GTO、SITH 等。凡由一种载流子（即多数载流子）参与导电过程的电力半导体器件称为单极型器件。如功率 MOSFET、SIT 等。这类器件是电压控制器件，具有驱动功率小、开关频率高、无二次击穿问题、安全工作区宽等明显特点，其缺点是通态电阻大、导通压降较高，因此它的容量受到限制。混合型器件也可称作复合型器件，它是由双极型器件和单极型器件集成混合而成。它们利用耐压高、电流密度大、导通压降低的双极型器件（如 GTR、SCR、GTO 等）作为输出元件，而用输入阻抗高、响应速度快的单极型器件 MOSFET 作为输入级，因而兼备了两者的优点。这类器件的典型代表有 IGBT、MCT 和功率集成电路（PIC）。

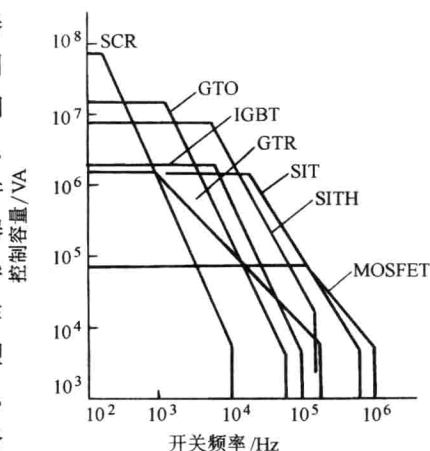


图 9.1-1 各种电力半导体器件的适用范围

以晶闸管(SCR)为代表的第一代电力半导体器件和由它组成的变流装置解决了传统的电能变换装置中存在的能耗大、效率低和装置笨重问题，一定程度上控制了工业噪声，装置的寿命也延长了。但这类器件无自关断能力，致使它在逆变器和斩波器应用中需要庞杂的换流电路，也由于它的开关频率低（400Hz 以下），又采用相控原理，因而由它组成的装置出现网侧谐波成分高和功率因数恶化以及输出负载上谐波严重需要较大滤波器等弊病。但它的定额容量是所有电力半导体器件中最高的，所以在大容量应用中目前还得使用它。

进入 70 年代，随着变换器技术的发展，特别是交流变频技术的兴起，采用脉宽调制（PWM）技术提高变换器的性能，日益迫切需要开关频率高、有自关断能力的器件，相继出现了功率晶体管（GTR），门极可关断晶闸管（GTO），功率场效应晶体管（MOSFET），这些是第二代电力半导体器件。GTR 的工作频率比 SCR 高（达林顿管 10kHz 以下，非达林顿管 20kHz），这样 PWM 技术在 GTR 变换器中得到了广泛的应用，出现了所谓“20 千周革命”。但它是双极型少数载流子器件，开关频率仍然偏低，还存在二次击穿，不易并联等缺点，所以应用面受到限制，目前容量达 1200V/800A。GTO 的开关频率为数 kHz，是门极关断的高压器件，电压电流定额可达很高（4500V/3000A），但它关断增益低，需要一个十分庞大的关断驱动电路，通态压降要比 SCR 高（约 2~4.5V），开通  $di/dt$  和关断  $du/dt$  低也是限制它推广应用的另一个原因，还需要一个庞大的吸收电路，这些都限制它的应用。功率 MOSFET 的出现标志着电力半导体器件在高频化进程中的一次重要进展。它是多数载流子、电压控制、有自关断能力的电力半导体器件。它具有工作频率高（几十 kHz 至数百 kHz，低压管可达 MHz），开关损耗小，安全工作区宽（几乎不存在二次击穿问题），输入阻抗高，峰值容量大，易并联等优点，它的问世引起了开关电源超小型化的变革。但它的通态特性是阻性的，且它的通态电压降随着额定电压增加而成倍增大，因此限制它在中、大功率领域中的应用。目前容量为 1000V/100A。

80 年代是国际电力电子技术飞速发展的时代，除了对现有器件进一步提高其开关频率，降低通态压降，扩大容量之外，又发展起来静电感应晶体管（SIT）和静电感应晶闸管

(SITH)。它们是利用门极电场改变空间电荷区的宽度来开闭电流通道的原理制成的器件，具有高压大电流和高频同时兼备的特点。也是工业高频应用中很有发展前途的器件。

80 年代电力半导体器件较为引人注目的成就之一就是开发出双极型复合器件。研制复合型器件的主要目的是实现器件高压、大电流参数同其动态参数之间最合理的折衷，使其兼有 MOS 器件和双极型器件的突出优点，从而产生出较为理想的高频、高压和大电流器件。目前认为最有发展前途的复合型器件是绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)，这种器件是场控器件，其工作频率超过 20kHz，它的出现为工业应用领域的高频化开辟了广阔前景。IGBT 集 GTR 和 MOSFET 的优点于一身，既有电流密度大、通态压降低 (1.5~3.5V)、耐压高的优点，又有输入阻抗高、速度快、热稳定性好和驱动电路简单的优点。因此，开始生产第一代产品 (10kHz)，发展到第二代产品 (20kHz)，第三代产品 (40kHz)，并生产出具有集成驱动电路和保护电路的 IGBT 变频器智能功率模块 IPM。IGBT 目前容量水平为 1600V/1200A。它有取代 GTR 和 MOSFET 的趋势。

80 年代另一个重要的发展是高压功率集成电路 (HVIC) 和智能功率集成电路 (Smart Power IC) 的研制和开发，被称为第三代电力半导体器件。它们是电力电子同微电子技术紧密结合的产物。在功率集成电路中，不仅是主电路器件，而且把驱动电路，过压过流保护，电流检测，甚至温度自动控制等电路集成成一个整体。它们实际上是一种微型功率变换装置，应用起来更加方便，更加可靠，应用前景非常诱人。图 9.1-2 表示 PIC 及其应用产品的电压和电流容量。目前产品容量还不小，因为要解决高、低压绝缘隔离，热传导等问题。有人预言它的进一步发展使“我们人类站在第二次电子革命的边缘”。

概括起来，80 年代由于场控自关断器件的急速兴起，它们都是集高频、高压和大电流于一身的性能优越的电压控制器件，它们的出现使人们开始以高频技术方法处理电力电子技术问题的阶段，并同时开始步入智能化，所以有人说 90 年代是高频电力电子技术时代，而 2000 年以后很可能迎来的是智能电力电子时代。

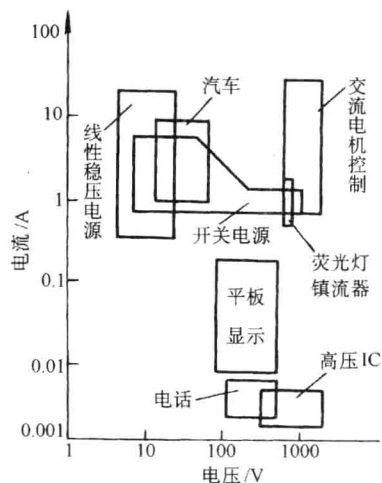


图 9.1-2 PIC 及其应用领域  
及要求额定值

## 第二节 功率二极管

功率二极管使用的基本材料是硅，有一个 PN 结，一般用扩散工艺制造。其结构和电路符号示于图 9.2-1 中。功率二极管广泛应用于从交流到直流的不可控整流，在逆变器中通常起反馈与续流作用。

### 一、PN 结的形成

在 P 型半导体中空穴为多数载流子 (简称多子)，自由电子为少数载流子 (简称少子)。而在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。当 P 型半导体与 N 型半导体制做在一起时，由于交界面两侧载流子的浓度差很大，P 区空穴浓度远大于 N 区，而 N 区自由电子浓度远大于 P 区，故必然产生“扩散运动”，即一些空穴会从 P 区向 N 区扩散，也会有

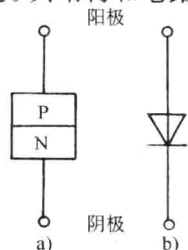


图 9.2-1 二极管  
a) 结构 b) 符号

一些电子从N区向P区扩散。这一过程首先在界面两侧附近进行,当空穴离开P区后,留下了不能移动的带负电荷的杂质离子,形成了一层带负电荷的区域;同理,当电子离开N区后,留下了不能移动的带正电荷的杂质离子,形成了一层带正电荷的区域,即图9.2-2中所示的空间电荷区,图中小圆圈表示除自由电子和空穴外的正负离子。

于是产生了内部电场,方向由N区指向P区,正好是阻止扩散运动的进行。在内电场作用下又有电子逆电场方向漂移回N区,而空穴沿电场方向漂移回P区,这种在电场力作用下载流子的运动称为漂移运动。在一定温度下,扩散运动和漂移运动必然会达到动态平衡。在动态平衡时,交界面附近产生的缺少载流子的区域称为空间电荷区,或称耗尽层(这个区域中的载流子浓度比P区和N区的多数载流子浓度低很多,像是被消耗尽了一样)、阻挡层(内电场对载流子的扩散运动具有阻挡作用)、势垒区(内电场的存在说明N区电位高于P区电位,这个电位差是由于电子势能变化引起的,电子要从N区到P区必须越过这个被称为势垒的能量高坡),也就是PN结。

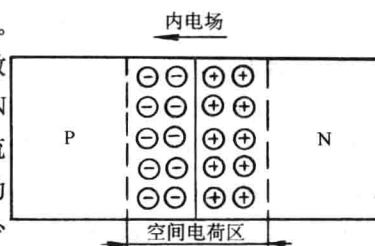


图 9.2-2 PN 结的形成

## 二、PN 结的单向导电性和静态伏安特性

如果在PN结两端外加不同方向的电压,破坏了原来的平衡,而呈现出单向导电性。

当PN结加上正向外加电压 $U$ ,即 $U$ 的正端接P区,负端接N区,亦称正向偏置时,外电场的方向与PN结内电场方向相反,削弱了内部电场,空间电荷区缩小了,如图9.2-3a所示。因而也就削弱了内电场对多子扩散的阻碍作用,原先的动态平衡被破坏。这时P区的空穴不断涌入N区,而N区的电子也会不断涌入P区,各自成为对方区中的少数载流子。我们把多数载流子在外加因素(外加电压)作用下不断向导电类型相反的区域运动的现象称为少子的注入。形成正向电流 $I_F$ 。随着外加电压的增加,正向电流按指数规律增长。正向PN结表现为一个很小的电阻,可以流过较大的正向电流,称为正向导通。正向导通后,其上压降只有1V左右,PN结的正向伏安特性如图9.2-4第一象限所示。

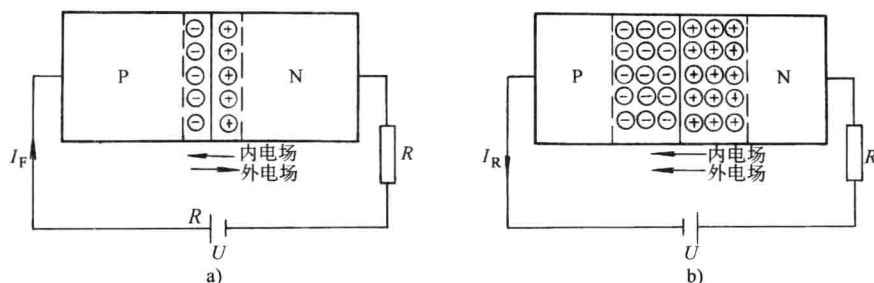


图 9.2-3 PN 结单向导电性

a) 正向偏置 b) 反向偏置

当PN结加上反向电压(即反向偏置)时,如图9.2-3b所示。外电场的方向与PN结内电场的方向一致,空间电荷区变宽,势垒加厚,从而强烈地阻止PN结两边多数载流子的扩散,多子的扩散电流变得微不足道。但对PN结两边的少子却不起阻碍作用,而以漂移电流形式通过空间电荷区,形成了PN结的反向电流 $I_R$ 。只不过由于少数载流子浓度很低,所以反向漏电流也很小,表现为高阻状态,称为反向截止。也就是说,反向偏置的PN结存在着抽取少子的效应。当外加反向电压增加到空间电荷区内场强达到雪崩击穿强度时,反向漏电流急剧增

加，故 PN 结反向偏置时的伏安特性曲线如图 9.2-4 第三象限所示。

### 三、电导调制和正、反向恢复

我们再来考察一下 PN 结的正向电阻，如果一个 1000A/2000V 整流二极管管芯硅片厚度是 0.5mm，取  $15\text{cm}^2$  的面积，硅片电阻率为  $100\Omega\cdot\text{cm}$ ，如按此计算，那么它的电阻将是  $R = \rho l/s = 100 \times 0.05/15 \Omega = 0.33\Omega$ 。当流过 1000A 时的管压降为  $1000 \times 0.33\text{V} = 330\text{V}$ ，该器件非烧坏不可。实际上其上的压降 1V 左右，即其有效电阻仅为原始电阻的 0.3%，这是因为在通过正向大电流时，注入基区（通常是 N 型材料）的空穴浓度大大超过原始 N 型基片的多子浓度，为了维持半导体中电中性条件，多子浓度也要相应大幅度地增加。这意味着，在大注入条件下原始基片的电阻率实际上大大地下降了，也就是电导率大大地增加了。我们把这种现象称为基区电导调制效应。这样一来，P 区和 N 区两端部的电压就维持在很低水平，即 1V 左右，所以正向偏置的 PN 结相当于“低阻态”。在 GTR, SCR, IGBT, SITH 和 MCT 器件中都存在着这种电导调制效应，因此它们导通后的压降都很低。

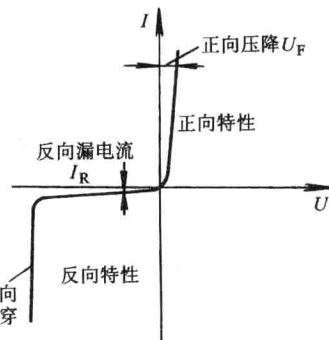


图 9.2-4 PN 结静态伏安特性

而器件在阻断状态时，器件的视在电阻又变得很大，例如，2000V 器件的漏电流在 2mA 量级，那么它的断态电阻竟达到  $10^6\Omega$  量级。如前述数据，其通态电阻仅为  $10^{-3}\Omega$  量级。也就是说，电阻变化的实质就是在器件处于两种稳态时，基区中少子的浓度发生  $10^9$  倍的变化。因此，器件导通后，一旦加反向电压让其阻断时，必须经过一段时间才能使通态时注入到基区的大量载流子消失。这个过程叫做“反向恢复”。在这期间，这些多余的少数载流子一方面通过复合消失掉，另一方面被空间电荷区内的电场扫出去，而引成很大的恢复电流。反向恢复过程中典型的电流和电压波形表示在图 9.2-5 中。起初，二极管通过正向电流  $I_F$  并且有约 1V 的正向压降  $U_F$ 。当  $t = t_1$  时闭合开关 S 使二极管反向偏置时，施加电压  $-U_R$ 。首先正向电流以  $di/dt = -U_R/L$  速率衰减，这里  $L$  是环路电感。 $t = t_2$  时衰减到零后开始了反向恢复过程。由于通态时注入到基区的大量载流子消失，造成了反向恢复电流的流动。当  $t = t_3$  时，加于空间电荷区的正向电压减小为零，非平衡载流子完全消失，此后空间电荷区的载流子浓度将开始衰减。反向恢复电流到达最大值  $I_{Rm}$ ，之后反向恢复电流明显下降，反向电压开始上升。如果反向恢复电流降落很快并且由于高值的  $L di/dt$  可以产生大的瞬态过电压。反向恢复电流曲线所包的面积代表反向恢复电荷  $Q_{RR}$ ，它的大小取决于关断前正向电流  $I_F$ 。从二极管正向电流过

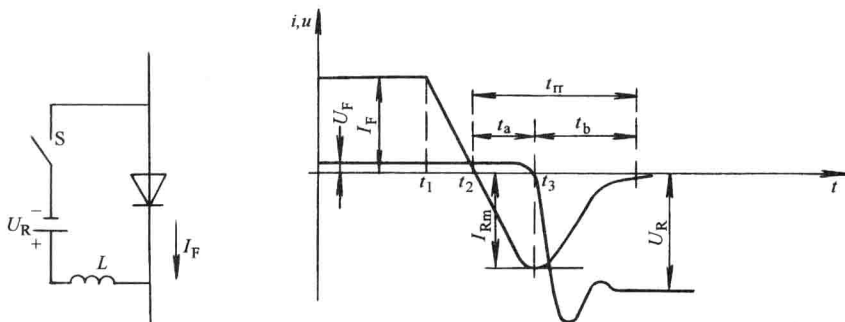


图 9.2-5 二极管的反向恢复

零到反向电流下降到其峰值 10% 时的时间间隔称为反向恢复时间  $t_{rr}$ ，它与结温，正向电流的下降速率和换向以前的正向电流等因素有关。反向恢复时间  $t_{rr}$  由  $t_a$  和  $t_b$  两段时间组成。比值  $t_b/t_a$  称为“软度”因子，决定着二极管恢复时的瞬时电压过冲。“软”恢复二极管“软度”因子值约为 1，意味着低的振荡过电压，而“快”恢复二极管有较小“软度”因子和较大电压超调。反向恢复性能在 50Hz 或 60Hz 交流电流上运行的整流电路中是要求不苛刻的。然而，在斩波器和逆变器中，在与半导体开关器件配合中必须采用快速恢复二极管。在这些应用中，反向恢复电流的峰值是一个重要的二极管参数，因为这一电流必须由电路中另一个开关器件承载，增加了器件的开关负担。

当电路迫使 PN 结从反向闭锁状态转入正向导通时，PN 结的通态压降并不立即达到其静态伏安特性所对应的稳态压降值，而需经过一段正向恢复时期 ( $t_{fr}$ )。在这期间，正向动态峰值压降可以达到数伏至数十伏，这是因为基区少子的储存也需要一定时间才能达到稳态值。正向恢复时间限制了正向电流的上升率和开关速度。

#### 四、PN 结电容

空间电荷区就像一个平板电容器。能够存放电荷（载流子），即充电；也能够被取走电荷，即放电。于是，当 PN 结两端电压变化时，将引起 PN 结空间电荷的改变，表现为电容性效应。同时引起势垒层的变化，可以用势垒电容来描述这种效应。

另外，PN 结的正向电流是由 P 区中的空穴和 N 区中的电子相互扩散造成的。当 PN 结外加正向电压时，大量的电子由 N 区进入 P 区，空穴由 P 区进入 N 区；但电子进入 P 区后并不是立即与空穴复合而消失，而是在靠近耗尽层的一定距离内（通常称为扩散长度）一面继续扩散，一面与空穴复合后消失，反之类同。可见在扩散长度内存储了一定数量的电荷，正向电流越大，存储电荷越多。它们随正向电压变化亦具有电容的性质，称为扩散电容。势垒电容和扩散电容构成了 PN 结电容。在开关电路中，PN 结的电容同电路中的杂散电感可能引起高频振荡，需要引起注意。

#### 五、二极管的主要性能参数

##### （一）额定正向平均电流 $I_{F(AV)}$

指管子长期运行时，允许通过的最大正向平均电流，其定额方法是在指定壳温、规定散热条件下二极管流过工频正弦半波的平均电流。在该电流下由于管子的正向压降引起的损耗使结温升高不超过最高允许结温。由此定额方法可知，正向电流是按发热条件定义的，因此在应用中应按有效值相等条件来选取二极管定额。对应额定正向平均电流的有效值定额为  $1.57I_{F(AV)}$ 。使用时，再考虑有 (1.5~2) 倍的裕量来选取二极管定额。

##### （二）反向重复峰值电压 $U_{RRM}$

指管子反向所能施加的最高峰值电压。通常是反向雪崩击穿电压的 2/3。使用时，通常按电路中二极管可能承受的最高峰值电压的两倍来选取二极管定额。

##### （三）最高允许结温 $T_{JM}$

结温是指整个 PN 结的平均温度。最高允许结温是指在 PN 结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度。最高允许结温  $T_{JM}$  通常在 125~175℃ 范围之内。

##### （四）正向（峰值）电压 $U_{FM}$

整流管通以  $\pi$  倍或规定倍数额定正向平均电流时的瞬态峰值电压。

##### （五）反向恢复时间 $t_{rr}$

是从二极管正向电流过零到反向电流下降到其峰值 10% 时的时间间隔。它与反向电流上升率、结温、开关前的最大正向电流等因素有关。

#### (六) 正向浪涌电流 $I_{FSM}$

一种由于电路异常情况（如故障）引起的，并使结温超过额定结温的不重复性最大正向过载电流。

#### (七) 定额 $I^2t$

也称为二次方安秒定额，它表示承载正向不重复最大电流的能力，即电流浪涌不超过一个工频周期时

$$I^2t = \left( \frac{1 \text{ 个周期浪涌电流定额}}{2} \right)^2 \frac{1}{f}$$

式中  $f$ ——电流频率， $f=50\text{Hz}$ ；

$t$ ——浪涌时间。

此时环境条件为  $25^\circ\text{C}$ 。

根据这一定额选用熔断器容量，当环境温度高于  $25^\circ\text{C}$  时，该定额随温度增加应减额使用。

### 六、二极管的种类

#### (一) 普通整流二极管

普通整流二极管多用于  $1\text{kHz}$  以下的整流电路中，由于工作频率低，反向恢复时间并不重要，一般为  $25\mu\text{s}$  左右。电流定额从小于  $1\text{A}$  到数  $\text{kA}$ ，电压定额从  $50\text{V}$  到  $5\text{kV}$  左右。这种二极管通常用扩散工艺制造。应用包括电力牵引、蓄电池充电、电镀、电解、各类电源、焊接和不间断电源（UPS）系统中。

#### (二) 快恢复二极管

快恢复二极管有小的恢复时间，通常小于  $5\mu\text{s}$ ，适用于高频下 DC-DC 和 DC-AC 变换器电路中，那里恢复速度往往是重要关键。另外，反向恢复电流的峰值也是一个重要参数，因为这一电流必须由电路中另一开关器件承载，增加了器件的开关负担。这类二极管的电流定额从小于  $1\text{A}$  到百安，电压定额从  $50\text{V}$  到  $3\text{kV}$  左右。高于  $400\text{V}$  的快恢复二极管通常用扩散工艺制造，用掺杂或铂控制反向恢复时间  $t_{rr}$  的大小。用外延法制造的二极管具有更快的开关速度，使恢复时间可低于  $50\text{ns}$ ，称超快恢复二极管。由于工艺上的差别它们的正向电压特性也略有不同。

#### (三) 肖特基二极管

极快速恢复和低正向压降的优点在肖特基二极管中被融合在一起了。它使用金属和半导体接触的整流作用代替 PN 结。电流流动仅仅是由于多数载流子，得到低导通压降和消除与少数载流子复合有关的关断滞后。但其反向漏电流较大，阻塞电压耐量较低。肖特基二极管的电流定额目前是从  $1\text{A}$  到  $300\text{A}$  左右，最大电压额定值为  $100\text{V}$ 。这种器件的应用包括高频设备和开关电源。

## 第三节 晶 闸 管

晶闸管也叫硅可控整流器（SCR），是目前工业中实现大容量功率变换和控制的主要电力半导体器件。这里先介绍普通型晶闸管（为方便仍沿用 SCR 表示），然后再简明介绍族系中其它

类型的晶闸管。

### 一、晶闸管的结构

晶闸管从外形上来分有螺栓形、平板形和模块形三种，示于图 9.3-1。额定电流小于 200A 的单个晶闸管采用螺栓形，大于 200A 的单个晶闸管采用平板形。模块形是由数个晶闸管封装在一起，有一单元的、二单元的、四单元和六单元的，目前还限于小容量。对于螺栓形晶闸管，螺栓是晶闸管的阳极 A，它与散热器紧密联接，粗辫子线是晶闸管的阴极 K，细辫子线是晶闸管门极 G。对平板形晶闸管，它的两个平面分别是阳极和阴极，而细辫子线则是门极，使用时两个互相绝缘的散热器把晶闸管紧紧夹在一起。模块形的端子标在铭牌上，使用时用螺栓直接拧紧在散热器上。晶闸管散热器有风冷、水冷和油冷。

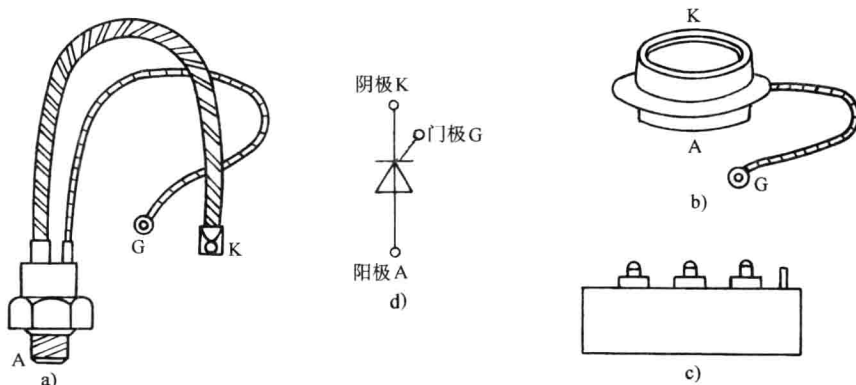


图 9.3-1 晶闸管的外形与符号

a) 螺栓形 b) 平板形 c) 模块形 d) 符号

### 二、晶闸管的工作原理

先按图 9.3-2 做几个实验。实验中，用灯泡当作电路的负载，以显示晶闸管的导通与关断。电源电压与灯泡工作电压相应，可为 3~6V，门极所加电压不能过高，一般 1.5~3V 即可。

从以上实验，可以得出晶闸管导通和关断规律的下列结论。

(1) 在正常情况下，晶闸管导通的必要条件有两个，缺一不可。

- 1) 晶闸管承受正向阳极电压（阳极电位高于阴极电位）；
- 2) 加上适当的正向门极电压（门极电位高于阴极电位）。

晶闸管导通后的管压降不到 1V，电源电压几乎全加到灯泡上，所以灯就亮了。

(2) 晶闸管一旦导通，门极就失去了控制作用，故晶闸管为半控型器件。也正因为如此，晶闸管导通的门极控制信号只要是正向脉冲电压就可以了，称之为触发电压或触发脉冲。

(3) 要使已导通的晶闸管关断，先将门极电流去掉，再使阳极电流减小到某一电流值以下就可以了。能保持晶闸管导通的最小电流称为维持电流  $I_H$ 。具体方法可以是去掉阳极正向电压，或者给阳极加反向电压，或者增加负载阻抗。

(4) 当门极没有加触发电压时，晶闸管具有正向阻断能力。如图 9.3-2a。这种性能是一般二极管所不具备的。

为什么晶闸管会有这些特性呢？这要从晶闸管内部来分析。晶闸管具有如图 9.3-3 中所示的 P-N-P-N 四层结构，是用扩散工艺制造的。它有  $J_1, J_2, J_3$  三个 PN 结。 $P_1$  区引出阳极 (A)， $N_2$  区引出阴极 (K)， $P_2$  区引出门极 (G)。如果正向电压施加到阳极和阴极之间，会使

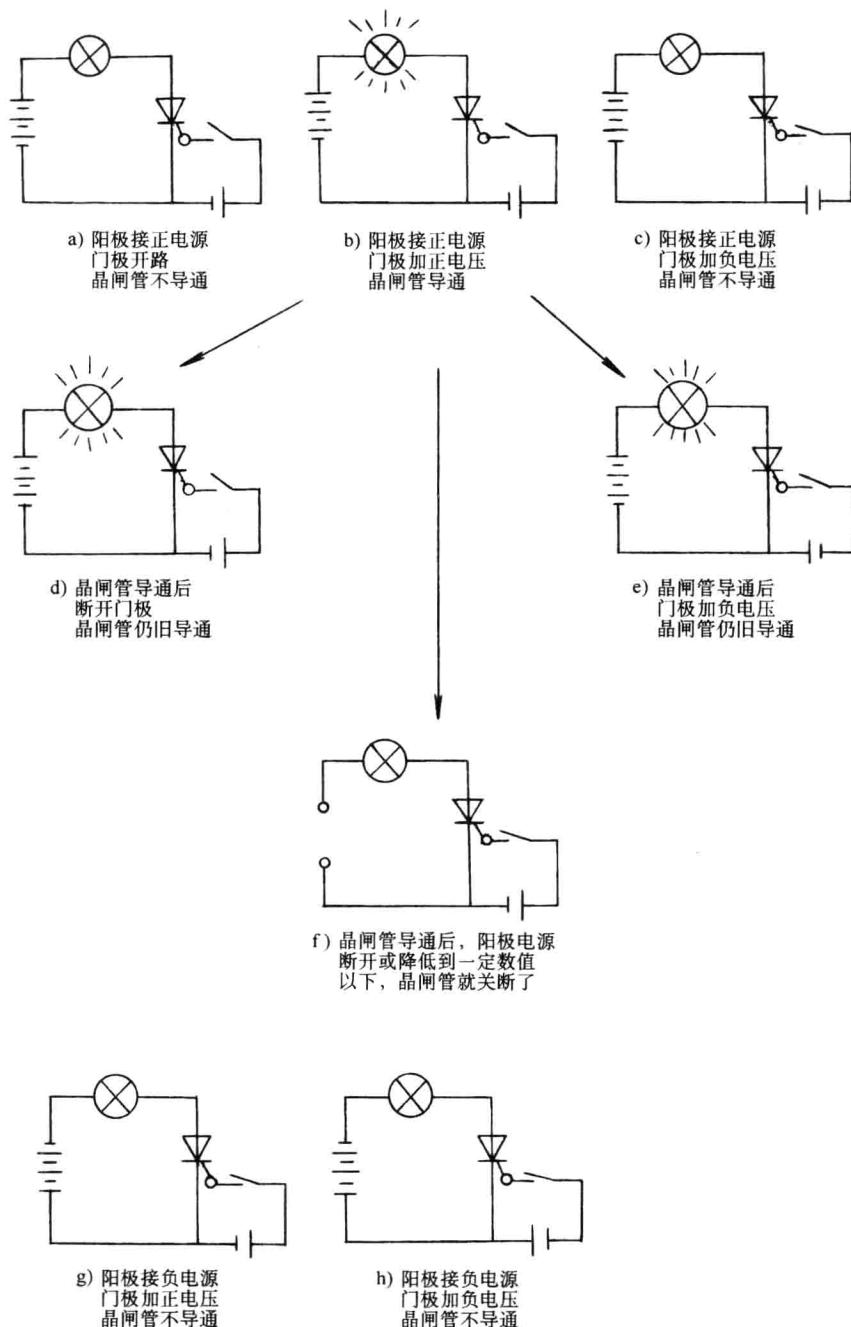


图 9.3-2 晶闸管工作条件的实验

$J_1, J_3$  结处于正向偏置状态, 而中间  $J_2$  结处于反向偏置状态。PNPN 结构处于高阻阻断状态, 只有很小漏电流从阳极流到阴极, 则称晶闸管为正向阻断或断态。当器件上施加反向电压时,  $J_1, J_3$  结成为反向偏置, PNPN 结构呈现高阻状态, 只通过很小的反向漏电流, 与一般二极管的反向特性类似。

晶闸管的运行原理通常可以用双晶体管模型来解释, 如图 9.3-3c、d 所示。PNPN 四层结

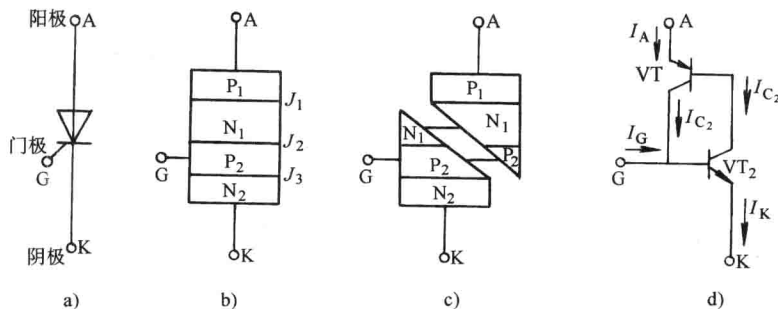


图 9.3-3 晶闸管的双晶体管模型

a) 晶闸管符号 b) 管芯 PNPN 结构 c)、d) 双晶体管模型

构的晶闸管可以看成由 PNP 型 ( $VT_1$ ) 和 NPN 型 ( $VT_2$ ) 两个互连互补的晶体管构成。其中一个晶体管的集电极同时又是另一个晶体管的基极。这种结构形成了内反馈联系。在晶闸管加上阳极电压时, 如果门极电流  $I_G$  注入  $VT_2$  晶体管的基极, 产生集电极电流  $I_{C2}$ , 它构成  $VT_1$  晶体管的基极电流, 放大成集电极电流  $I_{C1}$ , 因而又进一步增强了固有的门极电流  $I_G$ 。如此形成强烈的正反馈。最后,  $VT_1$  和  $VT_2$  进入完全饱和状态, 所有 PN 结都变成正向偏置, 即晶闸管饱和导通。这就是晶闸管的擎 (闩) 住效应, 即使撤去门极电流, 晶闸管还被锁住在通态。

晶体管的集电极电流  $I_C$  通常与发射极电流  $I_E$  和集电极—基极结的漏电流  $I_{CBO}$  有关,

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (9.3-1)$$

共基极电流增益定义为  $\alpha \cong I_C / I_E$ 。对于晶体管  $VT_1$ ,

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (9.3-2)$$

对于晶体管  $VT_2$ ,

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (9.3-3)$$

而对于  $I_G$  门极电流,

$$I_K = I_A + I_G \quad (9.3-4)$$

联立方程 (9.3-2) ~ (9.3-4) 得

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (9.3-5)$$

硅晶体管的共同特性是: 在低射极电流下  $\alpha$  是很小的; 而当发射极电流建立起来之后,  $\alpha$  迅速增大。在正常阻断情况下,  $I_G = 0$ , 而  $\alpha_1 + \alpha_2$  是很小的, 由式 (9.3-5) 可知, 晶闸管漏电流稍大于两个晶体管漏电流之和。如果用某些手段能够使各个晶体管的发射极电流增大以致  $\alpha_1 + \alpha_2$  趋近于 1 的话, 那么式 (9.3-5)  $I_A$  将趋近无穷大 (实际上当器件进入导通时, 外部负载将限制阳极电流), 器件饱和导通。并且, 由于  $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ , 由式 (9.3-5) 可知, 此时即使去掉门极信号 ( $I_G = 0$ ), 晶闸管仍将保持原来阳极电流而继续导通。可见, 晶闸管是一种只能用门极控制其导通, 而不能控制其关断的半控型器件。

为了关断晶闸管, 只有减小阳极电压至零或使其反向, 以便使阳极电流降低到小于维持电流,  $\alpha_1 + \alpha_2$  迅速下降到近似为零, 晶闸管才能重新恢复阻断状态, 其中流过很小的漏电流。

使晶闸管触发导通可能有下面若干种情况。

(1) 门极电流 如果注入门极电流  $I_G$ , 正像前面说明的, 由于正常的晶体管效应和强烈的