



北京市高等教育精品教材立项项目

电工电子基础课程规划教材

数字逻辑

■ 朱·虹 主编 ■ 尚媛园 张伟功 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]



北京市高等教育精品教材立项项目

电工电子基础课程规划教材

数 字 逻 辑

朱 虹 主编

尚媛园 张伟功 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

“数字逻辑”是高校计算机科学与技术等信息类专业的一门重要核心课。本书系统地阐述了“数字逻辑”课程的基本概念、理论及数字逻辑电路的基本分析、设计方法。采用“目标驱动型”教学方法，建立起“电子器件—集成电路—数字系统”的思维模式。全书共7章，涵盖了基础知识、组合逻辑电路和时序逻辑电路等内容，并充分利用计算机仿真，使教学过程更具可操作性。

本书可作为高等学校计算机科学与技术、电子信息工程、自动化、通信工程等专业的教材，也可作为相关专业教师、学生及工程技术人员的参考用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑 / 朱虹主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.7

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-23274-9

I. ①数… II. ①朱… III. ①数字逻辑—高等学校—教材 IV. ①TP302.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第105063号

策划编辑: 冯小贝

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.25 字数: 348千字

版 次: 2014年7月第1版

印 次: 2014年7月第1次印刷

定 价: 35.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

1947 年肖克利等人发明的晶体管、1958 年基尔比发明的集成电路,成为 20 世纪最重要的发明之一。半个多世纪以来,以晶体管、集成电路为代表的半导体器件的飞速发展及广泛应用,使得计算机、网络、手机等数字产品已深入到人们生活的诸多领域,改变了并将继续改变人们的生活方式,数字化已深入人心。

“数字逻辑”是数字电子技术的理论、应用和实践的课程,是高等院校计算机科学与技术、电子信息工程等信息类专业的核心课程,同时又是后续专业课的先导课。虽然计算机、手机、网络等数字化设备广泛使用,然而许多信息类专业的学生,对数字化信息的获取、处理等一些基本概念的认识和思维模式依然十分浅显。作者在多年的教学实践中发现许多问题。例如,在信息类专业的一些专业基础课中,一般都会讲授诸如“二进制数、码”等知识,学生往往感到十分茫然。因为历史已经证明:“十进制”是最好的数制,所以学生们不禁会问:我们受了这么多年的教育,今天终于坐在了大学的课堂上,居然还要学习“二进制数”,这岂不成了历史的“大倒退”?殊不知在数字电路中,因为构成电路的最基本单元——晶体管,它只有“开”、“关”两种工作状态,只能表示“0”、“1”两个数,所以才不得已把好端端的“十进制数”转变为“二进制数”,实在是无奈之举。因此,为了适应新时期能力型、素质型人才培养的要求,对“数字逻辑”课程的教学改革势在必行。

本书是北京高等教育精品教材建设重点支持项目,编写的目的就是要改变传统的教学方法和教学方式,在强调基本概念、原理的基础上,重点突出方法的应用。一方面,本书采用“目标驱动型”教学方法,如在第 4 章组合逻辑电路的分析与设计中,先用一个实用的数字系统——计算器,建立一个具体的教学目标,然后根据“计算器”的具体设计要求对数字系统进行分解,再把涉及的相关知识点按教学要求排序,并顺序讲授。当把相关内容讲授完毕后,“计算器”这一实际数字系统也就设计完成了。从而建立了“电子器件—集成电路—数字系统”的思维模式,使学生对知识的理解不再是片面的、孤立的,而是完整的、系统的。更重要的是,使学生不仅掌握了知识本身,而且学会了知识的实际应用。另一方面,充分利用计算机仿真这一现代技术手段,本书在讲解数字电路、数字系统的理论分析与设计之后,都做了仿真实验,并给出了仿真结果。将理论知识与实际系统有机地融为一体,从而培养学生的实验、实践能力,培养学生的创新意识和创新能力。经过几年的教学实践,证明这种教学方法、手段和模式是可行的、有效的。

从教材结构上看,按照知识点的性质及教学顺序,单独编写成章。第 1、2 章是基础知识,第 3、4 章是组合逻辑电路,第 5、6 章是时序逻辑电路,第 7 章是数字系统的综合设计。除了第 1、2 章的基础知识外,其余各章内容既具有相对的独立性,又可以组成一个完整的数字系统。使教学目标更加明确,教学过程更加具有可操作性,充分调动教师和学生的积极性。

为了培养高等师范院校中信息类师范生的相关技术能力,结合教育部制定的《普通高中通用技术课程标准(实验)》,本书第 7 章试图利用数字逻辑的基本理论知识、数字逻辑电路的基本分析与设计的方法,综合设计了一些典型的实用数字系统,符合通用技术教育的“基

基础性、实用性、实践性、前瞻性、创新性”特点，可作为普通高中通用技术课程的教学及实践案例，同时也可作为本课程综合设计的题目。

本书是作者在查阅了大量的参考文献，并结合多年教学实践的基础上编著而成的。虽然尽了最大的努力，然而毕竟水平有限，难免还有缺点与不足，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 微电子器件基础	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结	3
1.1.4 半导体二极管	4
1.2 双极型晶体管及其开关特性	6
1.2.1 双极型晶体管的结构	6
1.2.2 电流放大	6
1.2.3 晶体管的开关特性	7
1.3 场效应管及其开关特性	8
1.3.1 绝缘栅型场效应管的结构及原理	8
1.3.2 场效应管的开关特性	10
习题一	11
第 2 章 数字逻辑的数学基础	12
2.1 进位计数制	12
2.1.1 二进制	12
2.1.2 二进制数与十进制数的相互转换	13
2.2 带符号数的表示	15
2.2.1 数的原码表示法	15
2.2.2 数的反码表示法	15
2.2.3 数的补码表示法	16
2.3 数的编码表示	16
2.3.1 二-十进制编码	16
2.3.2 格雷码 (Gray Code)	17
2.3.3 奇偶校验码	18
2.3.4 ASCII 字符编码	19
2.4 逻辑代数	20
2.4.1 逻辑代数的基本问题	20
2.4.2 逻辑代数的基本定律与公式	22
2.4.3 逻辑函数的代数法化简	23
2.4.4 逻辑函数的卡诺图化简	23
习题二	26

第 3 章 基本逻辑门电路	28
3.1 分立元件门电路	28
3.1.1 与门电路	28
3.1.2 或门电路	30
3.1.3 非门电路	31
3.2 TTL 集成门电路	32
3.2.1 TTL 门电路概述	33
3.2.2 TTL 集成门电路	33
3.2.3 TTL 门电路的外特性	37
3.2.4 特殊类型 TTL 门电路	39
3.3 CMOS 集成门电路	43
3.3.1 CMOS 与非门	44
3.3.2 常用 CMOS 集成门电路	44
3.3.3 CMOS 门电路的外特性	45
习题三	46
第 4 章 组合逻辑电路的分析与设计	47
4.1 组合逻辑电路概述	47
4.2 组合逻辑电路的分析方法	47
4.3 组合逻辑电路的设计方法	50
4.4 简易计算器电路的设计	52
4.4.1 编码电路的设计	53
4.4.2 算术运算电路的设计	61
4.4.3 译码电路的设计	73
4.5 其他常用的组合逻辑电路的设计	86
4.5.1 数值比较电路的设计	87
4.5.2 数据选择电路的设计	91
4.5.3 数据分配电路的设计	94
习题四	95
第 5 章 双稳态触发器及其应用	97
5.1 基本 RS 触发器	97
5.1.1 基本 RS 触发器的原理	98
5.1.2 触发器的逻辑功能表示方法	99
5.1.3 集成基本 RS 触发器	101
5.1.4 或非门构成的基本 RS 触发器	102
5.2 电平式触发器	102
5.2.1 电平式 RS 触发器	103
5.2.2 电平式 D 触发器	105
5.3 边沿式触发器	106

5.3.1	边沿式 D 触发器	107
5.3.2	集成边沿式 D 触发器	110
5.3.3	边沿式 JK 触发器	111
5.3.4	集成边沿式 JK 触发器	115
5.4	触发器的功能分类及其相互转换	116
5.4.1	触发器的功能分类	116
5.4.2	触发器的相互转换	118
	习题五	121
第 6 章	时序逻辑电路的分析与设计	124
6.1	时序逻辑电路概述	124
6.1.1	时序逻辑电路的组成	124
6.1.2	时序逻辑电路的描述	124
6.1.3	时序逻辑电路的分类	125
6.2	同步计数器的分析及应用	126
6.2.1	二进制同步计数器	126
6.2.2	集成二进制同步计数器及其应用	130
6.2.3	十进制同步计数器	134
6.2.4	集成十进制同步计数器及其应用	138
6.2.5	N 进制同步计数器	141
6.3	异步计数器的分析及应用	144
6.3.1	二进制异步计数器	144
6.3.2	十进制异步计数器	147
6.3.3	集成异步计数器及其应用	149
6.4	寄存器的分析及应用	151
6.4.1	数据寄存器	151
6.4.2	集成数据寄存器	152
6.4.3	移位寄存器	153
6.4.4	集成移位寄存器	155
6.5	环形计数器及其应用	158
6.5.1	环形计数器及应用	158
6.5.2	扭环形计数器及应用	163
6.6	时序逻辑电路的设计	165
6.6.1	序列信号检测器的设计	165
6.6.2	计数器的设计	168
6.6.3	环形计数器的设计	171
	习题六	174
第 7 章	数字逻辑在普通高中通用技术课程中的应用	177
7.1	带符号的一位加减计算器	177

7.1.1	总体设计	177
7.1.2	计算器键盘及按键信号的读取	178
7.1.3	数字按键信号的编码	179
7.1.4	数字键编码的锁存	180
7.1.5	加减运算电路	181
7.1.6	译码显示及消隐电路	183
7.1.7	计算器仿真结果	184
7.2	八路智力竞赛抢答器	185
7.2.1	脉冲发生器	186
7.2.2	秒脉冲发生器	187
7.2.3	30 秒倒计时器	187
7.2.4	八路抢答器	188
7.3	简易频率计	189
7.3.1	频率测量原理及总体设计	189
7.3.2	1 秒钟倒计时器	190
7.3.3	计数器	190
7.3.4	仿真结果	190
7.4	十字路口交通灯控制器	195
7.4.1	交通灯控制器总体设计	195
7.4.2	定时控制器	196
7.4.3	5 秒/35 秒定时器	196
7.4.4	交通灯显示控制	197
7.4.5	仿真结果	199
7.5	数字时钟	199
7.5.1	数字时钟的总体设计	200
7.5.2	秒计数器	200
7.5.3	分计数器	200
7.5.4	时计数器	201
7.5.5	仿真结果	202
参考文献		203

第 1 章 微电子器件基础

晶体管 (Transistor) —— 20 世纪在电子技术领域最伟大的发明之一, 推动了信息革命, 带动了产业革命, 开辟了亿万个就业岗位, 改变了人类社会工作方式和生活方式, 奠定了现代数字社会的基础。

1947 年, 贝尔实验室 (Bell Labs) 的 William Shockley (威廉·肖克利)、John Bardeen (约翰·巴丁)、Walter Brattain (沃尔特·布拉坦) 用一片半导体材料、几条金属片和一个弯支架做成一种叫做“三根针”的东西, 这就是后来引发电子革命的“晶体管” (Transistor)。它从此替代真空管, 成为电子放大器件, 以至于后来成为电子计算机、大规模集成电路的基本器件。肖克利等三位科学家因此获得 1956 年度的诺贝尔物理学奖。

晶体管发明之后, 于 1953 年首先应用于助听器。1954 年, 德州仪器公司 (TI) 制成硅三极管, 并用它制成第一批晶体管收音机, 不久, 这个市场却被当时一个不知名的小公司所占有。这个公司就是现在的日本索尼公司 (Sony), 从而使日本成为世界上模拟电子领域的强国。1955 年, 贝尔实验室用 800 只晶体管组装了世界上第一台晶体管计算机 TRADIC (Transistor Digital Computer), 揭开了晶体管计算机时代的序幕。与电子管计算机相比, 晶体管计算机体积小、功耗低、稳定性强, 使计算机的性能得到了质的飞跃。

1.1 半导体的基础知识

物质的导电能力是由其内部自由电子的数量决定的。一般而言, 自然界的物质按其导电性能可分为导体、绝缘体和半导体三种。

导电能力较强的物质称为导体, 如铜、铝、银等金属材料。导电性能最好的是银, 其次是铜、铝。实际工程中, 考虑到性能价格比, 一般使用铝和铜。金属导体比较活泼, 常温下其内部的电子很容易挣脱原子核的束缚, 成为自由电子, 在外加电场的作用下, 这些自由电子作定向运动, 形成电流。

没有导电能力或导电能力很差的物质称为绝缘体, 如橡胶、塑料、干燥的木材、陶瓷、云母等。绝缘材料在常温下, 其内部的自由电子数量极少, 因此不能导电。绝缘性能最好的是陶瓷, 电力系统中, 常用陶瓷做高压绝缘子。

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体 (Semi-conductor), 如硅 (Si) 和锗 (Ge)。因为硅大量存在于沙石之中, 制造成本低廉, 所以主要使用硅作为半导体材料。半导体材料具有热敏性、光敏性、掺杂性等区别于导体和绝缘体的独特性能, 因此, 半导体材料得到了广泛的应用。

1.1.1 本征半导体

纯净半导体称为本征半导体。硅和锗的原子中, 最外层有 4 个电子, 称为价电子。本征半导体内部呈晶体结构, 它们的原子按一定规律整齐排列, 最外层的 4 个价电子一方面受原子核的束缚, 另一方面受相邻原子束缚, 形成共价键结构, 如图 1-1-1 所示。

在热力学零度，即 -273.15°C 时，价电子无法挣脱原子核和共价键的束缚，因此，本征半导体没有自由电子，不能导电。随着温度的升高，部分价电子由于受到热激发，挣脱原子核和共价键的束缚而成为自由电子。同时在原位置上出现一个空位置，称为空穴。每出现一个自由电子，就相应地产生一个空穴。在本征半导体中，自由电子与空穴总是成对出现的，称为电子-空穴对，如图 1-1-2 所示。

空穴具有吸引自由电子填补的能力。自由电子在热运动中，受到空穴的吸引，可能填补空穴。这时，自由电子与空穴同时消失，这称为复合。在一定的温度下，电子-空穴对的产生与复合达到一个动态平衡。

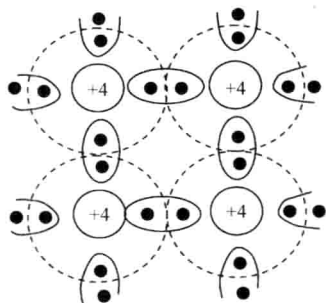


图 1-1-1 本征半导体的内部结构

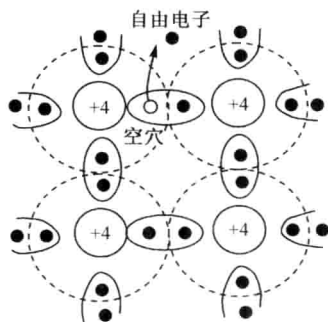


图 1-1-2 电子-空穴对的产生

在外加电场的作用下，自由电子向电场的正极运动。在运动过程中，自由电子可能填补空穴，而这个电子原来的位置出现了空位。因此，自由电子填补空穴的运动相当于空穴沿着电子运动的反方向运动，即向电场的负极运动。这样，可以把自由电子和空穴看成半导体中的两种载流子，自由电子带负电，而空穴带正电。在外加电场的作用下，两种载流子运动方向相反，但产生的电流方向相同。

随着温度的升高，热激发增强，电子-空穴对的数量按指数规律急剧增加。但在常温下，本征半导体中的载流子数量很少，导电性能很差，一般没有实用价值。

1.1.2 杂质半导体

在纯净的半导体中掺入微量的其他元素，可显著改变半导体材料的导电能力，这是半导体区别于导体和绝缘体的重要性能。正是半导体的掺杂性特点，才使得它具有重大的应用价值。掺杂后的半导体称为杂质半导体，分为 N 型和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入少量的 5 价元素，如磷元素，磷原子会在硅晶体中的某些位置代替硅原子。磷原子的最外层有 5 个价电子，其中的 4 个与相邻的 4 个硅原子结合，组成共价键，还多余 1 个价电子，它只受磷原子核的束缚，不受共价键的束缚，只要获得较小的能量就可成为自由电子。常温下，这些多余的价电子几乎全部激发而成为自由电子，如图 1-1-3 所示。

掺杂后的半导体中存在大量的自由电子，称为多数载流子，简称多子；而由本征激发产生的空穴，其数量相对少得多，称为少数载流子，简称少子。因为自由电子带负电，所以称

这种半导体为 N 型 (Negative) 半导体。在外加电场的作用下, 其导电能力主要靠自由电子, 又称为电子型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入少量的 3 价元素, 如铝、硼等, 它们的原子最外层只有 3 个价电子, 与相邻的 4 个硅原子形成共价键时, 因缺少 1 个价电子而留出一个空穴。显然, 在这种半导体中存在大量的空穴, 称为多数载流子。而由本征激发产生的自由电子的数量就少得多, 因此称为少数载流子, 如图 1-1-4 所示。因为空穴带正电, 所以称这种半导体为 P 型 (Positive) 半导体。在外加电场的作用下, 其导电能力主要靠空穴, 又称为空穴型半导体。

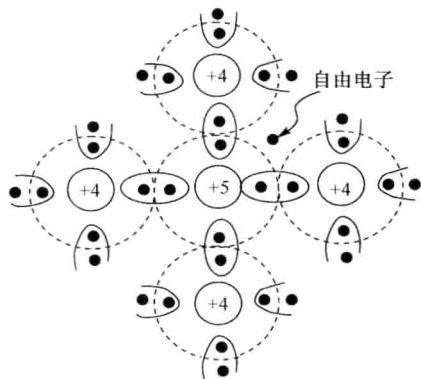


图 1-1-3 N 型半导体内部结构

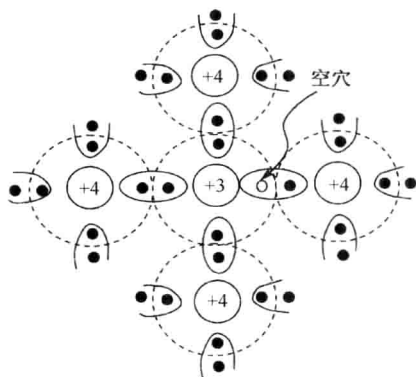


图 1-1-4 P 型半导体内部结构

1.1.3 PN 结

1. PN 结的形成

在一块本征半导体上, 两边分别掺入不同的杂质, 形成 P 型半导体和 N 型半导体两个区域, 那么在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面上就会形成具有特殊物理性能的 PN 结, 如图 1-1-5 所示。

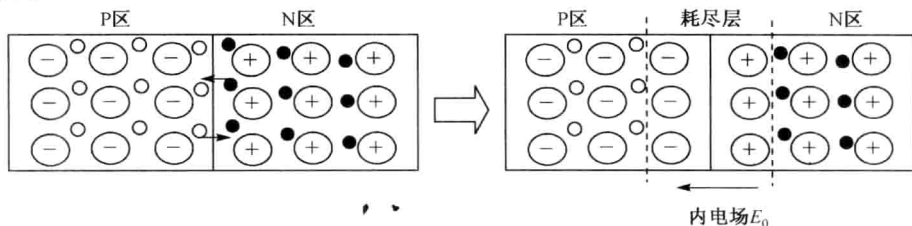
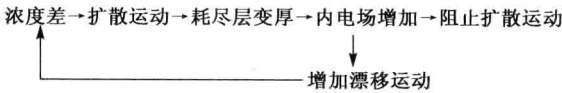


图 1-1-5 PN 结的形成

P 区中的多数载流子是空穴, N 区中的多数载流子是自由电子, 在交界面附近出现了电子和空穴的浓度差, 产生扩散运动。P 区中的空穴会越过交界面向 N 区扩散, 而 N 区中的自由电子则越过交界面向 P 区扩散, 两种载流子一旦扩散到对方区域就产生复合, 在交界面附近只剩下一些不能移动的离子, 这些正、负离子所占据的空间称为耗尽层, 形成由正极指向负极的内电场 E_0 。

随着扩散运动的加剧, 耗尽层会越来越厚, 内电场越来越大。一方面, 内电场会阻止多

数载流子的继续扩散；另一方面，使 P 区的少数载流子（自由电子）向 N 区漂移，N 区的少数载流子（空穴）向 P 区漂移，这称为漂移运动。其结果是某区的少子漂移到对方区域就成为对方的多子，这又使得耗尽层变薄，内电场变弱。接着，又加剧扩散运动，……



最后，扩散运动与漂移运动达到动态平衡，形成稳定的空间电荷区，这就是 PN 结。这时多子扩散运动产生的扩散电流与少子漂移运动产生的漂移电流大小相等、方向相反，在无外加电场时，PN 结内部无电流。

2. PN 结的单向导电性

PN 结的一个重要特性就是单向导电性，即正向偏置时导通，反向偏置时截止。

(1) 正向偏置

在 PN 结两端加上电场，P 区接正极，N 区接负极，这种接法称为正向偏置，简称正偏，如图 1-1-6 所示。这时，外加电场与 PN 结的内电场的方向相反，外电场抵消了内电场，使得 P 区为正，N 区为负，增强了多子的扩散运动，阻止了少子的漂移运动，耗尽层变薄。P 区的多子（空穴）向 N 区扩散，N 区的多子（自由电子）向 P 区扩散，由于多子的数量较多，所以形成了较大的扩散电流。因此，PN 结在正向偏置时处于导通状态。

(2) 反向偏置

在 PN 结的 P 区接负极，N 区接正极，这种接法称为反向偏置，简称反偏，如图 1-1-7 所示。显然，外加电场与 PN 结的内电场的方向相同，外电场增强了内电场，使得 P 区为负，N 区为正，所以多子的扩散运动受到了阻止，而少子的漂移运动则得到了加强，耗尽层变厚。P 区的少子（自由电子）向 N 区漂移，N 区的少子（空穴）向 P 区漂移。但是，少子的数量极少，所以漂移电流非常微弱，而且基本上不随外加电压的增加而变化，称为反向饱和电流。实际使用中，可认为反向饱和电流约等于 0，因此，PN 结在反向偏置时，处于截止状态。

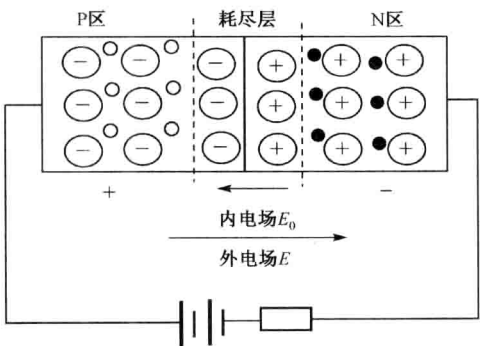


图 1-1-6 PN 结的正向偏置

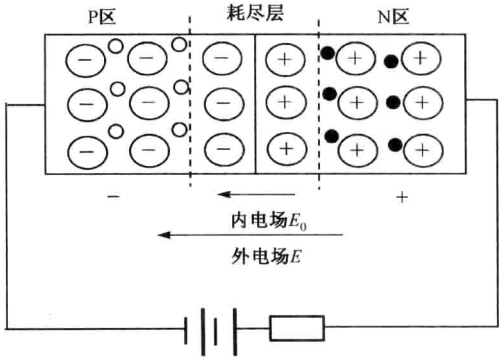


图 1-1-7 PN 结的反向偏置

1.1.4 半导体二极管

1. 二极管的伏安特性

从 PN 结的两端分别引出两根电极，然后加上外壳封装就构成最基本的半导体二极管，P 区的引出线称为阳极（正极），N 区的引出线称为阴极（负极）。二极管的电路符号如图 1-1-8

所示,二极管符号中的箭头表示正向偏置时电流的方向,正向电流从二极管阳极流入,阴极流出,具有单向导电性能。

二极管两端正偏时,即阳极接电源正极,阴极接电源负极,且外加电压大于二极管内 PN 结的内电场,二极管导通。但是,如果正偏电压很小,不足以克服内电场作用时,二极管截止。使二极管正向导通的最低电压称为死区电压,一般来说,硅二极管的死区电压约为 0.5 V ,锗二极管的死区电压约为 0.2 V 。二极管正向导通后,其导通电压基本维持不变。硅二极管的导通电压约为 0.7 V ,锗二极管的导通电压约为 0.2 V 。

二极管两端反偏时,即阳极接电源负极,阴极接电源正极,二极管的反向饱和电流很小,硅管为几微安,锗管为几十到几百微安,可认为反向截止。

如果继续加大反向电压,当反向电压超出一定值时,会破坏半导体材料内部的共价键结构,使内部载流子数量急剧加大,反向电流迅速增大,造成二极管的反向击穿,从而损坏二极管。

二极管的伏安特性如图 1-1-9 所示。

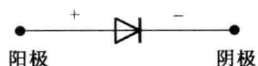


图 1-1-8 二极管的电路符号

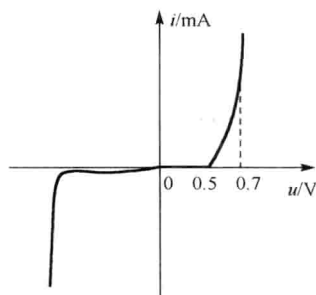


图 1-1-9 二极管的伏安特性

2. 二极管的开关特性

数字电路中,二极管常用作开关元件。以硅二极管为例,根据上述二极管的伏安特性,当二极管两端加一个 0.7 V 以上的正向电压时,二极管导通,其两端的管压降为 0.7 V ,这相当于一个闭合的开关。当两端加一个 0.5 V 以下的电压时,二极管截止,相当于一个断开的开关,如图 1-1-10 所示。

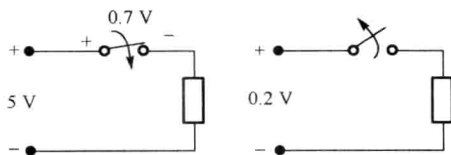


图 1-1-10 二极管的开关特性

因为二极管中的 PN 结存在结电容、扩散电容等效应,使得二极管的开、关都要经过一段时间的延时才能完成,这就极大地影响了它的动态特性,输入信号的频率越高,动态性能越差。

3. 二极管的主要性能指标

性能指标是表明二极管质量好坏及安全适用范围的重要参数,可从晶体管手册中查到。其主要性能指标参数有:

(1) 最大允许整流电流 I_{OM}

I_{OM} 为二极管长期运行时, 允许通过二极管的最大正向电流。实际应用时, 二极管中的电流不能超过该值, 否则二极管会因过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 是允许加到二极管两端的最大反向偏置电压, 一般取反向击穿电压的一半。

(3) 反向饱和电流 I_{RM}

I_{RM} 为二极管在最高反向工作电压处所对应的反向电流, 该值越小越好。 I_{RM} 受环境温度的影响, 温度越高, I_{RM} 也越大。

(4) 工作频率

工作频率是指二极管用作开关时, 允许输入信号的最高频率。

1.2 双极型晶体管及其开关特性

晶体管 (Transistor) 是 20 世纪最伟大的发明之一, 在电子电路中得到了广泛的应用, 奠定了电子技术的物质基础。

1.2.1 双极型晶体管的结构

双极型晶体管由 2 个背靠背的 PN 结组成, 引出 3 个电极, 分别称为发射极 (Emitter, 简称 e 极)、基极 (Base, 简称 b 极)、集电极 (Collector, 简称 c 极)。晶体管有两种类型, 分别是 NPN 型和 PNP 型, 两者的区别只是电流方向不同。NPN 型晶体管的结构及符号如图 1-2-1 所示, PNP 型晶体管的结构及符号如图 1-2-2 所示。

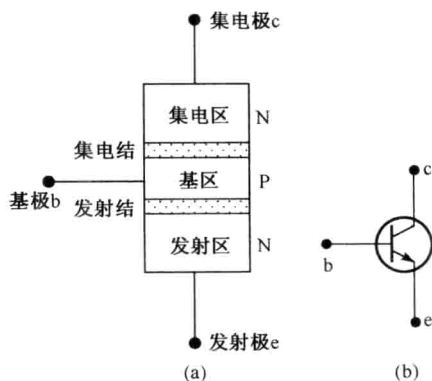


图 1-2-1 NPN 型晶体管的结构及符号

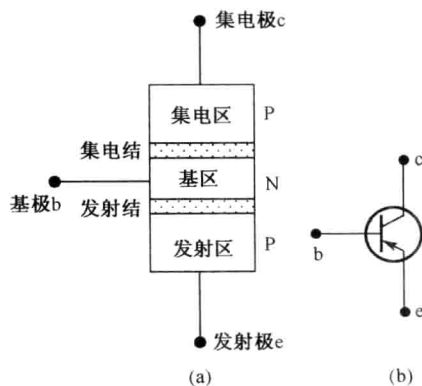


图 1-2-2 PNP 型晶体管的结构及符号

晶体管在制作工艺上有一定的要求: 发射区高浓度掺杂, 多子的数量很多; 基区很薄, 且低浓度掺杂, 多子的数量较少; 集电结面积较大, 保证能流过较大的电流。

1.2.2 电流放大

晶体管实现电流放大时, 其 3 个电极的接法必须保证发射结正偏、集电结反偏。以 NPN 型晶体管为例, 放大电路的接法如图 1-2-3(a) 所示, 相应的电路原理图如图 1-2-3(b) 所示。

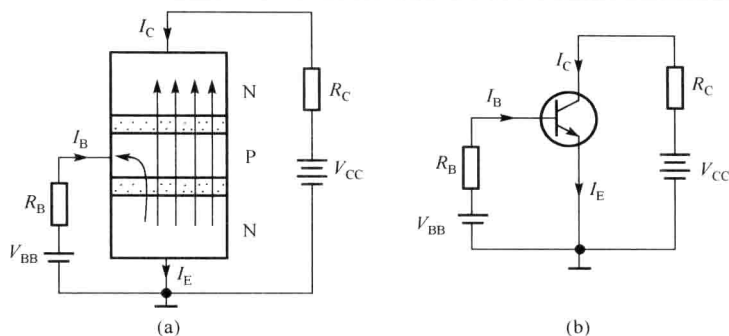


图 1-2-3 NPN 型晶体管放大电路

晶体管要正常实现放大功能, 必须使它的发射结处于正偏状态, 集电结处于反偏状态。其基本放大原理简述如下:

由于发射结处于正偏状态, 那么发射区中高浓度的自由电子向基区发射, 产生电流 I_E 。因为基区中多子(空穴)的浓度远低于发射区中多子(自由电子)的浓度, 那么到达基区的自由电子的一小部分与基区中的空穴复合, 产生电流 I_B 。其余大部分自由电子因无空穴可复合, 只能聚集在集电结附近。另一方面, 因为集电结处于反偏状态, 所以, 聚集在集电结附近的大量自由电子都被集电极收集, 产生电流 I_C 。

显然, 电流 I_C 占了 I_E 的绝大部分, 可以设 $I_C = \alpha I_E$, 其中, $\alpha \approx 0.98 \sim 0.99$ 。

根据基尔霍夫定律:

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-2-1)$$

那么, 有 $I_C = \alpha I_E = \alpha(I_B + I_C)$ 。所以

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B$$

上式中, 定义 $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$, 称为晶体管的电流放大倍数。这样就得到了晶体管的电流放大关系:

$$I_C = \beta I_B \quad (1-2-2)$$

不同的晶体管的电流放大倍数 (β 值) 不同, 一般在 $30 \sim 100$ 之间。使用者可根据需要选择不同 β 值的晶体管。

从式 (1-2-2) 可知, 利用较小的 I_B , 就可得到较大的 I_C , 从而实现电流放大作用。

1.2.3 晶体管的开关特性

分析图 1-2-3(b)所示的电路, 由式 (1-2-2) 可知, 晶体管有三种工作状态。

① 当 $I_B = 0$ 时, $I_C = 0$ 。这称为截止状态。这时, 晶体管的集电极 c 与发射极 e 之间就像一个断开的开关, 如图 1-2-4(a)所示。

② 当 I_B 为某个数时, $I_C = \beta I_B$ 。 I_C 随着 I_B 的增加而增加, 这称为放大状态。

③ I_B 增加, I_C 也随着增加, 电阻上的电压 $R_C I_C$ 也增加, 而 c、e 之间的电压 $U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$ 则下降。当 I_B 增加一定程度时, U_{CE} 降到很小, 集电极就失去了收集电子的能力。这时, I_B 再增加, I_C 也不再增加了。晶体管进入了饱和区, 这称为饱和状态。

当晶体管进入深度饱和时, $U_{CE} \leq 0.3 \text{ V}$ 。这时, 晶体管的集电极 c 与发射极 e 之间就像一个闭合的开关, 如图 1-2-4(b)所示。

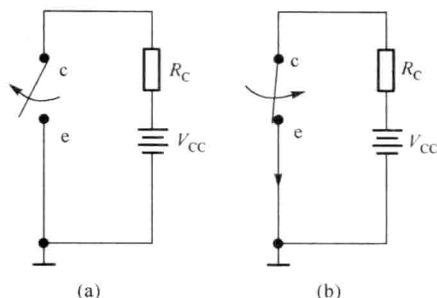


图 1-2-4 晶体管的开关特性

晶体管的这三种工作状态在电子电路中得到了充分的应用。在模拟电子电路中, 使用放大状态。而在数字电子电路中, 用截止、饱和两种状态分别表示数字 0 和 1, 从而进入了用二进制数表示的数字世界。

1.3 场效应管及其开关特性

上节介绍的晶体管是靠自由电子和空穴作为载流子的, 称为双极型晶体管。实际上, 现在广泛使用的场效应管是单极型晶体管。与双极型晶体管相比, 场效应管具有输入阻抗高、功耗低、温度稳定性好、噪声小、易于集成等优点。

双极型晶体管利用较小的基极电流 i_B 控制较大的集电极电流 i_C , 称为电流控制型元件。而场效应管 (Field Effect Transistor) 是利用输入电压控制较大的输出电流, 故称为电压控制型元件。因为场效应管无输入电流, 所以其输入功率等于零, 这使得用场效应管集成的大规模集成电路的功耗大大降低。

场效应晶体管分为三大类: 结型场效应管 (JFET)、肖特基势垒型场效应管 (MESFET) 和绝缘栅型场效应管 (IGFET)。其中, 目前最广泛应用的是绝缘栅型场效应管, 因为其内部的各个器件之间存在着天然的隔离, 使其非常适合于制作大规模集成电路。

绝缘栅型场效应管的栅极可用金属材料制成, 下面的绝缘层是二氧化硅, 按纵向结构可称为金属-氧化物-半导体 (Metal-Oxide-Semiconductor) 场效应管, 简称 MOSFET。事实上, 目前许多场效应管的栅极采用多晶硅, 而绝缘层也不一定是二氧化硅, 但仍习惯性地称为 MOSFET。

1.3.1 绝缘栅型场效应管的结构及原理

按导电沟道的不同, 绝缘栅型场效应管分为 P 沟道 (PMOS) 和 N 沟道 (NMOS); 按导电沟道形成的不同, 又分为增强型和耗尽型两种。下面以绝缘栅 N 沟道增强型场效应管为例, 简单介绍其结构及工作原理。

在 P 型半导体衬底上制作两个 N^+ 区, 分别称为源区和漏区。源区与漏区之间称为沟道区, 在沟道区的表面涂上一层 SiO_2 绝缘层。在源区、漏区和绝缘栅上引出铝电极, 分别称为源极