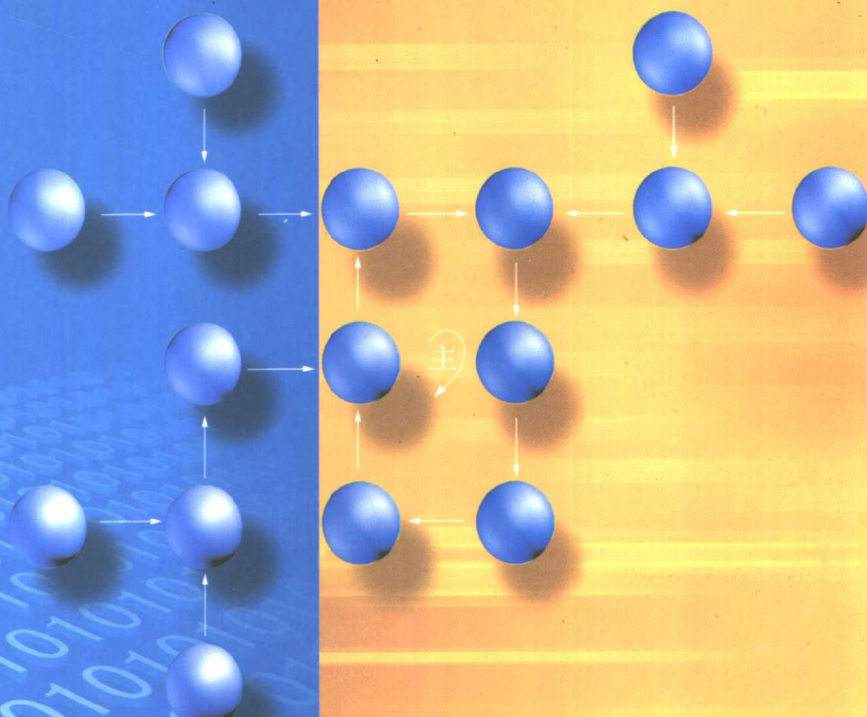




高等学校电子信息类规划教材

数字电子技术

• 郭永贞 主编
戚玉松 副主编



西安电子科技大学出版社
[http:// www.xduph. com](http://www.xduph.com)

高等学校
电子信息类 规划教材

数字电子技术

郭永贞 主 编
戚玉松 副主编
董尔令 主 审

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据修订后的《高等学校工科电子技术基础课程教学基本要求》编写。全书共分八章,每章开篇都有内容提要。主要内容包括:半导体器件的基本知识、数字电路基础、数字逻辑部件、组合逻辑电路、时序逻辑电路、半导体存储器与可编程逻辑器件、脉冲波形的产生与变换、数模和模数转换器。

本书叙述简洁,篇幅适中,联系实际,内容较新,可作为高等学校工科电子信息类、电气类、自动控制类和其他相近专业的教材,也可供工程技术人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/郭永贞主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2000.7

高等学校电子信息类规划教材

ISBN 7-5606-0868-x

I. 数… I. 郭… III. 数字电路-电子技术-高等学校-教材 N. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 28087 号

责任编辑 徐德源 谭玉瓦

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http: //www. xduph. com E-mail: xdupfxb@pub. xaonline. com

经 销 新华书店

印 刷 陕西画报社印刷厂

版 次 2000年7月第1版 2001年3月第2次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.5

字 数 312千字

印 数 4 001~10 000册

定 价 14.00元

ISBN 7-5606-0868-X/TN·0149

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社，各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我们与各专指委、出版社协商后审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、有特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列于规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、学生和其他广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

数字电子技术发展迅速,为了更好地贯彻国家教委对高等学校工科电子技术基础课程的教学基本要求,使教学与科技发展相适应,我们编写了此书。

本书的编写思路是:紧扣国家教委组织制定的《高等学校工科电子技术基础课程教学基本要求》,保证基础,加强概念,贯彻少而精的原则。面向发展,更新教学观念和内容。在保证基本概念、基本原理和基本分析及设计方法的前提下,简化集成电路内部结构和工作原理的讲述,减少小规模集成电路的内容,尽可能多地介绍新型中大规模集成电路及其应用。以能力培养为主线,以应用为目的,突出思路与方法阐述,加强与微机联系方面的内容,以便开发学生思路。力求文字简洁流畅,通顺易懂,便于自学。本书的逻辑图形符号及器件的型号采用了新的国家标准。书中每章后附有习题与思考题与正文配合,便于组织教学和学生自学。本教材的参考学时约为 60 学时。

本书的第一、三、五、八章由戚玉松编写,郭永贞编写了第二、四、六、七章并负责全书的统稿。南京航空航天大学董尔令对本书的编写给予了大力支持并担任主审,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,不足与疏漏之处在所难免,诚恳地希望使用本教材的师生与读者给予批评指正。

编 者

2000 年 4 月

目 录

第一章 半导体器件的基本知识	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体中的导电情况	1
1.1.2 杂质半导体中的导电情况	2
1.1.3 PN 结的单向导电特性	3
1.2 半导体二极管	4
1.2.1 半导体二极管的伏安特性曲线	4
1.2.2 二极管的开关特性	6
1.2.3 二极管的主要参数	7
1.2.4 含二极管电路的计算	8
1.2.5 稳压二极管	9
1.3 半导体三极管	10
1.3.1 电流分配和放大作用	10
1.3.2 三极管的特性曲线	11
1.3.3 三极管的开关特性	13
1.3.4 三极管的主要参数	14
1.4 场效应管	15
1.4.1 绝缘栅型场效应管	15
1.4.2 结型场效应管(JFET)	17
1.4.3 场效应管的主要参数	19
1.4.4 使用 MOS 管的注意事项	20
习题	20
第二章 数字电路基础	24
2.1 数制和码	24
2.1.1 常用数制	24
2.1.2 不同数制之间的相互转换	25
2.1.3 二进制数的算术运算	28
2.1.4 二—十进制码	29
2.2 逻辑代数基础	30
2.2.1 逻辑变量和基本逻辑运算	30
2.2.2 基本公式和定理	33
2.2.3 逻辑函数的表示方法	35
2.2.4 逻辑函数的化简	38
习题	46

第三章 数字逻辑部件	50
3.1 逻辑门电路	50
3.1.1 三种分立元件基本门电路	50
3.1.2 TTL 集成与非门	52
3.1.3 TTL 门电路的其它类型	57
3.1.4 CMOS 门电路	61
3.1.5 极性指示符逻辑约定	64
3.2 触发器	65
3.2.1 基本 RS 触发器	66
3.2.2 触发器的逻辑功能分类	67
3.2.3 触发器的触发方式	70
3.2.4 触发器的脉冲工作特性	72
3.2.5 触发器中其余端的处理	73
习题	74
第四章 组合逻辑电路	80
4.1 概述	80
4.2 组合逻辑电路的分析和设计	80
4.2.1 组合逻辑电路的分析方法	80
4.2.2 组合逻辑电路的设计方法	81
4.3 实用组合逻辑电路	82
4.3.1 加法器	82
4.3.2 数值比较器	87
4.3.3 数据选择器	90
4.3.4 编码器	93
4.3.5 译码器	99
4.4 组合逻辑电路中的竞争冒险	107
4.4.1 产生竞争冒险的原因	107
4.4.2 竞争冒险的判断	108
4.4.3 竞争冒险的消除方法	109
习题	110
第五章 时序逻辑电路	113
5.1 概述	113
5.2 计数器	114
5.2.1 同步计数器的分析	114
5.2.2 异步计数器的分析	117
5.2.3 集成计数器及其应用	120
5.3 节拍脉冲发生器	126
5.4 移位寄存器	127
5.4.1 移位寄存器的工作原理	128
5.4.2 移位寄存器的应用	129

5.4.3 集成移位寄存器及应用	130
5.5 同步时序电路的设计	132
习题	133
第六章 半导体存储器与可编程逻辑器件	136
6.1 概述	136
6.2 存储器	136
6.2.1 只读存储器 ROM	137
6.2.2 随机存取存储器 RAM	141
6.3 可编程逻辑器件 PLD	145
6.3.1 概述	145
6.3.2 可编程只读存储器 PROM	146
6.3.3 可编程逻辑阵列 PLA	148
6.3.4 可编程阵列逻辑 PAL	149
6.3.5 通用阵列逻辑 GAL	153
6.3.6 可擦除的可编程逻辑器件(EPLD)	161
6.4 在系统编程(ISP)技术及 ISP 器件	163
6.4.1 在系统编程技术	163
6.4.2 现场可编程门阵列(FPGA)	165
6.4.3 在系统可编程逻辑器件(ISP-PLD)	171
习题	178
第七章 脉冲波形的产生与变换	180
7.1 555 定时器	180
7.2 多谐振荡器	181
7.2.1 用 555 定时器构成的多谐振荡器	182
7.2.2 石英晶体振荡器	184
7.3 单稳态触发器	185
7.3.1 由 555 定时器构成单稳态触发器	186
7.3.2 集成单稳态触发器	187
7.3.3 单稳态触发器的应用	188
7.4 施密特触发器	189
7.4.1 用 555 定时器构成的施密特触发器	189
7.4.2 集成施密特触发器	189
7.4.3 施密特触发器的应用	190
习题	192
第八章 数模和模数转换器	194
8.1 概述	194
8.2 数模转换器(DAC)	194
8.2.1 DAC 的工作原理	195
8.2.2 DAC 的主要技术指标	197

8.2.3 集成 DAC 单元介绍举例	198
8.3 模数转换器(ADC)	199
8.3.1 ADC 的工作原理	199
8.3.2 ADC 的主要技术指标	202
8.3.3 集成 ADC 单元介绍举例	203
习题	204
参考文献	205

第一章 半导体器件的基本知识

内容提要 本章首先简要地介绍了半导体的导电规律及PN结的单向导电特性，然后介绍半导体二极管和三极管的特性曲线、开关特性及主要参数，并对稳压二极管和场效应管也作了相应的介绍。

1.1 半导体的基础知识

将(固体)物质按其导电性能进行分类，可分为3种类型：导体、半导体和绝缘体。

通常，极易导电的物质被称为导体，如铜、铝等；极不易导电的物质称为绝缘体，如塑料、玻璃等；而导电能力介于导体和绝缘体之间的则称为半导体，如硅、锗等。

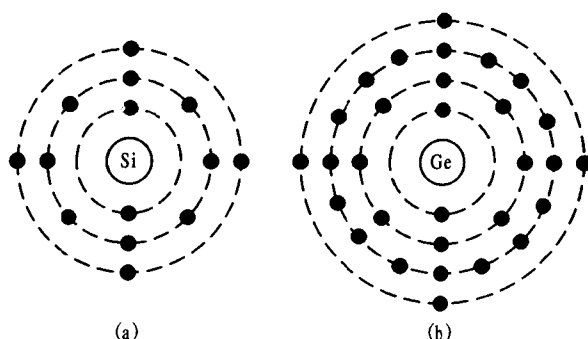


图 1-1 硅、锗的原子结构平面示意图

(a) 硅的原子结构；(b) 锗的原子结构

1.1.1 本征半导体中的导电情况

半导体材料硅和锗的原子结构如图 1-1 所示。它们的共同特点是最外层都有 4 个电子。原子最外层的电子叫做价电子，有几个价电子就叫几价元素，硅和锗均为 4 价元素。其简化模型如图 1-2 所示。

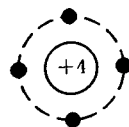


图 1-2 硅、锗原子结构简化模型

当把硅、锗等半导体材料制成单晶体时，其原子排列就由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态。每个原子的 4 个价电子分别和相邻的 4 个原子的价电

子构成 4 对共价键，如图 1-3 所示。这种 4 价元素单晶体结构的纯净半导体称为本征半

导体。

必须指出,在本征半导体中有两种载流子:不仅有电子载流子,而且还有一种叫空穴的载流子。

在一定温度下,由于热运动等,少数价电子会挣脱共价键的束缚而成为自由电子,即电子载流子,同时在共价键中留下一个空位,如图 1-4。有了这样一个空位,邻近的价电子就很容易移过来进行填补,从而形成价电子填补空位子的运动。这种运动,无论是在效果上还是现象上,都好像一个带正电的“空位子”在移动,我们把这种运动叫做空穴运动,“空位子”被叫做“空穴”。

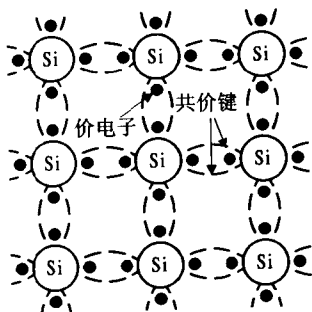


图 1-3 硅晶体结构的共价键示意图

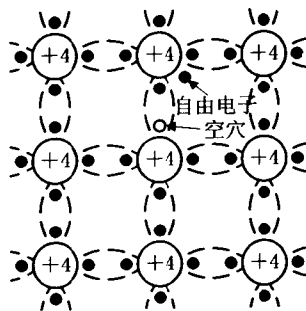


图 1-4 本征半导体晶体结构示意图

由此可见,空穴也是一种载流子(带电且能移动)。如果在半导体上加电压时,通过半导体的电流应由两部分组成:一部分是带负电的电子载流子定向运动形成的电子流;另一部分是带正电的空穴载流子定向(它的运动方向和电子相反)运动形成的空穴流。所以,在半导体中,不仅有电子载流子,而且还有空穴载流子,这是半导体导电的一个重要特征。

1.1.2 杂质半导体中的导电情况

在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对产生的。由于载流子的总数仍然很少,导电能力较差,因而用处不大。实际中,用来制作电子器件的材料是杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同有 P 型半导体和 N 型半导体。

P 型半导体 这是在本征半导体中(例如硅半导体中)掺入微量的 3 价元素(如硼等)的半导体。由于硼原子的数目比硅原子要少得多,因此整个晶体结构不变。我们知道硼是 3 价元素,外层只有 3 个电子,所以当它与硅原子组成共价键时,就会留出空位(图 1-5(a)),而邻近的价电子很容易填补空位形成空穴。在产生空穴的同时,硼原子因多了一个价电子而成为带负电的离子(固定在晶格中,不能移动)。在室温下,几乎所有掺入的硼原子都能提供一个空穴。因此,空穴载流子的数目将大大增加。这种半导体主要靠空穴导电,所以叫做空穴半导体,简称为 P 型半导体。在这种半导体中由于空穴很多很多,自由电子很少很少,空穴浓度远远大于自由电子的浓度,所以把空穴叫做多数载流子(简称多子),把电子叫做少数载流子(简称少子)。

N 型半导体 如果在本征半导体中掺入的是磷、锌等 5 价元素,那么情况就不一样了。如图 1-5(b)所示,硅原子和磷原子组成共价键后,多出的一个电子受原子核的束缚很小,因此,很容易成为自由电子,杂质原子因失去一个电子而成为正离子。所以,在这种半导体中,电子载流子的数目很多,是多子,空穴载流子的数目很少,是少子,主要靠电子导

电，故叫电子半导体，简称 N 型半导体。

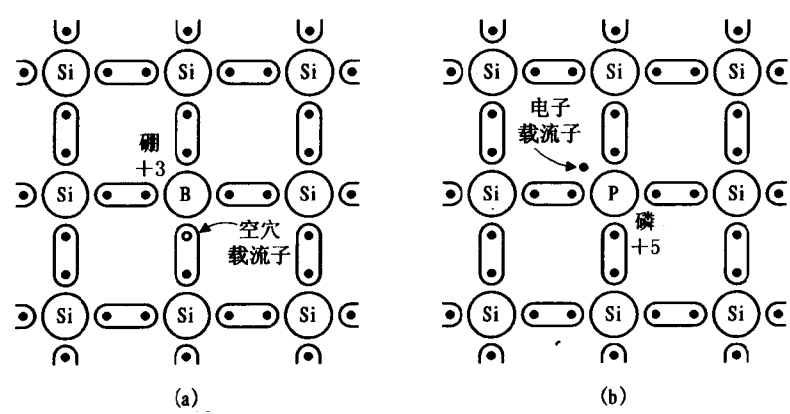


图 1 - 5 硅单晶掺杂的示意图
(a) 硅中掺硼形成空穴(P 型)；(b) 硅中掺磷形成自由电子(N 型)

1. 1. 3 PN 结的单向导电特性

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体结为一体时，在交界的地方必然会发生由于浓度差而引起的电子和空穴的扩散运动，即 P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。随着扩散的进行，交界处 P 区空穴减少，出现负离子区(用 $\ominus$ 表示)，N 区电子减少，出现正离子区(用 $\oplus$ 表示)。正负离子的相互作用，在交界面的两边便产生了内部电场，其方向由 N 区指向 P 区，见图 1 - 6。这样，扩散将受到这个内部电场的阻力。虽然内部电场阻止多子的扩散，但是对于少子却反而起着吸引作用，只要它们靠近交界面，就会被内部电场拉到对方区域中去。这种在内部电场作用下载流子所作的定向运动称为漂移。随着扩散的减弱，漂移的增强，最后必将达到动态平衡。在动态平衡状态，当 P 区空穴向 N 区扩散产生扩散电流时，必然会有一个数量相同的空穴漂移电流由 N 区流向 P 区，两者方向相反，数值相等。同理，电子扩散电流也必然被电子的漂移电流所抵消。动态平衡时，在交界面附近的缺少载流子的区域，叫做空间电荷区，又称耗尽层，也就是 PN 结。

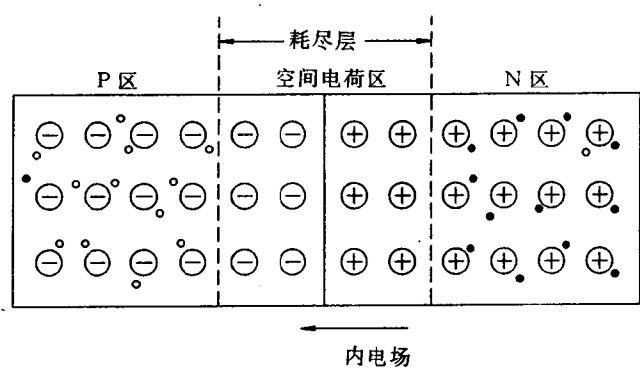


图 1 - 6 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电特性

(1) PN 结加正向电压

将电源正极接 P 区，负极接 N 区，这种连接方式称为正向接法，见图 1-7。由于外加电场与内部电场方向相反，因而削弱了内部电场，使空间电荷量和耗尽层的宽度都减少，N 区和 P 区中的多子都能较顺利地越过 PN 结，形成较大的扩散电流。因此，正向接法使 PN 结呈现导通状态，导通时电阻很小。

(2) PN 结加反向电压

将电源正极接 N 区，负极接 P 区，这种连接方式称为反向接法，见图 1-8。反向接法时，外加电场与内部电场方向一致，空间电荷量和耗尽层都大大增加，因此，多子扩散运动难以进行，扩散电流大大减小，通过 PN 结的电流主要是漂移电流。反向接法时产生的电流称为反向电流，由于温度不变时，少子浓度不变，因而反向电流在一定范围内不随外加电压变化，故又称反向饱和电流。因为少数载流子的数量有限，反向电流很小，可认为不导电，所以反向接法时，PN 结呈现截止状态。

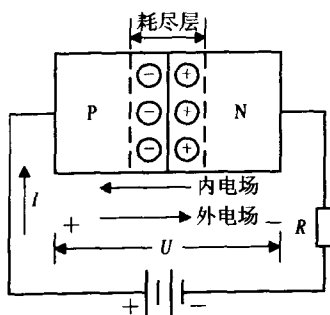


图 1-7 外加正向电压

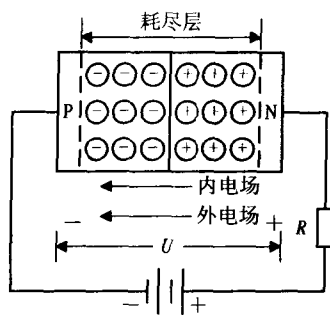


图 1-8 外加反向电压

1.2 半导体二极管

半导体二极管是由 PN 结加上引出线和管壳构成的，符号如图 1-9(d)所示。

根据半导体二极管生产工艺的不同，可将其分为 3 种类型：点接触型、面接触型和平面型。图 1-9 (a)、(b)、(c) 分别是其结构示意图。点接触型二极管适用于高频（几百兆赫）工作；面接触型二极管常用作整流，只适宜在较低的频率下工作；平面型二极管，结面积较大时，适用于大功率整流，结面积较小时，则适宜作数字电路中的开关管。

根据半导体二极管材料的不同，可分为硅二极管和锗二极管。

1.2.1 半导体二极管的伏安特性曲线

根据理论分析，半导体二极管在反向击穿以前，其电流与端电压的关系可由下式表示：

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

其中： i —PN 结的电流；

I_S —反向饱和电流；

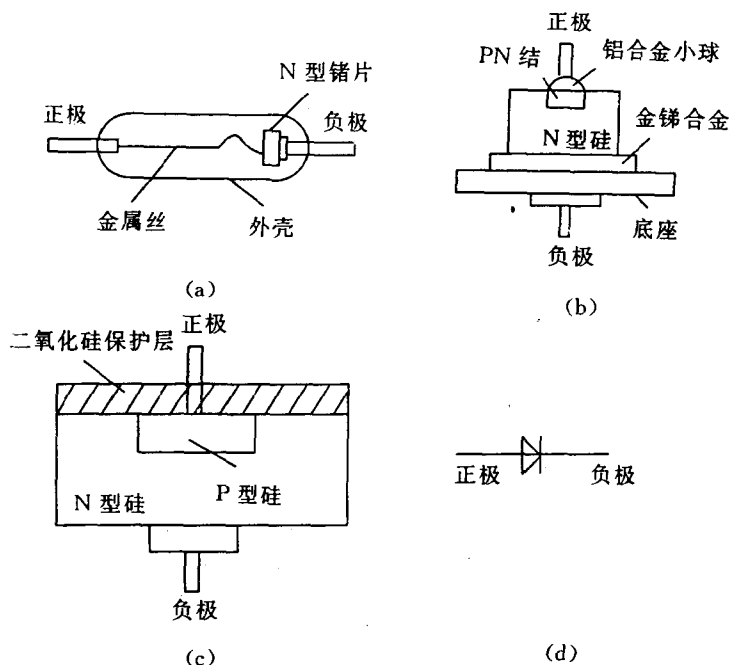


图 1-9 半导体二极管的结构及符号

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 图形符号

u —外加电压；

U_T —温度的电压当量，在室温下 $U_T = 26 \text{ mV}$ 。

当管子加正向电压，且 u 大于 U_T 几倍时，式中的 $(e)^{u/U_T} \gg 1$ ，第二项可略去，则管子的电流与电压成指数关系，即为图 1-10 实测特性曲线的②段；当管子加反向电压时， u 为负，若 $|u|$ 大于 U_T 几倍时，指数项近似为 0，故 $i = -I_s$ ，即为图 1-10 实测特性曲线的③段。

二极管的伏安特性曲线可以分为下列 4 个区域：

(1) 死区(图 1-10 的①段)

当正向电压比较小时($u < U_0$)，由于外部电场还不足以克服内部电场对载流子扩散运动所造成的阻力，因此正向电流几乎为零， U_0 称死区电压。硅管的死区电压一般为 0.5 V，锗管为 0.1 V。

(2) 导通区(图 1-10 的②段)

当二极管两端的电压超过 U_0 以后，内部电场将被大大削弱，正向电流显著增加。

(3) 截止区(图 1-10 的③段)

二极管加反向电压时，反向电流的数值很小。在同样的温度下，硅管的反向电流比锗管更小，锗管是微安级，硅管是纳安级。

(4) 击穿区(图 1-10 的④段)

反向电压高于一定值时，反向电流急剧增大，这种现象称为电击穿，发生电击穿时的反向电压 U_{BR} 叫做反向击穿电压。电击穿时，若无适当的限流措施，反向电流过大，将使管子过热发生热击穿，从而造成永久性的损坏。实测的二极管伏安特性与理论分析的结果虽有差别，但差别不大。

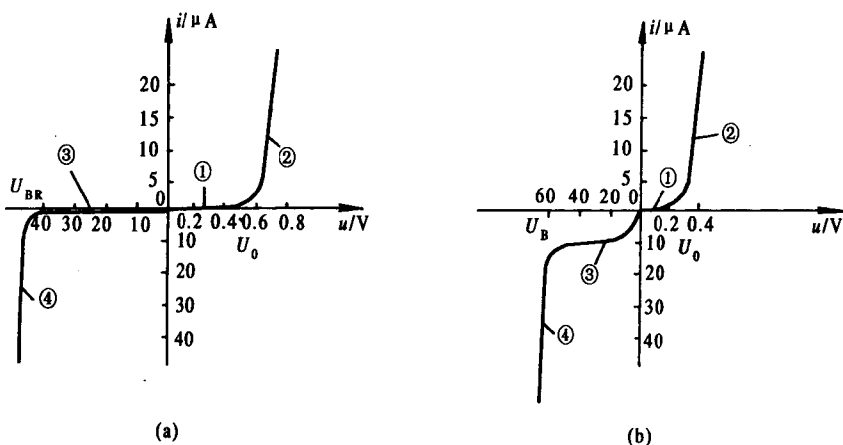


图 1-10 二极管的伏安特性

(a) 硅二极管 2CP10 的伏安特性；(b) 锗二极管 2AP15 的伏安特性

1.2.2 二极管的开关特性

在数字电路中，二极管经常工作在开关状态。因此我们应十分注意它在开关状态下的工作特点。

1. 二极管的开关作用

作为开关的二极管通常工作于导通区或截止区。由于导通区曲线很陡，可以近似地认为导通电压不变；由于截止区反向饱和电流很小，可以近似认为其为零。因此折线化的伏安特性如图 1-11(a) 所示。正向导通电压 U_F 值，对于小功率锗二极管，取 0.3 V；对于小

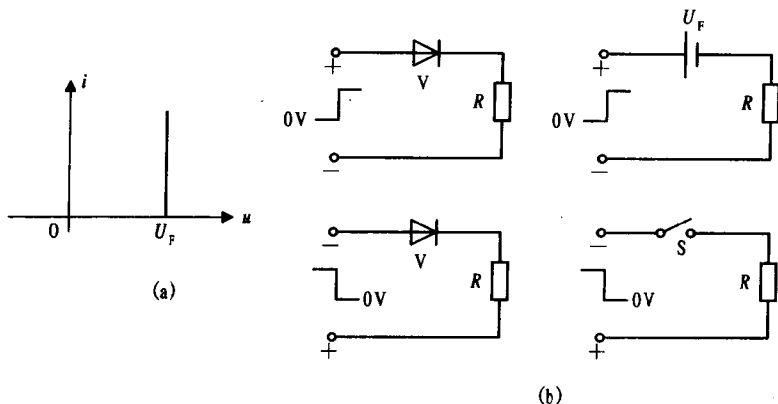


图 1-11 二极管折线化的伏安特性和近似直线等效电路

(a) 折线化特性；(b) 等效电路

功率硅二极管, 取 0.7 V 。由图 1-11(a) 可知, 当 $u \geq U_F$ 时, 电流流过二极管, 相当于开关合上, 且二极管两端电压为 U_F ; 当 $u < U_F$ 时, 流过二极管电流为零, 相当于开关断开, 等效电路见图 1-11(b)。在分析估算中, 有时甚至连正向导通压降 U_F 也常忽略不计, 这样就等效为一个理想开关, 其等效电路如图 1-12 所示。

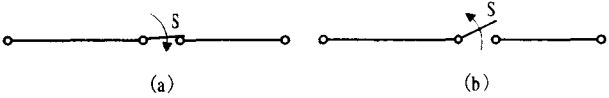


图 1-12 简化的二极管等效电路
(a) 正向时; (b) 反向时

2. 二极管的开关特性

在图 1-13(a) 所示电路中, 当输入电压 u_i 从 $+U_1$ 跳变到 $-U_2$ 时, 如果二极管 V 是理想的开关, 则负载电阻 R_L 上的电流波形应如图 1-13(b) 所示, 正向电流 $i = U_1/R_L$, 反向电流 $i_R \approx 0$ 。但实际电流的波形如图 1-13(c) 所示, 负跳变瞬间, 二极管仍然导通, 只有经过反向恢复时间 t_{re} 之后, V 才进入截止状态。因此, 当输入电压频率非常高, 以至它的负半周的宽度小于 t_{re} 时, 二极管将失去单向导电作用, 这是在使用中应予以注意的。

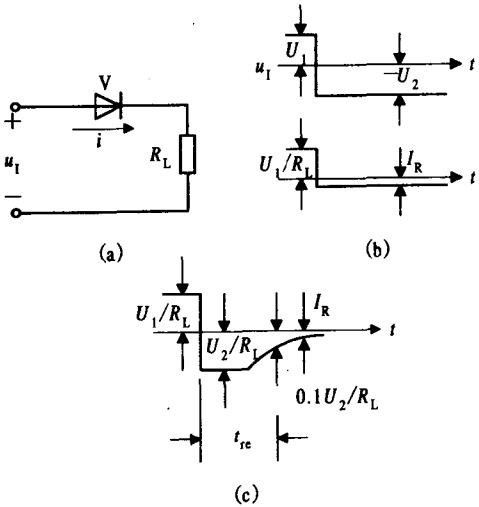


图 1-13 二极管的开关特性
(a) 电路图; (b)、(c) 波形图

1.2.3 二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_{FM}

I_{FM} 是二极管允许长期通过的最大正向平均电流, 使用时应使实际正向平均电流不大于此值, 并满足手册上散热条件, 否则将导致二极管的损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

二极管承受过高的反向电压时将被击穿，为确保管子安全工作，通常将手册给出的击穿电压值的一半作为实际允许的最高反向工作电压。

3. 反向电流

I_R 是管子未击穿时的反向电流值。 I_R 越小，管子单向导电性越好。要注意温度对 I_R 影响较为明显。

4. 最高工作频率 f_{max}

由于 PN 结存在电容效应，因此管子的工作频率是受到限制的，工作频率超过 f_{max} ，管子的单向导电性能将不能很好地体现。

5. 反向恢复时间 t_{re}

通常是指在规定负载、反向电压及最大反向瞬态电流下，所测出的反向恢复时间。

1.2.4 含二极管电路的计算

对含有二极管的电路进行分析计算时，首先必须明确电路中各二极管究竟是导通还是截止。若导通，即可等效为开关合上；若截止，可作开关断开处理。

【例 1-1】 图 1-14(a) 所示电路中，二极管为硅管，求电路中的电流 I 和电压 U 。

解： 电路中二极管 V 上加的正向电压为 $(E + U_R) = (2 + 1)V > U_F (= 0.7V)$ ，故 V 导通时可等效为具有 $U_F = 0.7V$ 压降的闭合了的开关，如图 1-14(b) 所示。

$$I = \frac{E + U_R - U_F}{R} = \frac{(2 + 1 - 0.7)V}{0.1 k\Omega} = 23 \text{ mA}$$

$$U = U_F - U_R = 0.7 - 1 = -0.3 (V)$$

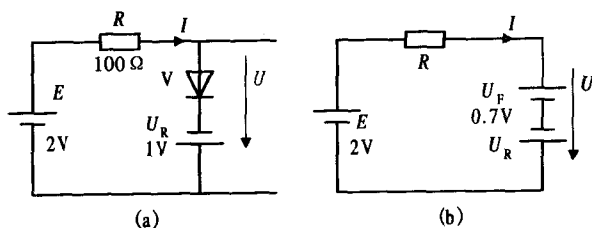


图 1-14 例 1-1 图

(a) 电路图；(b) 等效电路图

【例 1-2】 电路如图 1-15(a) 所示。设信号源电压 u_s 为正弦电压(如图 1-15(b) 所示)，求输出电压 u_o 的波形(忽略二极管正向导通压降 U_F)。

解： 当 $u_s < E$ 时，二极管截止，故 $u_o = u_s$ ，当 $u_s > E$ 时，二极管导通，则 $u_o = E$ 。由以上分析后画出的 u_o 波形如图 1-15(b) 所示，二极管截止、导通两种情况下的等效电路见图 1-16。