

高等学校工程专科教材

# 脉冲与 数字电路

张苹迦 胡家丰 编

张苹迦 主编

高等教育出版社



高等学校工程专科教材

# 脉冲与数字电路

张革迦 胡家丰 编

张革迦 主 编

高等教育出版社

(京)112号

## 内 容 提 要

本书经国家教育委员会高等工程专科电子线路课程编审组委托华中理工大学曹汉房副教授审阅,同意作为高等工程专科学校教材出版。

全书共九章,主要内容有:双极型和单极型晶体管的开关特性,逻辑函数,集成逻辑门电路,组合逻辑电路,集成触发器,时序逻辑电路,大规模集成电路存储器,脉冲单元电路。数/模和模/数转换,各章均有习题,书末附录对集成电路型号命名方法和二进制逻辑单元图形符号作了说明。

本书可作为高等工程专科学校电子类、通信类专业的技术基础课教材,也可供电视大学、职工大学、自学考试等选用,还可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

脉冲与数字电路/张莘迦主编. -北京:高等教育出版社, 1995.5

ISBN 7-04-005130-3

I. 脉… II. 张… III. ①脉冲电路②数字电路 IV. ①TN78②TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第00563号

\*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行

河北省三河科教印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 16.625 字数 430 000

1995年5月第1版 1995年5月第1次印刷

印数 0,001—2,142

定价 9.40 元

# 前 言

本书是在国家教育委员会高教司组织和指导下,根据国家教育委员会制订的《高等工程专科学校脉冲与数字电路课程教学基本要求》编写,并经国家教委高等工程专科电子线路课程编审组审定通过作为高等工程专科学校的基本教材。

高等工程专科学校的目标是培养高等工程技术应用人才,因此本书编写的指导思想是符合高等工程专科的教学要求和教学规律,重点不在于理论分析,而是着重于应用和基本的设计方法。在取材上尽可能考虑学生能适应电子技术不断发展的需要,在器件和电路叙述上则增强 CMOS 电路和中、大规模集成电路的应用。

根据国家标准局的有关规定,要求自1990年1月1日起,所有电气技术文件和图纸一律采用新的国家标准。根据这一规定,本书中所有图形和文字符号都采用新的国家标准。

本书由张苹迦副教授任主编。第一章至第四章由武汉河运专科学校胡家丰副教授编写,第五章至第九章由上海科技高等专科学校张苹迦副教授编写,最后由张苹迦统审定稿。

华中理工大学曹汉房副教授担任本书主审,他认真仔细审阅了原稿,并提出许多宝贵的修改意见,编者在此表示最诚挚的谢意。

最后,编者还要感谢国家教委高等工程专科电子线路课程编审组的各位编委,他们的许多有益意见都被采纳在本书之中。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,殷切希望读者给予批评和指正。

编 者

1993年4月

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 绪论                  | 1  |
| 第一章 双极型和单极型晶体管的开关特性 | 3  |
| § 1-1 晶体二极管的开关特性    | 3  |
| 1-1-1 稳态开关特性        | 3  |
| 1-1-2 瞬态开关特性        | 6  |
| 1-1-3 二极管的开关参数      | 9  |
| § 1-2 晶体二极管限幅器和钳位器  | 10 |
| 1-2-1 二极管限幅器        | 10 |
| 1-2-2 二极管钳位器        | 16 |
| § 1-3 晶体三极管的开关特性    | 21 |
| 1-3-1 稳态开关特性        | 21 |
| 1-3-2 瞬态开关特性        | 23 |
| 1-3-3 晶体三极管的开关参数    | 27 |
| § 1-4 晶体三极管反相器      | 29 |
| 1-4-1 反相器的工作原理      | 29 |
| 1-4-2 反相器带负载的能力     | 37 |
| § 1-5 MOS场效应管反相器    | 39 |
| 1-5-1 MOS反相器的开关特性   | 40 |
| 1-5-2 有源负载反相器       | 43 |
| 习 题                 | 47 |
| 第二章 逻辑函数            | 55 |
| § 2-1 数制和数制转换       | 55 |
| 2-1-1 数制及其表示方法      | 55 |
| 2-1-2 二进制与十进制数的相互转换 | 56 |
| § 2-2 逻辑代数基础        | 59 |
| 2-2-1 逻辑变量与逻辑函数     | 59 |

|                    |                     |     |
|--------------------|---------------------|-----|
| 2-2-2              | 基本逻辑运算              | 59  |
| 2-2-3              | 其它形式的逻辑运算           | 63  |
| 2-2-4              | 正逻辑和负逻辑             | 67  |
| 2-2-5              | 逻辑函数的相等             | 69  |
| § 2-3              | 逻辑代数的基本运算法则         | 70  |
| 2-3-1              | 逻辑代数的公理             | 70  |
| 2-3-2              | 逻辑代数的定理             | 71  |
| 2-3-3              | 三个基本运算规则            | 72  |
| 2-3-4              | 几个常用公式              | 74  |
| § 2-4              | 逻辑函数的化简             | 75  |
| 2-4-1              | 逻辑函数的表示方法           | 76  |
| 2-4-2              | 逻辑函数的代数法化简          | 82  |
| 2-4-3              | 逻辑函数的卡诺图表示法         | 84  |
| 2-4-4              | 卡诺图化简法              | 88  |
| 2-4-5              | 具有约束项的逻辑函数的化简       | 98  |
| 习 题                |                     | 100 |
| <b>第三章 集成逻辑门电路</b> |                     | 104 |
| § 3-1              | 三极管-三极管集成逻辑门电路(TTL) | 105 |
| 3-1-1              | 典型TTL与非门电路          | 105 |
| 3-1-2              | 其它类型的TTL门电路         | 121 |
| * § 3-2            | 射极耦合集成逻辑门电路         | 127 |
| § 3-3              | MOS集成逻辑门电路          | 131 |
| 3-3-1              | NMOS集成逻辑门电路         | 131 |
| 3-3-2              | CMOS集成逻辑门电路         | 132 |
| § 3-4              | 数字集成电路使用注意事项        | 138 |
| 3-4-1              | TTL电路使用注意事项         | 139 |
| 3-4-2              | MOS电路使用注意事项         | 142 |
| 3-4-3              | TTL与CMOS电路的连接       | 143 |
| 习 题                |                     | 145 |
| <b>第四章 组合逻辑电路</b>  |                     | 150 |
| § 4-1              | 组合逻辑电路概述            | 150 |
| 4-1-1              | 组合逻辑电路的特点           | 150 |

|            |                |            |
|------------|----------------|------------|
| 4-1-2      | 组合逻辑电路的分析方法    | 151        |
| 4-1-3      | 组合逻辑电路设计       | 152        |
| § 4-2      | 编码器            | 154        |
| 4-2-1      | 编码             | 154        |
| 4-2-2      | 优先编码器          | 157        |
| § 4-3      | 运算器            | 162        |
| 4-3-1      | 半加器            | 163        |
| 4-3-2      | 全加器            | 164        |
| 4-3-3      | 中规模集成全加器       | 167        |
| § 4-4      | 比较器            | 169        |
| 4-4-1      | 一位数码比较器        | 169        |
| 4-4-2      | 中规模集成 4 位数码比较器 | 170        |
| § 4-5      | 奇偶码产生与检测电路     | 175        |
| § 4-6      | 译码器            | 178        |
| 4-6-1      | 二进制译码器         | 178        |
| 4-6-2      | 二-十进制译码器       | 179        |
| 4-6-3      | 显示器件和显示译码器     | 183        |
| § 4-7      | 多路选择器和分配器      | 196        |
| 4-7-1      | 多路选择器          | 196        |
| 4-7-2      | 中规模集成多路选择器     | 198        |
| 4-7-3      | 数据分配器          | 201        |
| § 4-8      | 组合逻辑电路的竞争与冒险   | 202        |
| 习 题        |                | 208        |
| <b>第五章</b> | <b>集成触发器</b>   | <b>212</b> |
| § 5-1      | RS 触发器         | 212        |
| 5-1-1      | 基本 RS 触发器      | 212        |
| 5-1-2      | 时钟 RS 触发器      | 216        |
| § 5-2      | 主从 JK 触发器      | 221        |
| § 5-3      | 维持阻塞 D 触发器     | 228        |
| § 5-4      | T 触发器          | 232        |
| § 5-5      | 不同类型触发器之间的转换   | 233        |
| * § 5-6    | MOS 触发器        | 236        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 5-6-1 NMOS 触发器 .....           | 236        |
| 5-6-2 CMOS 触发器 .....           | 239        |
| 习 题 .....                      | 244        |
| <b>第六章 时序逻辑电路 .....</b>        | <b>252</b> |
| § 6-1 时序逻辑电路的特点 .....          | 252        |
| 6-1-1 时序逻辑电路概述 .....           | 252        |
| 6-1-2 时序逻辑电路的功能描述方法 .....      | 255        |
| § 6-2 寄存器 .....                | 257        |
| 6-2-1 数码寄存器 .....              | 258        |
| 6-2-2 移位寄存器 .....              | 259        |
| § 6-3 计数器 .....                | 267        |
| 6-3-1 计数器的特点及分类 .....          | 267        |
| 6-3-2 同步计数器 .....              | 268        |
| 6-3-3 异步计数器 .....              | 291        |
| 6-3-4 移存型计数器 .....             | 296        |
| 6-3-5 中规模集成计数器 .....           | 304        |
| * § 6-4 序列信号发生器 .....          | 318        |
| § 6-5 时序脉冲分配器 .....            | 328        |
| § 6-6 时序逻辑电路的分析方法 .....        | 336        |
| 习 题 .....                      | 344        |
| <b>第七章 大规模集成电路存储器 .....</b>    | <b>352</b> |
| § 7-1 概述 .....                 | 352        |
| § 7-2 随机存取存储器(RAM) .....       | 353        |
| 7-2-1 RAM 的结构 .....            | 354        |
| 7-2-2 静态RAM存储单元 .....          | 357        |
| *7-2-3 动态RAM存储单元 .....         | 362        |
| 7-2-4 RAM 电路举例 .....           | 365        |
| 7-2-5 RAM 容量扩展方法 .....         | 372        |
| § 7-3 只读存储器(ROM) .....         | 374        |
| 7-3-1 固定只读存储器(ROM) ..          | 375        |
| 7-3-2 可编程只读存储器 (PROM) .....    | 379        |
| 7-3-3 可擦除可编程只读存储器(EPROM) ..... | 381        |

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 7-3-4 电改写只读存储器(EAROM或E <sup>2</sup> PROM) ..... | 383 |
| 7-3-5 ROM容量扩展方法 .....                           | 384 |
| * § 7-4 可编程序逻辑阵列及其应用(PLA) .....                 | 386 |
| 习题 .....                                        | 391 |
| <b>第八章 脉冲单元电路</b> .....                         | 397 |
| § 8-1 锯齿波形成电路 .....                             | 397 |
| 8-1-1 锯齿波形成电路的基本原理 .....                        | 397 |
| 8-1-2 锯齿波电压产生电路 .....                           | 399 |
| § 8-2 多谐振荡器 .....                               | 404 |
| 8-2-1 用TTL与非门构成的基本多谐振荡器 .....                   | 404 |
| 8-2-2 用分立元件构成的多谐振荡器 .....                       | 407 |
| § 8-3 单稳态触发器 .....                              | 412 |
| 8-3-1 TTL与非门构成的单稳态触发器 .....                     | 412 |
| 8-3-2 用分立元件构成的单稳态触发器 .....                      | 420 |
| § 8-4 用分立元件构成的双稳态触发器 .....                      | 426 |
| 8-4-1 电路构成 .....                                | 426 |
| 8-4-2 电路工作过程 .....                              | 426 |
| 8-4-3 双稳态触发器的触发方式 .....                         | 427 |
| § 8-5 施密特触发器 .....                              | 432 |
| 8-5-1 用分立元件构成的施密特触发器 .....                      | 432 |
| 8-5-2 集成施密特触发器 .....                            | 440 |
| 8-5-3 施密特触发器的应用 .....                           | 444 |
| § 8-6 集成时基电路 .....                              | 447 |
| 习题 .....                                        | 451 |
| <b>第九章 数/模和模/数转换</b> .....                      | 459 |
| § 9-1 概述 .....                                  | 459 |
| § 9-2 数/模转换电路 .....                             | 461 |
| 9-2-1 权电阻D/A转换电路 .....                          | 462 |
| 9-2-2 R-2R梯形D/A转换电路 .....                       | 465 |
| 9-2-3 集成单元倒T形D/A转换电路 .....                      | 468 |
| § 9-3 模/数转换电路 .....                             | 471 |
| 9-3-1 工作原理 .....                                | 471 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 9-3-2 常用模/数转换电路 ..... | 473 |
| 习题 .....              | 493 |
| <b>附录</b> .....       | 498 |
| I 型号命名方法 .....        | 498 |
| II 标准逻辑图形符号说明 .....   | 499 |
| III 新旧图形符号对照表 .....   | 507 |
| <b>主要参考资料</b> .....   | 510 |
| <b>汉英名词对照</b> .....   | 512 |

## 绪 论

在无线电技术发展的初期，一般都应用正弦信号。但是，随着无线电技术应用领域的不断扩大，如在雷达、电视等出现之后，正弦信号已不能满足要求，同时还需要应用一些非正弦信号。广义地说，这些非正弦信号统称为脉冲，产生和变换这些脉冲波形的电路称为脉冲电路。

脉冲电路可以用分立晶体管、场效应管作为开关和 $RC$ 充、放电电路构成，也可以由集成门电路或集成运算放大器和 $RC$ 充、放电电路构成。常用的有锯齿波形成电路、多谐振荡器、单稳态触发器、双稳态触发器、施密特电路等。脉冲电路处理的是模拟信号，因此它属于模拟电路范畴。

随着无线电技术的发展和应用领域的不断扩大，数字信号的传输和处理已成为新的研究课题，供处理数字信号用的数字电路也就应运而生。

数字信号只有1和0两种状态，用开关电路的两种稳定状态能方便地表示它们。数字电路的作用就是完成0和1两种逻辑状态的产生、变换及各种逻辑运算。逻辑代数是分析和设计数字电路的数学工具，也是数字电路的理论基础。现在，数字电路所使用的器件都是数字集成电路，按单片包含元件数目的多少，可分为小规模集成电路(SSI)、中规模集成电路(MSI)、大规模集成电路(LSI)，但是它们的基本单元是集成门和触发器，本书对这些基本单元的逻辑功能及其特性作专门的介绍。

数字电路的传统研究方法是先对设计任务进行逻辑分析，求出逻辑函数表达式，然后用逻辑代数法或卡诺图法对逻辑函数进行化简，最后用集成电路实现之。这样设计出来的逻辑电路具有

使用器件和连线最少等优点，但是这种方法只适宜于用小规模集成电路来设计数字电路。中、大规模集成电路的问世使这种传统的设计方法有很大的改变，用中、大规模集成电路来设计数字电路时，只需拟定系统的总体框图，然后选择能完成各方框逻辑功能的中、大规模集成电路组装。所以设计者追求的目标是使用的中、大规模集成电路模块数目最少。尽管在这种情况下无需进行逻辑设计，但中、大规模集成电路本身却是通过逻辑设计得到的，所以逻辑设计方法仍然是必须掌握的基本方法，而用SSI、MSI、LSI来设计数字电路(或系统)是本书的主要内容。

数字电子设备(主要由数字电路组成)与模拟电子设备相比较，前者稳定性好，可靠性高，维护方便，尤其是便于存储信息且容量很大，其数据适宜于用计算机处理，其操作适宜于用计算机控制。例如，在通信系统中，应用数字电路的数字通信系统，它不仅比模拟通信系统抗干扰能力强，保密性好，而且还能应用电子计算机进行信息处理和控制在控制，形成以计算机为中心的自动交换通信网；在测量仪表中，数字测量仪表不仅比模拟测量仪表精度高、测试功能强，而且还易于实现测试的自动化和智能化。所以数字电路出现之后，就以惊人的速度发展。尤其是随着集成电路技术的发展，使得各种数字系统的可靠性大大提高，设备的体积大大缩小，各种功能大大提高。因此，本课程的重点是数字电路。

本课程是高等工程专科学校有关专业的一门重要的技术基础课，在电子类和通信类专业的教学计划中更占有重要的地位，它是许多后续课程的基础知识。所以本课程所包含的基本理论、基本的设计方法、基本实验技能(由实验课解决)都是有关专业学生所必须掌握的。最后还须指出，本课程是一门实践性很强的技术基础课，除要求学生掌握基本原理和基本设计方法之外，更重要的是灵活运用，因此在学习过程中必须通过习题和实验来巩固所学知识，培养分析问题、独立设计和解决工程中实际问题的能力。

# 第一章 双极型和单极型晶体管的开关特性

在脉冲与数字电路中，晶体管常常作为开关使用。这时晶体管工作在开关状态。本章将在学习电子线路的基础上，着重讨论晶体管的开关特性，并介绍它在脉冲电路中的一些实际应用。

## § 1-1 晶体二极管的开关特性

一个理想的开关，当它闭合时，开关两端点间的电压应为零，电阻亦为零；当它断开时，通过开关的电流应为零，两端点间的电阻应为无穷大；并且认为开关动作是瞬间完成而又不受其它因素的影响。当晶体管作为开关使用时，与理想开关所具有的上述特性是有差异的。下面我们将分别讨论晶体二极管的稳态开关特性和瞬态开关特性。

### 1-1-1 稳态开关特性

当电路处于相对稳定的状态下，晶体管所具有的开关特性称为稳态开关特性。

#### 一、晶体二极管的伏安特性曲线

图1-1-1(a)所示为硅二极管的典型伏安特性曲线(图未按称度画出)。

由图1-1-1(a)可以看出，当外加电压为零时， $v_D = 0$ ， $i_D = 0$ 。当外加正向偏压超过某一数值时， $i_D$ 才明显上升。我们将 $i_D$ 开始明显上升时所对应的电压称为二极管的门限电压(或阈值电压)，以 $V_{th}$ 表示。对于硅二极管 $V_{th}$ 约为0.5V，锗二极管 $V_{th}$ 约为0.1V，

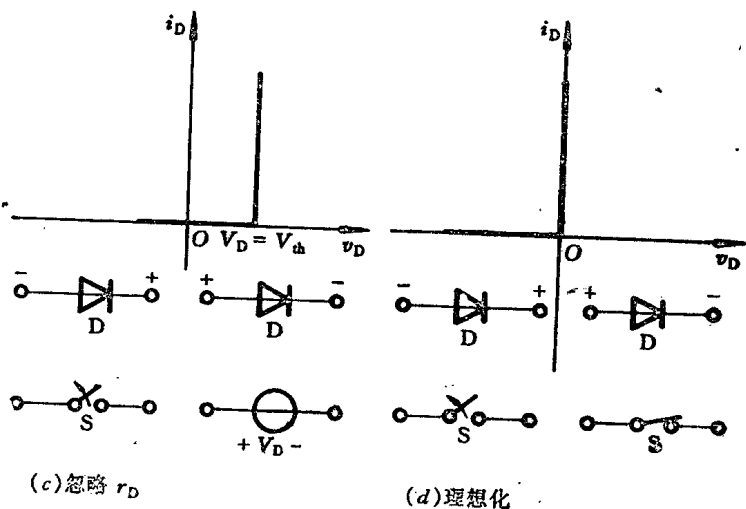
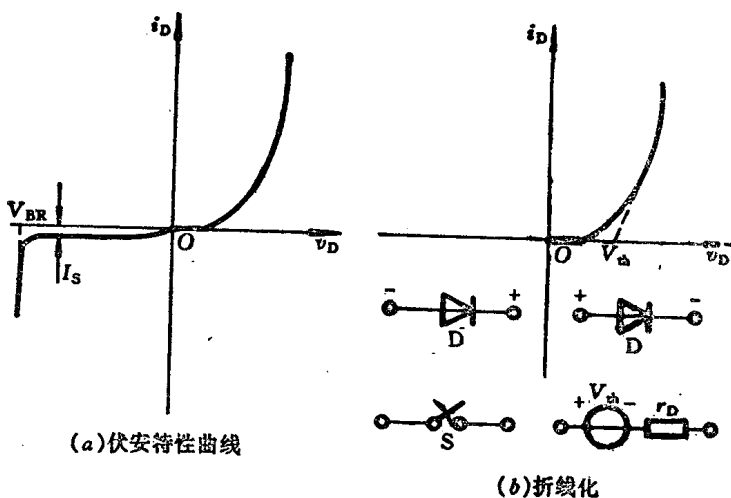


图1-1-1 二极管特性描述方法

$V_{th}$  的值随温度的升高而降低，其温度系数为  $dV_{th}/dT = -2\text{mV}/T$ 。当外加反向偏压时，二极管因反偏而截止，仅有很小的反向饱和电流  $I_S$ 。常温下，硅二极管的  $I_S \leq 1\mu\text{A}$ ，锗二极管的  $I_S$  约为几十~几百  $\mu\text{A}$ 。在一定的范围内， $I_S$  与外加反偏电压无关。

但 $I_s$ 与温度有关，当温度每升高 $10^\circ\text{C}$ 左右， $I_s$ 大约增加一倍。当外加反向偏压超过一定值时（即 $|v_D| \geq |V_{BR}|$ ）， $I_s$ 将急剧增加，二极管被击穿。 $V_{BR}$ 称为二极管的反向击穿电压。

以上分析表明，当二极管作为开关使用时，与理想开关是有一定差异的，这表现在：

1. 二极管正向导通时，相当于开关闭合，但两端点间的电压不为零，电阻亦不为零，且正向电流增加时，端点间的电压将随之增加。

2. 二极管反向截止时，相当于开关断开。但反向电流不为零，说明开关没有完全切断电路，两端点间的电阻不是无穷大。

3.  $V_{th}$ 和 $I_s$ 都与温度有关。

## 二、晶体二极管的近似等效电路

尽管二极管作为开关使用时，与理想开关有一定的差别，但是在分析开关电路时，由于二极管工作于大信号开关状态，所以经常将伏安特性曲线折线化，并用二极管等效电路来代替二极管的作用。

图 1-1-1(b)所示为折线化后的特性曲线和二极管等效电路。在二极管的正向特性曲线的直线段上做切线，切线与横轴的交点即为二极管的门限电压 $V_{th}$ 。切线的斜率反映了二极管的动态电阻（或称正向导通电阻） $r_D = \Delta v_D / \Delta i_D = 1 / \text{切线斜率}$ 。正向工作时的二极管等效电路相当于 $V_{th}$ 和 $r_D$ 的串联电路。反向工作时，反向电流极小，若忽略反向饱和电流 $I_s$ ，则相当于开关断开。

在脉冲与数字电路中，常采用图 1-1-1(c)所示的简化电路。当二极管正向导通时， $r_D$ 上的压降约为 $0.2\text{V}$ ，二极管的端电压 $V_D = V_{th} + 0.2\text{V}$ ，一般硅管 $V_D = 0.7\text{V}$ ；锗管 $V_D = 0.3\text{V}$ 。当 $V_D$ 和外加信号电压比较起来可以忽略不计时，则在定性分析时，还可以进一步简化成图 1-1-1(d)所示的理想二极管等效电路和理想化特性曲线。

## 1-1-2 瞬态开关特性

当电路处于瞬变状态下，晶体二极管所表现的开关特性称为瞬态开关特性。

在脉冲电路中，当输入信号频率不高时，二极管从导通到截止，或者从截止到导通的状态转换，可以认为是瞬间完成的。但是，当输入信号频率很高时，二极管完成上述状态转换是需要一定的时间的。将晶体二极管从导通转向截止所需时间称为关断时间，晶体二极管由截止转向导通所需时间称为开启时间，两者统称为开关时间。由于开启时间很短，可忽略不计，下面仅讨论二极管的关断时间（又称反向恢复时间）。

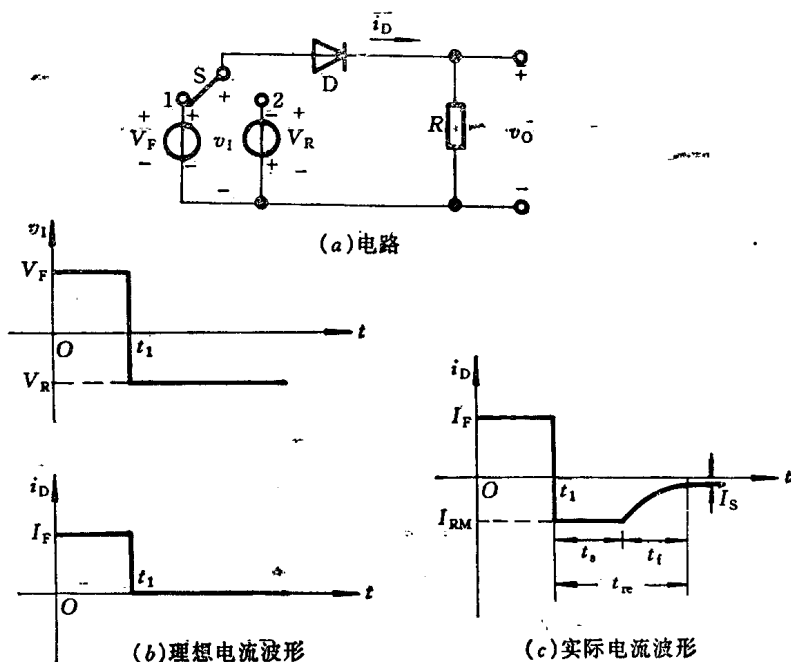


图1-1-2 二极管开关过渡特性

## 一、反向恢复时间 $t_r$ 。

在图1-1-2(a)所示电路中, 当开关S接于“1”时,  $v_i = V_F$ , 二极管正向导通, 二极管中流过的电流  $i_D = I_F = (V_F - V_D)/R \approx V_F/R$ 。在  $t = t_1$  瞬间, 开关S突然从“1”转换到“2”时, 输入电压  $v_i$  由  $V_F$  突变为  $V_R$ , 如图1-1-2(a)所示。如果二极管是一个理想开关, 则二极管中的电流应从  $I_F$  突变为0, 如图1-1-2(b)所示。但实际上并非如此, 而是在  $t_1$  瞬间, 二极管中的电流从正向电流  $I_F$ , 突然变为很大的反向电流  $I_{RM}$ , 即最大反向瞬态电流,  $I_{RM} = V_R/R$ 。然后经过一段时间  $t_s$  延迟后, 才开始逐渐减小, 再经过一段时间  $t_f$  以后, 才趋于反向饱和电流  $I_s$ 。这一反向恢复过程如图1-1-2(c)所示。其中  $t_s$  称为存储时间,  $t_f$  称为下降时间, 合起来称为反向恢复时间  $t_{ro}$ , 即  $t_{ro} = t_s + t_f$ 。

反向恢复时间是影响二极管开关速度的主要因素, 它的大小约为纳秒(ns)数量级。为了保证良好的开关特性, 要求输入脉冲的时间间隔要大于10倍  $t_{ro}$  以上。当输入脉冲频率不高时, 可以忽略  $t_{ro}$  的影响。

## 二、产生反向恢复过程的原因——电荷存储效应

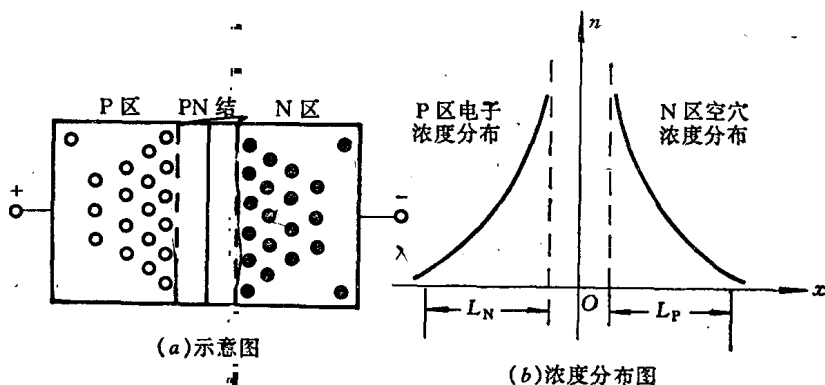


图1-1-3 二极管中存储电荷分布

当二极管外加正向电压时, P区中的空穴向N区扩散, N区