

高等院校教学用书

高等教育国家文凭考试教材

电子技术与 数字电路

王克义 李洁 编著

M

C

A

S

M

C

A

S

M

北京大学出版社

内 容 简 介

本书为高等院校教学用书,并被北京市高等教育自考委员会列为国家文凭考试指定教材。本书第一部分讲述模拟电子技术,内容包括:半导体基础知识、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源等。第二部分讲述数字电子技术,内容包括:数制与编码、逻辑代数基础及应用、常用逻辑门电路、组合逻辑电路的分析与设计、触发器及时序逻辑电路、常用逻辑部件、脉冲技术基础、数模和模数转换等。

本书严格按照教学大纲编写,内容精练,层次清楚,实用性强。本书可作为大学理科和工科各专业教材,也可作为自学考试和文凭考试、以及各类职业学校教材。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术与数字电路/王克义,李洁编著. —北京:北京大学出版社,1996.2

ISBN 7-301-03110-6

I. 电… I. ①王… ②李… III. ①模拟电路-高等学校-教材②数字电路-高等学校-教材 IV. ①TN②TN710

书 名: 电子技术与数字电路

著作责任者: 王克义 李 洁

责任编辑: 杨锡林

标准书号: ISBN 7-301-03110-6/TP·0293

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

电 话: 出版部 2752015 发行部 2559712 编辑部 2752032

排 印 者: 北京飞达印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 512 千字

1996 年 2 月第一版 1996 年 2 月第一次印刷

定 价: 25 元

前 言

随着电子科学技术的迅速发展和计算机技术的广泛应用,“电子技术与数字电路”已成为高等学校许多专业的一门重要的技术基础课。

本书在选材和内容安排上注意基础知识和实际应用技术相结合,并按照“器件—模拟—数字—数/模和模/数”的体系编排。模拟电路部分主要讨论了半导体器件及模拟集成电路构成的电子电路,主要包括半导体基础知识,放大电路基础,集成运算放大器和直流稳压电源。对半导体器件内部工作原理的讨论,力求概念清楚,避免繁复的数学推导。对各类模拟集成电路,重点是介绍集成元件的外部特性及实际应用技术。

数字电路部分主要讨论了数制与编码,逻辑代数基础,逻辑门电路,触发器电路以及组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析与设计等内容,并特别介绍了利用现成的中、大规模集成电路进行逻辑设计的技术和方法。此外,还介绍了脉冲信号的产生与整形以及数/模和模/数转换方面的有关内容。

本书注重精选内容,突出重点,加强学生对基本概念和基本原理的理解,并注重实际应用能力的训练。每章后的小结便于学生复习时参考,习题和思考题有利于学生自我检查。

本书适合作高等学校有关专业“电子技术与数字电路”课程的教材,也可用作高等教育自学考试、国家文凭考试及职工大学的相应教材。前4章内容建议学时数为50学时,后8章建议学时数为60学时。

本书第一、二、三、四、十二章由李洁编写,第五、六、七、八、九、十、十一章由王克义编写。由于时间及水平所限,书中一定存在不少缺点和错误,恳请读者和使用本书的教师批评、指正。

编 者

1995年10月于北京大学计算机科学技术系

目 录

第一章 半导体器件	(1)
第一节 半导体的基本知识	(1)
一、半导体的导电特性	(1)
二、PN 结及其单向导电特性	(4)
三、PN 结的伏安特性	(5)
四、PN 结的击穿	(5)
五、PN 结电容	(6)
第二节 晶体二极管	(6)
一、二极管的构造和分类	(6)
二、二极管的伏安特性	(7)
三、二极管的主要参数	(8)
四、特殊二极管的工作特点	(9)
五、二极管应用举例	(11)
第三节 晶体三极管	(13)
一、晶体管的基本结构及符号	(13)
二、晶体管的放大作用	(14)
三、晶体管的伏安特性曲线	(16)
四、晶体管的主要参数	(18)
第四节 场效应管	(19)
一、结型场效应管	(19)
二、绝缘栅场效应管	(22)
三、场效应管的主要参数	(24)
四、场效应管与晶体管的比较及使用注意事项	(25)
小结	(26)
思考题与习题	(26)
第二章 放大电路基础	(28)
第一节 基本放大电路	(28)
一、共射极基本放大电路	(28)
二、图解分析法	(32)
三、微变等效电路分析法	(36)
四、工作点稳定的偏置电路	(40)
第二节 共集电极放大电路(射极输出器)	(43)
一、共集电极放大电路	(43)
二、主要特点和应用	(44)
第三节 场效应管放大电路	(46)
一、偏置电路与静态分析	(46)

二、场效应管的微变等效电路	(47)
三、微变等效电路法分析场效应管放大电路	(47)
第四节 多级阻容耦合放大电路	(50)
一、阻容耦合多级放大电路的分析	(52)
二、放大电路的频率特性	(53)
第五节 功率放大电路	(60)
一、双电源互补对称功率放大电路(OCL)	(60)
二、单电源互补对称功率放大电路(OTL)	(64)
三、实用功率放大电路分析	(66)
小结	(66)
思考题与习题	(67)
第三章 集成运算放大器	(71)
第一节 差动放大电路	(71)
一、基本形式	(71)
二、长尾式差动放大电路	(73)
三、带恒流源的差动放大电路	(77)
第二节 放大电路中的反馈	(79)
一、反馈的基本概念	(79)
二、负反馈的四种组态分析	(80)
三、负反馈对放大电路性能的影响	(84)
四、负反馈放大电路的分析方法	(88)
第三节 集成运算放大器	(90)
一、集成运算放大器的结构原理和主要参数	(90)
二、信号运算电路	(93)
三、波形变换与产生电路	(98)
小结	(103)
思考题与习题	(104)
第四章 直流稳压电源	(106)
第一节 整流电路	(106)
一、单相桥式整流电路	(106)
二、三相桥式整流电路	(108)
第二节 滤波电路	(110)
一、电容滤波电路	(110)
二、电感滤波电路	(112)
三、组合滤波电路	(113)
第三节 直流稳压电路	(114)
一、串联型稳压电路	(114)
二、串联开关型稳压电路	(118)
三、集成稳压电路	(119)
小结	(121)
思考题与习题	(121)

第五章 数字电路基础	(122)
第一节 进位计数制	(122)
一、十进制计数制	(122)
二、二进制计数制	(123)
三、八进制计数制	(126)
四、十六进制计数制	(127)
第二节 数制转换	(127)
一、二进制数转换为十进制数	(127)
二、十进制数转换为二进制数	(128)
三、任意两种进位制之间的转换	(130)
第三节 二进制数在机器中的表示方法	(131)
一、机器数与真理	(131)
二、原码	(132)
三、补码	(132)
四、反码	(133)
五、原码、补码和反码之间的转换	(134)
第四节 二—十进制编码	(134)
一、二—十进制编码特点	(134)
二、8421 码	(135)
三、其他几种 BCD 码	(136)
第五节 字符代码	(139)
第六节 逻辑代数的基本原理及应用	(141)
一、逻辑代数的基本概念	(141)
二、逻辑代数的基本公式	(145)
三、逻辑代数的三个重要规则	(146)
四、逻辑函数的代数化简法	(148)
小结	(150)
思考题与习题	(151)
第六章 逻辑门电路	(153)
第一节 分立元件的门电路	(153)
一、二极管“与”门	(153)
二、二极管“或”门	(154)
三、“非”门	(154)
四、“与非”门	(155)
第二节 集成门电路	(155)
一、TTL“与非”门	(156)
二、TTL 门电路的其他类型	(157)
三、ECL 门电路	(162)
第三节 MOS 电路	(163)
第四节 逻辑门电路的性能指标	(164)
一、输出高电平(V_{OH})和输出低电平(V_{OL})	(164)

二、关门电平(V_{OFF})、开门电平(V_{ON})和阈值电平(V_T)	(164)
三、平均延迟时间(t_{pd})	(165)
四、扇入系数(N_i)和扇出系数(N_o)	(165)
五、空载导通电源电流(I_{CCL})与空载截止电源电流(I_{CCH})	(166)
第五节 常用逻辑门的图形符号	(166)
小结	(168)
思考题与习题	(168)
第七章 组合逻辑电路	(169)
第一节 几个基本概念	(169)
一、“积之和”与“和之积”	(169)
二、最小项和最大项	(169)
三、最小项表达式和最大项表达式	(170)
第二节 逻辑函数的卡诺图化简法	(172)
一、卡诺图	(172)
二、卡诺图的编号	(174)
三、用卡诺图化简逻辑函数	(175)
第三节 不完全规定的逻辑函数的化简方法	(178)
一、无关最小项的概念	(178)
二、利用无关最小项化简逻辑函数	(179)
第四节 组合逻辑电路的分析	(180)
第五节 组合逻辑电路的设计	(182)
一、加法电路的设计	(182)
二、代码转换电路的设计	(184)
三、七段数字显示器的原理与设计	(186)
第六节 几种常用的组合逻辑电路	(189)
一、加法器	(189)
二、译码器	(189)
三、编码器	(190)
四、多路选择器	(193)
五、多路分配器	(196)
第七节 利用中、大规模集成电路进行逻辑设计	(198)
一、利用中规模集成电路组件构成所需逻辑部件	(198)
二、ROM 的逻辑结构及其应用	(200)
三、可编程序逻辑阵列 PLA	(204)
第八节 组合逻辑电路中的竞争与险象	(206)
一、竞争现象	(206)
二、险象的产生	(206)
三、险象的判别	(208)
四、险象的消除	(209)
小结	(212)
思考题与习题	(212)

第八章 时序电路的基本单元——触发器	(215)
第一节 RS 触发器	(215)
一、基本 RS 触发器	(215)
二、钟控 RS 触发器	(216)
三、数据锁存器	(218)
第二节 触发器外部逻辑特性的描述	(219)
第三节 维阻 D 触发器	(220)
第四节 主从 JK 触发器	(222)
一、主从触发器	(222)
二、JK 触发器	(223)
三、主从 JK 触发器	(224)
第五节 T 触发器	(224)
第六节 不同类型触发器间的转换	(225)
一、D 触发器转换成其他类型的触发器	(226)
二、JK 触发器转换成其他类型的触发器	(227)
第七节 触发器的激励表	(228)
第八节 触发器集成电路	(229)
小结	(230)
思考题与习题	(231)
第九章 时序逻辑电路	(232)
第一节 时序电路的基本组成	(232)
第二节 时序电路的描述方法	(232)
一、状态图	(232)
二、状态表	(233)
三、时间图	(233)
第三节 时序电路的分析	(234)
第四节 时序电路的设计	(238)
一、根据设计要求形成原始状态表	(238)
二、状态化简	(239)
三、状态分配与电路实现	(241)
四、时序电路设计举例	(243)
小结	(245)
思考题与习题	(246)
第十章 时序逻辑电路的应用	(248)
第一节 寄存器	(248)
一、代码寄存器	(248)
二、移位寄存器	(250)
第二节 串行加法器	(253)
第三节 计数器	(254)
一、概述	(254)
二、二进制异步计数器	(255)

三、二进制同步计数器	(257)
四、非二进制计数器	(260)
五、组合计数器	(262)
第四节 寄存器传送逻辑	(263)
一、串行传送方式与并行传送方式	(263)
二、点到点传送模式	(265)
三、总线传送模式	(267)
第五节 寄存器传送语言简介	(269)
小结	(273)
思考题与习题	(273)
第十一章 脉冲信号的产生与整形	(274)
第一节 脉冲信号波形的特性参数	(274)
第二节 单稳态触发器	(275)
一、微分型单稳电路	(275)
二、积分型单稳电路	(276)
第三节 多谐振荡器	(278)
一、环形多谐振荡器	(278)
二、RC 环形振荡器	(279)
三、石英晶体多谐振荡器	(281)
第四节 施密特触发器	(282)
一、电路组成	(282)
二、工作原理	(283)
三、应用举例	(284)
第五节 555 定时器	(285)
一、电路结构	(285)
二、引脚功能	(286)
三、定时器的逻辑功能	(287)
四、555 定时器应用举例	(288)
第六节 单次脉冲产生电路	(290)
一、异步单脉冲发生器	(290)
二、同步单脉冲发生器	(290)
小结	(292)
思考题与习题	(292)
第十二章 数/模和模/数转换	(294)
第一节 D/A 转换器	(294)
一、权电阻 D/A 转换器	(294)
二、倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	(296)
三、D/A 转换器的主要技术指标	(297)
第二节 A/D 转换器	(297)
一、采样—保持电路	(298)
二、量化和编码	(299)

三、A/D 转换器的主要技术指标	(301)
第三节 集成 ADC 和 DAC 芯片介绍	(302)
一、ADC0809 芯片	(302)
二、DAC0832 芯片	(304)
小结	(305)
思考题与习题	(305)
附录一 半导体器件的命名方法	(307)
附录二 线性网络常用定理与定律	(308)
附录三 常用数字集成电路管脚引线图	(312)
主要参考文献	(315)

第一章 半导体器件

半导体器件是电子线路的重要组成部分。各种半导体器件都是以PN结为基础的。因此本章首先介绍半导体和PN结的特性,然后逐一介绍半导体二极管、双极型晶体管和场效应管的结构、工作原理、特性和参数,并分析和讨论由它们组成的几个简单的应用电路。对于半导体器件,重点应掌握它们的外部特性,以便能合理选择和正确使用这些器件。

第一节 半导体的基本知识

一、半导体的导电特性

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。常用的半导体材料是四价元素硅和锗,它们既不像金属原子的外层价电子不被束缚于任何具体的原子核,在外电场作用下表现出良好的导电性;也不像绝缘体中价电子在高温或外电场下仍以键的方式牢固地被束缚在原子间不能移动,表现其良好的绝缘性能。半导体的导电能力具有受外界影响的一些特殊性质:

(1) 半导体的导电能力随温度升高而迅速增强。与金属导体相比,主要有两个区别:第一,半导体电阻率的温度系数是负的,而金属是正的。既当温度升高时,半导体的电阻率会迅速减小,而金属的电阻率却会增大。第二,半导体电阻率随温度的变化很大,而金属的电阻率变化则小得多。例如,纯净的硅,温度每升高 10°C ,电阻率约减小一半,而金属铜,即便温度上升 100°C ,电阻率的增加还不到一半。

(2) 半导体的导电能力随所含的微量杂质而发生十分显著的变化。纯净的硅在室温下的电阻率为 $2.14 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 。如果在硅中掺入一百万分之一的杂质原子(例如磷原子),其电阻率将下降到 $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$,几乎只有原来的一百万分之一。

(3) 半导体的导电能力随光照而发生显著变化。例如,一个沉积在绝缘基板上的硫化镉薄膜,其暗电阻为几十 $\text{M}\Omega$ 。当受光照后,电阻可下降到只有几十 $\text{k}\Omega$,只有原来的几百分之一。实际上,硫化镉薄膜就是一个光敏电阻。

此外,半导体的导电能力还随电场、磁场的作用而改变。

为了说明上述特性,这就需要我们深入到半导体的内部去了解它的特殊结构以及导电原理。

1. 本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体。本征硅(Si)和本征锗(Ge)是制作半导体器件的两种基本材料,它们都是四价元素,有四个价电子。物质的许多物理性质和化学性质是由价电子决定的,为了突出价电子的作用和便于讨论,常把原子核和内层电子看作一个整体,称为惯性核。于是硅原子简化模型如图1.1所示,核内的“+4”表示与4个价电子对应的4个单位的正电荷,整个原子呈中性。这种单原子结构属于不稳定结构,事实上是不存在的。

(1) 晶体的共价键价结构

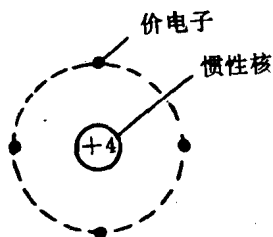


图 1.1 硅和锗简化原子结构模型

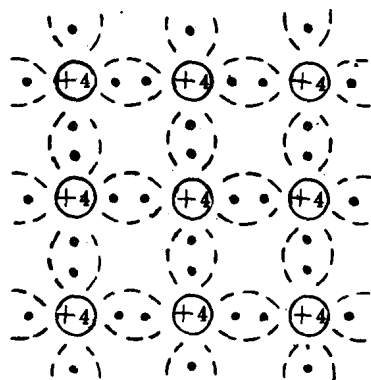


图 1.2 硅和锗晶体共价键结构示意图

晶体由大量原子密集而成,如 Si 原子密度约为 5×10^{22} 个/ cm^3 ,原子之间的距离已小到使价电子不但受自身核的吸引,还受到相邻原子核的吸引,致使电子轨道发生重叠。每个价电子有时绕自身原子核运动,有时出现在相邻原子所属的轨道上,为两个原子所共有,形成共价键结构,如图 1.2 所示。观察此图时我们注意到:每个原子和相邻的 4 个原子互相补足 8 个价电子以形成稳定结构(缺少一个电子的键称为不稳定结构);键中的电子是束缚电子,不是自由电子,如果没有足够的能量是不易脱离公共轨道的。

(2) 两种载流子(空穴和电子)的产生

物质内部运载电荷的粒子称为载流子。物质的导电能力决定于载流子的数目和运动速度。本征半导体在热力学温度零度($0\text{K} \approx -273^\circ\text{C}$)时,如果无光照或电磁场等外界影响,价电子摆脱不了共价键的束缚,不能成为自由电子。这时本征半导体内没有载流子,它相当于绝缘体。

在室温(一般指 25°C)条件下,由于热能转化为电子的动能,其中少数能量较大的束缚电子能够挣脱共价键的束缚而成为自由电子,这种现象称为电子“激发”。由于热能而产生的激发称为热激发。此外,由于光照、辐射、场强等作用都会产生电子的激发现象。

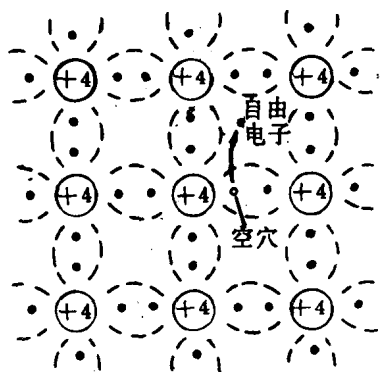


图 1.3 本征激发产生电子空穴对

在价电子变成自由电子的同时,就在原来共价键处留下一个空位,这个空位叫空穴。空穴会被相邻原子的价电子填补,而在这个价电子原先的位置留下了一个新的空穴,如图 1.3 所示。空穴因失去电子而呈现单位正电荷。在电场作用下,一方面自由电子作定向运动形成电子电流;另一方面价电子也按一定方向作填补空穴的运动,即可看成空穴作定向运动形成空穴电流。电子与空穴是两种不同类型的载流子。电子与空穴同时参与导电是半导体最主要的特征之一。

在本征半导体中,价电子受激产生电子-空穴对,自由电子在运动中又会遇到空穴,并与空穴结合而成对消失,这一过程称为“复合”。在一定温度下,电子-空穴对的产生与复合同时进行并维持在动态平衡状态,使电子和空穴两种载流子浓度不变。当温度升

高时,本征激发增强,载流子浓度近似按指数规律迅速增大。硅材料,大约温度每升高 8°C ,本征载流子浓度增加一倍;锗材料,大约温度每升高 12°C ,载流子浓度增加一倍。由此可见,温度是影响半导体性能的一个重要因素。

2. 杂质半导体

本征半导体的载流子浓度低、导电能力差。为了改善导电性能,在本征半导体中掺入微量的杂质元素。掺杂后的半导体称为杂质半导体,分 N 型和 P 型两种。

(1) N 型半导体

在本征半导体中掺入 5 价元素磷(或砷、锑)时,磷原子会在晶格中的某些位置取代硅(锗)原子,如图 1.4 所示。由于杂质原子最外层有 5 个电子,它用 4 个价电子与相邻 4 个硅(锗)原子组成共价键后,还多余一个价电子,它不受共价键的束缚,而只受磷原子的束缚,只要获得较小能量就能成为自由电子。室温下,多余的价电子几乎全部激发为自由电子。

由于磷原子给出了一个多余的电子,故称磷原子为施主杂质。也称 N 型杂质。磷原子给出一个电子后,本身成为正离子,它被束缚在晶格中不能够动,所以它不能参与导电。在掺磷后的半导体中同样也有本征激发产生的电子-空穴对,但数量很少,因此,自由电子数远大于空穴数,故电子是多数载流子,简称多子;空穴是少数载流子,简称少子。这种以电子为多数载流子的杂质半导体称为 N(Negative 的字头,电子带负电)型半导体。

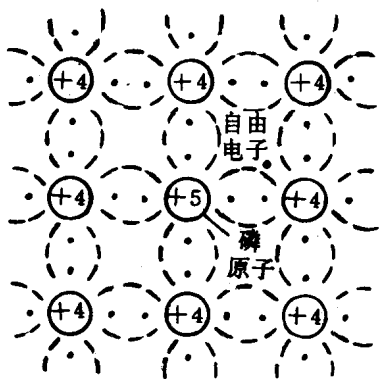


图 1.4 N 型半导体结构

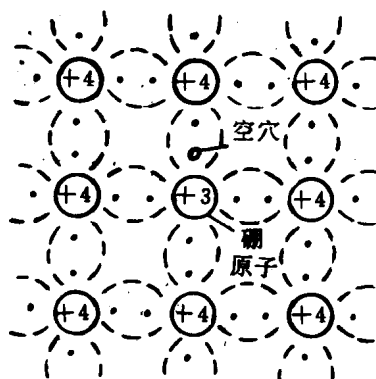


图 1.5 P 型半导体结构

(2) P 型半导体 在本征半导体中掺入 3 价元素硼(或铝、镓、铟等),硼原子会在晶格中的某些位置取代硅(锗)原子,如图 1.5 所示。由于硼原子只有三个价电子,当它和相邻的四个硅(锗)原子组成共价键时,因缺少一个价电子而留下一个空位,其他共价键的电子很容易来填充这个空位,从而产生了一个空穴。室温下,几乎所有空位被填充,产生与硼原子数量相等的空穴。

硼原子能接受一个电子,故称为受主杂质。硼原子接受一个电子后,成为带负电的不能移动的负离子,所以,它也不能参与导电。同样,这种半导体中存在本征激发的电子-空穴对,但电子数远小于空穴数,故空穴是多数载流子,电子是少数载流子。这种以空穴为多数载流子的杂质半导体称为 P(Positive 的字头,空穴带正电)型半导体。

N 型半导体与 P 型半导体虽然各自都有一种多数载流子,但在整个半导体中正、负电荷

数是相等的,保持电中性。

二、PN 结及其单向导电特性

在一块本征半导体上,一边掺入施主杂质,使之成为 N 型半导体,另一边掺入受主杂质,使之成为 P 型半导体,那么在 N 型和 P 型半导体的交界面附近,就会形成具有特殊物理性能的 PN 结。

1. PN 结的形成

由于 P 型半导体中有大量的空穴和很少的电子,而 N 型半导体中有大量的电子和很少的空穴,于是空穴和电子都要从密度大的地方向密度小的地方扩散。在图 1.6 中,靠近界面处的箭头表示了两种载流子的扩散方向。然而,带电粒子的扩散不会无限制地进行下去,因为,带电粒子一旦扩散到对方就会发生复合现象。N 区的电子向 P 区扩散,并与 P 区的空穴复合,使 P 区失去空穴而留下不能移动的带负电的离子;P 区的空穴也要向 N 区扩散,并与 N 区的电子复合,使 N 区失去电子而留下带正电的离子。这些正、负离子所占的空间称作空间电荷区或耗尽层。如图 1.7 所示。空间电荷区中的正、负离子之间形成一个内电场 E_i ,方向是从 N 区指向 P 区。内电场对两边多子的进一步扩散起阻挡作用,因此,空间电荷又称为阻挡层。但内电场可以使两边的少子产生漂移运动。漂移运动方向与扩散运动相反。扩散运动使空间电荷区加宽,内电场增强,于是扩散阻力增大;漂移运动使空间电荷区变窄,内电场减弱,使扩散容易进行。当扩散运动与漂移运动作用相等时,便处于动态平衡状态,空间电荷区不再扩大,这种动态平衡状态下的空间电荷区就是 PN 结。

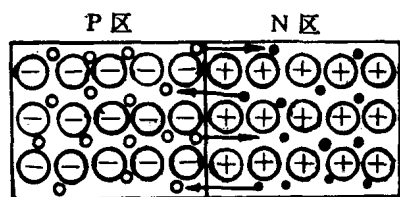


图 1.6 多子的扩散运动

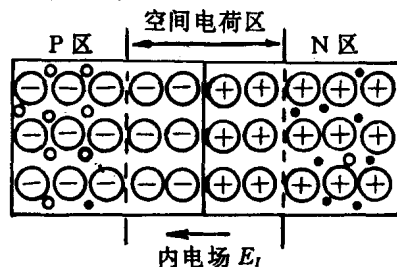


图 1.7 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端外加不同极性的电压,将破坏原来的平衡状态,呈现单向导电特性。

电源的正极接 P 区,负极接 N 区,叫做加“正向电压”或“正向偏置”,如图 1.8 所示。这时外加电场方向与内电场 E_i 方向相反,外电场将 P 区和 N 区的多数载流子推向 PN 结,把结内的正负离子中和一部分,使空间电荷减少,PN 结变窄,内电场减弱,从而破坏了原来的平衡状态,使扩散运动超过漂移运动,通过 PN 结的电流主要是扩散电流,它在外电路形成一个流入 P 区的电流 I_F ,称为正向电流。

电源的正极接 N 区,负极接 P 区,叫做加“反向电压”或“反向偏置”,如图 1.9 所示。反偏时,外加电场 E_R 与内电场的 E_i 方向相同,外电场将 N 区和 P 区的多数载流子拉向电极方向,使正、负离子暴露更多,空间电荷区变宽,内电场增强。这时漂移运动超过扩散运动,通过 PN

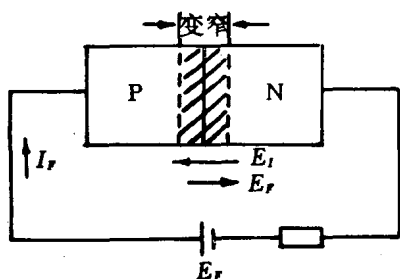


图 1.8 PN 结外加正向电压

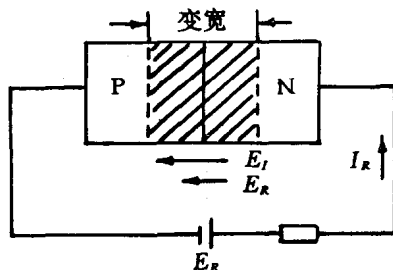


图 1.9 PN 结外加反向电压

结的电流主要是漂移电流,它表现为从外电路流进 N 区的反向电流 I_R 。反向电流是由少数载流子的漂移运动形成的,当温度不变时,少数载流子的浓度不变,反向电流在一定范围内将不随外加电场 E_R 的大小而变化,所以常把反向电流称为反向饱和电流,用 I_R 表示。由于少数载流子浓度很低, I_R 近似为零,可以认为 PN 结反向偏置时截止。

综上所述,PN 结加正向电压时,呈现较小的正向电阻,形成较大的正向电流,PN 结处于导通状态;PN 结加反向电压时,呈现很大的反向电阻,流过很小的反向电流,PN 结近于截止状态,这种只允许一个方向电流通过的特性称为单向导电性。

三、PN 结的伏安特性

理论证明,流过 PN 结的电流 I 与 PN 结两端电压 U 之间的关系为:

$$I = I_R(e^{U/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中 $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量,其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电量。在室温 (300K) 时, $U_T = 26\text{mV}$ 。

把式(1-1)绘成曲线,如图 1.10 所示,称为 PN 结的伏安特性曲线。当 PN 结加正向电压时,在 U 大于 U_T 几倍以后,式(1-1)中 $e^{U/U_T} \gg 1$,于是 $I \approx I_R e^{U/U_T}$ 随 U 指数规律增加,如图中 OA 段,这段曲线称为正向特性。当 PN 结加反向电压时,在 $|U|$ 大于 U_T 几倍后,式(1-1)中的 $e^{U/U_T} \rightarrow 0$,于是 $I \approx I_R$,即反向电流是一个不随外加电压变化而变化的常数,如图中 OB 段,这段曲线称为反向特性。

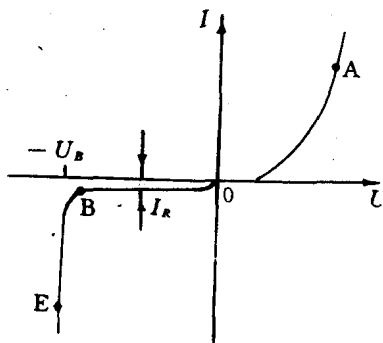


图 1.10 PN 结的伏安特性曲线

四、PN 结的击穿

当加于 PN 结的反向电压增大到一定数值时,反向电流突然急剧增大,如图 1.10 中的 BE 段,这种现象称为 PN 结的反向击穿。对应于电流开始剧增的电压,称为击穿电压 U_B 。PN 结击穿分“雪崩击穿”和“齐纳击穿”两类。

雪崩击穿是指 PN 结内作漂移运动的少数载流子受强电场的加速作用可获得很大的能量,当它与结内原子碰撞时,把其中的价电子碰撞出来,产生新的电子-空穴对。新的电子-空穴

对在强电场作用下,再去碰撞其他原子,产生更多的电子-空穴对,如同雪崩一样。雪崩击穿的本质是碰撞电离,发生在掺杂浓度比较低、外加电压比较大的情况中。

齐纳击穿发生在高浓度掺杂的PN结中。由于杂质浓度高,故形成的PN结很窄,即使外加反向电压并不高(5V以下),结内电场就非常强,它可以把结内的束缚电子从共价键中拉出来引起反向电流的剧增。

发生上述两种击穿,只要反向电流的热效应不致损坏PN结,当反向电压下降到击穿电压以下时,PN结的性能仍可恢复。

五、PN结电容

PN结内电荷量随外加电压的变化而变化,表明PN结具有电容的效应。包括“势垒电容”和“扩散电容”。

势垒电容 C_T 是由空间电荷区的变化引起的。当外加电压变化时,引起空间电荷区中离子电荷量的变化,类似于平板电容器充放电的情况。

扩散电容 C_D 是由P区和N区的多子在扩散过程中在结附近产生的电荷积累引起的,扩散电容的大小与流过PN结的电流成正比。

第二节 晶体二极管

一、二极管的构造和分类

二极管是由一个PN结加上接触电极、引线和管壳而构成,按其结构的不同,可分为以下几类:

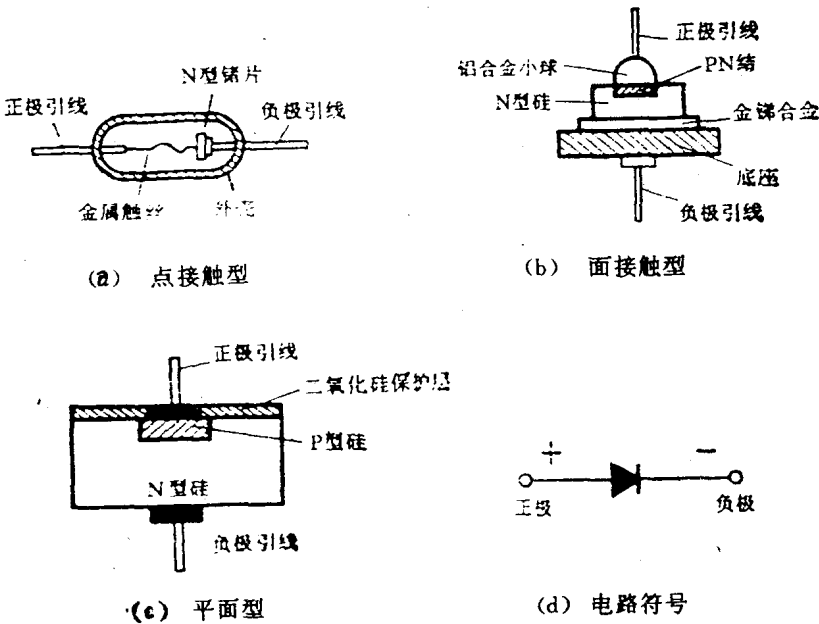


图 1.11 晶体二极管的结构及电路符号

1. 点接触型

结构如图 1.11(a)所示,它是用一根细金属丝压在晶片上,在接触点形成 PN 结。由于它的结面积小,因而不能通过较大的电流,但结电容小,适用于高频检波及小电流高速开关电路中。

2. 面接触型

结构如图 1.11(b),它用合金法做成较大接触面积,故允许通过较大电流,但结电容大,只适用于低频及整流电路中。

3. 平面型

结构如图 1.11(c)所示,它用二氧化硅作保护层,使 PN 结不受污染,从而大大地减小了 PN 结两端的漏电流,因此,它的质量较好,批量生产中产品性能比较一致。其中结面积大的作大功率整流管,结面积小的作高频管或高速开关管。

二、二极管的伏安特性

二极管特性实际上是 PN 结特性,考虑到引线电阻以及表面漏电流等因素的影响,实测的二极管伏安特性与 PN 结特性有一定偏差。图 1.12 是实际二极管的伏安特性曲线,从中可得出如下规律:

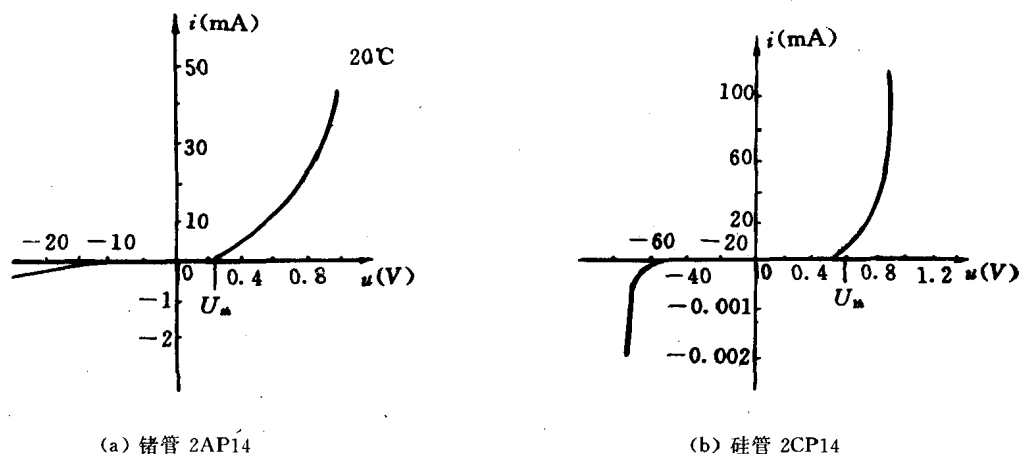


图 1.12 典型二极管的伏安特性曲线

(1) 正向电压必须超过门限电压,电流才有明显增长,锗管的门限电压 $U_{th} \approx 0.2V$,硅管的 $U_{th} \approx 0.6V$ 。

(2) 正向电压超过门限电压 U_{th} 后,二极管电流按指数曲线规律增大,当正向电流较大时,电流趋于直线变化,这期间对应的正向导通电压变化范围很小,为了简化计算,常认为硅管的导通电压为 $0.7V$,锗管的导通电压为 $0.2V$ 。

(3) 反向电流只有很小的漏电流,称为反向饱和电流,常温下,锗管约为几十微安,硅管则小于 1 微安。当反向电压超过某一击穿电压时,反向电流剧增。

(4) 二极管特性曲线与温度有关,温度升高时,正向电流增大,反应在正向特性曲线左移,门限电压下降,一般有 $dU_{th}/dT = -(0.2-0.5)mV/^\circ C$;同时反向电流增大,一般每温升 $10^\circ C$,反向电流增大一倍。