

教学内容改革成果教材

电子技术基础

主编 张先永
副主编 尼喜 王德合

国防科技大学出版社

教学内容改革成果教材

电 子 技 术 基 础

主 编 张先永

副主编 尼 喜 王德合

编写人员(按姓氏笔划排列):

尹 光 王振文 王德合

尼 喜 吕印晓 李军辉

张卫东 张先永 吴家科

国防科技大学出版社

·长沙·

内 容 简 介

为了适应培养面向 21 世纪电子技术人才的需要,本书精选传统的模拟电子技术基础和数字电子技术基础中的常规内容,新增了大量有关新器件、新技术方面的知识,并统一规划为《电子技术基础》和《电子技术应用》两本书。其主要特点是:精选常规内容,加大新技术知识比重,强调实际应用环节。

电子技术基础部分包括:半导体二极管和三极管、基本放大电路、直接耦合放大电路、集成运算放大器、放大电路中的负反馈、正弦波振荡电路、直流电源、数字电路基础、门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路和脉冲波形的产生与整形。

本书可作为高等院校电子类、电气类、自动化类及其他相近专业本、专科生的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础/张先永主编. —长沙:国防科技大学出版社, 2002. 1
ISBN 7-81024-807-3

I. 电… II. 张… III. 电子技术—基础理论 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 092319 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:黄 煌 责任校对:何 晋

新华书店总店北京发行所经销

空军第一航空学院印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:19.5 字数:451 千

2002 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—4000 册

*

定价:26.00 元

前 言

电子技术课程是电类各专业的一门技术基础课,它着重研究各种半导体器件及其各种基本电路的原理及分析方法,具有很强的工程应用特性。随着微电子技术、信息技术、计算机技术的迅猛发展及相互融合,新的器件和电路层出不穷,电路的分析和设计方法正在发生着革命性的变化,原来的模拟电子技术基础和数字电子技术基础的内容已不能满足电子信息时代的要求。本书在近年来电子技术课程教学改革与实践的基础上,经过总结提高,在保证 1995 年教育部“高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求”中规定的基本教学内容的前提下,加大了新技术知识含量,突出了应用技术特色,将传统的模拟电子技术基础和数字电子技术基础的内容体系重新规划为《电子技术基础》和《电子技术应用》两本书。

在这两本书的编写过程中,力图体现“分立元件起步,集成电路落脚”的原则。《电子技术基础》主要以分立元件为主讲解模拟电路与数字电路的基本概念、基本电路原理和基本分析方法,构建电子技术的理论基础;而《电子技术应用》则主要以目前广泛使用的和一些较新的集成电路为主,着重讲解现代电子电路的设计、组成方法及应用集成电路过程中的一些实际问题,试图构建起从理论基础到应用技能的完整知识体系。两本书既互相联系,又独立成书,可考虑作为上下册使用,也可根据需要选用。

《电子技术基础》是按照本科生总学时 100 学时的标准(包含习题课、实验课等环节)来编写的。由于新增教学内容较多,教学学时与内容的矛盾十分突出,缓解有限的教学学时与教学内容膨胀的矛盾是本教材编写过程中的又一着力点。在《电子技术基础》的编写中采用了“外特性为重、内特性从简;电路原理与分析方法为重、电路种类缩减”的方法来压缩篇幅,部分内容以思考题与习题的形式给出,以扩充学生的自学空间。全书本着本、专科适宜,宽编窄用的原则精选内容,对超出专科教学要求或一些较深入的内容以“*”给出标注。

本书由吴家科和李军辉(第 1、2、5 章),尼喜和张卫东(第 3、4 章),吕印晓(第 6、7 章),王德合和尹光(第 8、9、10 章),王振文(第 11、12、13 章)等参与编写。张先永担任主编,负责该部分的组织与定稿;尼喜和王德合为副主编,协助主编工作。此外,马宁负责校对全书的原稿,贾承军负责绘制全书的插图。

在本书编写过程中,周德泉教授担任全书的主审工作。华中科技大学曹汉房教授、解放军信息工程大学王志刚教授和天津大学腾建辅教授等给予了热情的指导并提出了宝贵的建议。上海 Lattice 公司陈恒先生提供了详实的资料和热情的帮助,编者在此表示衷心的感谢。

编 者

2001 年 10 月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管

1.1 半导体二极管	(1)
1.1.1 半导体与 PN 结	(1)
1.1.2 半导体二极管	(5)
1.1.3 半导体二极管的参数	(7)
1.2 半导体三极管	(7)
1.2.1 半导体三极管的结构及电路符号	(7)
1.2.2 半导体三极管极间电流关系与共发射极特性曲线	(8)
1.2.3 半导体三极管的参数	(12)
习 题	(14)

第二章 基本放大电路

2.1 共射放大电路	(18)
2.1.1 放大的概念	(18)
2.1.2 共射放大电路	(18)
2.1.3 共射放大电路的工作原理	(19)
2.1.4 放大电路的主要技术指标	(22)
2.2 放大电路的基本分析方法	(23)
2.2.1 图解法	(23)
2.2.2 微变等效电路分析法	(27)
2.3 放大电路的工作点稳定问题	(31)
2.3.1 温度对放大电路工作点的影响	(31)
2.3.2 分压式工作点稳定电路	(32)
2.4 放大电路的另两种基本组态	(34)
2.4.1 共集电极放大电路	(34)
2.4.2 共基极放大电路	(36)
2.4.3 三种放大电路的比较	(37)
2.5 场效应管及其放大电路	(38)
2.5.1 场效应管 (JFET 管) 的结构与工作原理	(38)
2.5.2 场效应管的伏安特性及主要参数	(40)
2.5.3 场效应管放大电路	(45)

2.6 多级放大电路	(51)
2.6.1 多级放大电路的耦合方式	(51)
2.6.2 多级放大电路的分析	(52)
2.7 放大电路的频率特性	(55)
2.7.1 频率特性的基本概念	(55)
2.7.2 单级放大电路的频率特性	(56)
2.7.3 多级放大电路的频率特性	(62)
习 题	(63)

第三章 直接耦合放大电路

3.1 直接耦合放大电路的特殊问题	(74)
3.1.1 直流电平的配合	(74)
3.1.2 零点漂移	(74)
3.2 差动放大电路	(75)
3.2.1 基本差动放大电路	(75)
3.2.2 典型差动放大电路	(76)
3.2.3 带射极恒流源的差动放大电路	(78)
3.3 直接耦合功率放大电路	(79)
3.3.1 功率放大电路的特点及主要指标	(79)
3.3.2 OTL 功率放大电路	(80)
3.3.3 OCL 功率放大电路	(82)
习 题	(82)

第四章 集成运算放大器

4.1 集成运算放大器技术参数介绍	(85)
4.1.1 电路的简单说明	(85)
4.1.2 集成运放的主要技术参数	(86)
4.2 理想集成运算放大器	(87)
4.2.1 理想运放的技术指标	(87)
4.2.2 理想集成运放工作在线性区的特点	(87)
4.2.3 理想集成运放工作在非线性区的特点	(88)
4.3 集成运算放大器组成的运算电路	(89)
4.3.1 比例运算电路	(89)
4.3.2 加法和减法运算电路	(92)
4.3.3 积分和微分电路	(94)
4.3.4 对数和指数运算电路	(96)
4.3.5 乘法和除法运算电路	(97)
习 题	(100)

第五章 放大电路中的负反馈

5.1 反馈的基本概念与分类	(104)
5.1.1 反馈的基本概念	(104)
5.1.2 反馈的四种组态	(105)
5.2 负反馈对放大电路性能的影响	(111)
5.2.1 提高了放大倍数的稳定性	(111)
5.2.2 减小非线性失真和噪声与干扰	(112)
5.2.3 展宽频带	(112)
5.2.4 改变输入电阻和输出电阻	(114)
5.3 负反馈放大电路的分析方法	(117)
5.3.1 深度负反馈放大电路的分析计算	(117)
5.3.2 方框图分析法(拆环法)	(121)
5.4 负反馈放大电路的自激及防止	(124)
5.4.1 自激的概念及条件	(124)
5.4.2 常用的校正技术(频率补偿方法)	(127)
习 题	(129)

第六章 正弦波振荡电路

6.1 正弦波振荡电路的振荡条件及分析方法	(139)
6.1.1 产生正弦波振荡的条件	(139)
6.1.2 正弦波振荡电路的组成和分析方法	(140)
6.2 RC 正弦波振荡电路	(140)
6.2.1 RC 串并网络的选频特性	(140)
6.2.2 振荡频率与起振条件	(142)
6.2.3 振荡电路中的负反馈	(142)
6.3 LC 正弦波振荡电路	(143)
6.3.1 LC 并联电路的基本特性	(144)
6.3.2 变压器反馈式振荡电路	(144)
6.3.3 电感三点式振荡电路	(145)
6.3.4 电容三点式振荡电路	(146)
6.4 石英晶体正弦波振荡电路	(148)
6.4.1 石英晶体的基本知识	(148)
6.4.2 石英晶体振荡电路	(149)
习 题	(150)

第七章 直流电源

7.1 直流电源的组成	(153)
-------------------	-------

7.2 单相桥式整流与 RC 滤波电路	(154)
7.2.1 整流电路的技术指标	(154)
7.2.2 单相半波整流电路	(154)
7.2.3 单相桥式整流电路	(156)
7.2.4 RC 滤波电路	(157)
7.3 稳压管及其稳压电路	(160)
7.3.1 硅稳压管的伏安特性	(160)
7.3.2 硅稳压管稳压电路	(160)
7.3.3 稳压电路的技术参数	(161)
7.4 串联型直流稳压电路	(162)
7.4.1 电路组成和工作原理	(162)
7.4.2 稳压电路的改进及保护措施	(163)
7.5 开关型稳压电路	(164)
7.5.1 开关型稳压电路的特点及分类	(164)
7.5.2 开关型稳压电路的组成和工作原理	(164)
* 7.6 可控整流电路	(165)
7.6.1 晶闸管的基本特性	(166)
7.6.2 单相桥式可控整流电路	(167)
7.6.3 单结管触发电路	(168)
习 题	(170)

第八章 数字电路基础

8.1 数制	(174)
8.1.1 十进制数 (Decimal)	(174)
8.1.2 二进制数 (Binary)	(174)
8.1.3 十六进制数 (Hexadecimal)	(175)
8.2 逻辑代数基础	(175)
8.2.1 逻辑代数的三种基本运算	(176)
8.2.2 逻辑代数的基本公式和常用公式	(178)
8.2.3 逻辑代数的基本规则	(179)
8.3 逻辑函数的表示方法	(180)
8.4 逻辑函数的化简	(181)
8.4.1 最简的概念	(181)
8.4.2 公式化简法	(181)
8.4.3 图形化简法	(183)
8.4.4 最简与或式转换为其他最简式	(186)
8.4.5 具有约束项的逻辑函数的化简	(187)
习 题	(188)

第九章 门电路

9.1 分立元件门电路	(190)
9.1.1 二极管和三极管的开关特性	(190)
9.1.2 分立元件门电路	(191)
9.2 TTL 集成门电路	(193)
9.2.1 TTL 与非门	(193)
9.2.2 其他 TTL 门介绍	(197)
9.3 CMOS 门电路介绍	(199)
9.3.1 CMOS 反相器	(199)
9.3.2 CMOS 与非门及或非门	(200)
习 题	(201)

第十章 组合逻辑电路

10.1 组合逻辑电路的分析	(204)
10.1.1 组合逻辑电路的特点及表示	(204)
10.1.2 组合逻辑电路的分析	(204)
10.2 组合逻辑电路的设计	(207)
10.2.1 组合逻辑电路的设计方法	(207)
10.2.2 组合逻辑电路的设计举例	(208)
10.3 几种常用组合电路器件介绍	(216)
10.3.1 数据选择器	(216)
10.3.2 数码比较器	(217)
10.3.3 多路分配器	(219)
10.4 组合逻辑电路中的竞争与冒险	(220)
10.4.1 竞争、冒险产生的原因	(220)
10.4.2 逻辑冒险及其消除方法	(221)
10.4.3 功能冒险及其抑制措施	(222)
习 题	(222)

第十一章 触发器

11.1 基本 RS 触发器	(225)
11.1.1 用与非门构成的基本 RS 触发器	(225)
11.1.2 集成基本 RS 触发器	(226)
11.2 同步 RS 触发器	(227)
11.2.1 电路组成和逻辑符号	(227)
11.2.2 工作原理	(228)
11.3 常用集成触发器介绍	(230)

11.3.1 JK 触发器	(230)
11.3.2 D 触发器	(232)
11.3.3 T 触发器和 T' 触发器	(234)
11.4 触发器逻辑功能的转换	(236)
11.4.1 将 D 触发器转换为其他逻辑功能的触发器	(236)
11.4.2 将 JK 触发器转换为其他逻辑功能的触发器	(237)
习 题	(237)
第十二章 时序逻辑电路	
12.1 时序逻辑电路的特点及功能描述方法	(241)
12.1.1 时序逻辑电路的特点	(241)
12.1.2 时序电路逻辑功能表示方法	(241)
12.2 时序逻辑电路的分析	(242)
12.2.1 分析时序逻辑电路的一般步骤	(242)
12.2.2 寄存器的分析	(242)
12.2.3 计数器的分析	(246)
12.3 时序逻辑电路的设计	(255)
12.3.1 时序逻辑电路设计的几种方法	(255)
12.3.2 时序逻辑电路设计的一般步骤	(255)
12.3.3 用 SSI 实现时序逻辑电路设计的几个实例	(256)
12.3.4 用 MSI 实现时序逻辑电路	(261)
12.4 存储器	(272)
12.4.1 读写存储器 RAM	(272)
12.4.2 只读存储器 ROM	(278)
习 题	(283)
第十三章 脉冲波形的产生与整形	
13.1 集成电路 555 定时器	(288)
13.1.1 电路结构及功能	(288)
13.1.2 应用电路实例	(289)
13.2 其他电路	(294)
13.2.1 CMOS 集成单稳态触发器	(294)
13.2.2 TTL 集成施密特触发门电路	(296)
13.2.3 RC 环形多谐振荡器	(296)
习 题	(298)
参考文献	(300)

第一章 半导体二极管和三极管

【内容提要】

半导体器件是组成各种电子线路的基础。本章首先简要介绍半导体的基本知识及构成各种半导体器件的 PN 结,然后说明半导体二极管和三极管的结构、工作原理、特性曲线及各种参数。本章重点是二极管和三极管的外特性,这是正确使用和设计电子线路的必要条件。

1.1 半导体二极管

1.1.1 半导体与 PN 结

1. 半导体

物质按导电能力的大小可分为导体、半导体、绝缘体三类。铜、铝等金属的导电性能很好,它们都是导体,电阻率在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下。橡胶、塑料等物质导电性能很差,它们都是绝缘体,电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。而半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,电阻率在 $10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。目前制造半导体器件的主要材料是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

(1) 本征半导体

硅(Si)、锗(Ge)是四价元素,在原子外层轨道上有四个价电子。硅、锗的晶体中原子在空间排列成有规则的晶格。它们都是通过由价电子组成的共价键牢固地联系在一起。其结构示意图如图 1.1 所示。由硅或锗元素组成的纯净半导体称为本征半导体。整块晶体内部晶格排列完全一致的晶体称为单晶,是制造晶体管和集成电路的基本材料。

在绝对温度 $T=0\text{K}$ (开尔文)和没有外界影响的条件下,半导体内的价电子全部束缚在共价键中,不存在能自由运动的电子。当半导体的温度升高或受光线照射等外界因素影响时,某些共价键中的价电子获得能量,挣脱共价键的束缚,离开原子成为自由电子;同时,在共价键中留下相同数量的空位,如图 1.2 所示。这种现象称为本征激发。

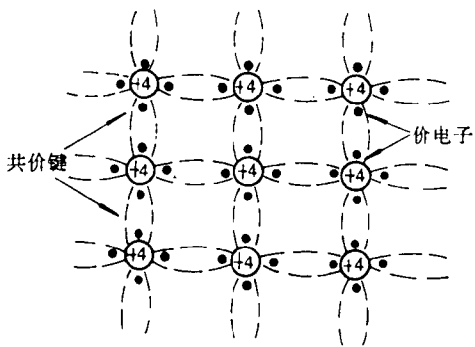


图 1.1 硅和锗晶体中的共价键结构示意图

在共价键中出现空位时,邻近共价键中的价电子势必跳过去填补这个空位,从而使这个空位发生迁移。这个过程持续下去,就相当于一个空位在晶体中移动。由于带负电荷的价电子依此填补空位的作用与带正电荷的粒子作反方向移动的效果相同,因此空位是一种带正电荷的粒子,称为空穴。由此可见,半导体是依靠自由电子和空穴两种载流子导电的物质。本征激发产生的两种载流子总是成对出现的。

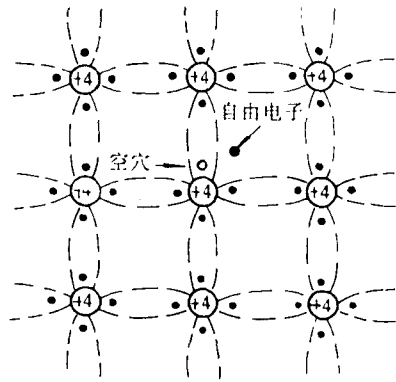


图 1.2 本征激发

自由电子在半导体内部作无规则运动时,自由电子若与空穴相遇,则它们将同时消失,这一过程称为复合。在温度一定的条件下,半导体中载流子浓度(即单位体积中的载流子数)将在某一热平衡值上达到产生和复合的动态平衡。而当温度升高时,本征激发开始产生的载流子增多,但随着载流子数的增多,复合载流子数也增多,最后在较大的热平衡载流子浓度上达到新的平衡。利用这个特征,半导体可以制成热敏器件。

此外,光照会影响载流子的浓度。光照增加时,载流子的浓度增大,导电能力增强。利用这种特征,半导体可以制成光敏器件。

(2) 杂质半导体

在实际应用中,制造半导体器件用的是人为地掺入一定杂质的杂质半导体。由于掺入的杂质不同,杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

① N 型半导体

在本征半导体中掺入五价元素杂质(砷、锑或磷),可使晶体中自由电子浓度大大增加,将这种杂质半导体称为 N 型半导体或电子型半导体。

显然,将五价元素掺入硅或锗中时,只有四个价电子能构成共价键结构,余下的一个不受共价键的约束而成为自由电子,如图 1.3 所示。由于释放的自由电子不是共价键的价电子,不会产生空穴,这是与本征激发所不同的地方。而释放了一个价电子的杂质正离子被束缚在晶格中,它不能像空穴那样起导电作用。同时,由于晶体中正、负电荷数量相等,所以 N 型半导体是电中性的。

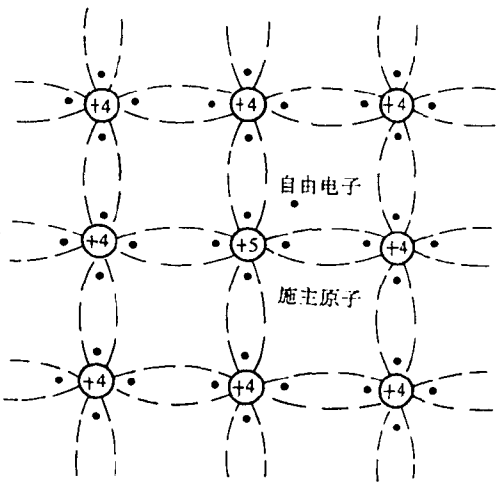


图 1.3 N 型半导体示意图

显然,掺入的五价元素越多,增加的自由电子也就越多。一般情况下,只要掺入极少量的五价元素(例如,硅中掺杂浓度为 $10^{15}/\text{cm}^3$, 约为硅原子密度的五千万分之一),则所增加的自由电子浓度就远大于室温下

本征激发所产生的自由电子浓度。而掺杂是可以精确控制的,即杂质半导体的导电性能是可以控制的。

在 N 型半导体中,自由电子的浓度很大,本征激发产生的空穴与之相遇而复合的机会增多,所以,N 型半导体中的空穴浓度反而比本征半导体中的空穴浓度小。因此,把 N 型半导体中的自由电子称为多数载流子,简称多子;空穴称为少数载流子,简称少子。

杂质半导体中的多子浓度主要取决于掺入的杂质浓度,其值与温度基本无关;而少子浓度与温度密切相关。由于少子浓度的这个特性,使半导体器件的温度特性较差。

② P 型半导体

在本征半导体中掺入三价元素杂质(铟、钾、硼或铝),可使晶体中空穴浓度大大增加,将这种杂质半导体称为 P 型半导体或空穴型半导体。P 型半导体中共价键结构如图 1.4 所示。

在 P 型半导体中,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。

在制造 PN 结时,一种基本方法就是在一种杂质半导体中掺入相反性质的杂质原子来改变杂质半导体的导电类型(称为杂质补偿)。

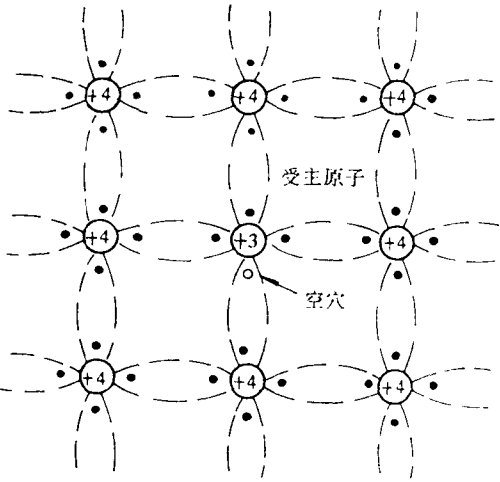


图 1.4 P 型半导体示意图

(3) 杂质半导体中的电流

常温下,无外加电场时半导体中的自由电子和空穴均处于杂乱无章的运动状态,运动方向不断改变,因此,从平均意义上来说,不会产生电流。

① 漂移电流

当有外加电场作用时,载流子将在外加电场作用下产生定向运动,这种运动称为漂移运动。由漂移运动产生的电流称为漂移电流。半导体中的总的漂移电流为自由电子和空穴电流之和,如图 1.5 所示。漂移电流的大小与温度、载流子性质、半导体材料和掺杂浓度等因素有关。

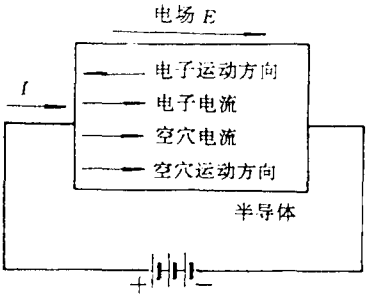


图 1.5 电场作用下的漂移电流

② 扩散电流

在现实环境条件下,由于外界条件的变化(如温度、光照等),半导体中的载流子浓度分布不均匀,则造成载流子从浓度高的位置向浓度低的方向运动。这种因浓度差引起的载流子运动,称为扩散运动。相应产生的电流称为扩散电流。如图 1.6 所示。

扩散运动是半导体中一种特有的现象,相应的扩散电流是区别于导体的一种特有的电流。

2. PN 结

PN 结是由 P 型半导体和 N 型半导体相结合时在结合面处形成的一个特殊导电结构。两种杂质半导体的结合必须保持接触面晶体结构的连续性。

(1) PN 结形成的物理过程

当把 P 型和 N 型半导体材料结合在一起时,由于 P 区和 N 区的空穴和电子浓度不同,必然形成电子从 N 区向 P 区和空穴从 P 区向 N 区的扩散运动,形成扩散电流。同时由于 P 区空穴和 N 区电子的流失,在界面处形成一个只有不动的离子而没有空穴和电子的薄层:N 区是带正电的离子,P 区是带负电的离子,这个区域称为耗尽层或空间电荷区,如图 1.7 所示。

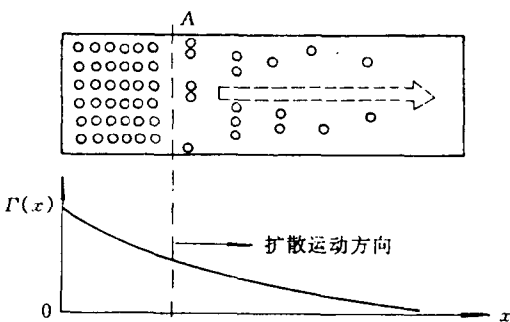


图 1.6 扩散电流的形成示意图

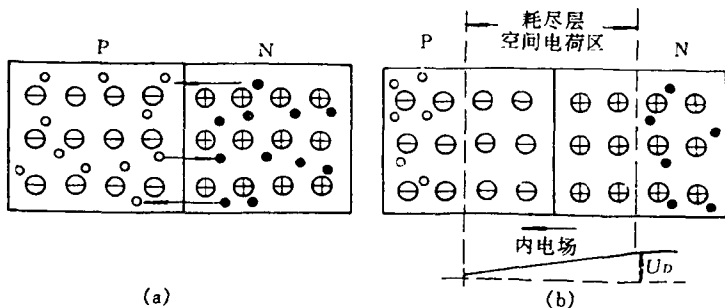


图 1.7 空间电荷区示意图

在空间电荷区存在自 N 区至 P 区的电场,称为内电场。内电场使少子产生漂移运动,形成漂移电流,其方向和扩散电流相反。当扩散电流和漂移电流相等时,达到动态平衡,得到稳定的内电场,即形成稳定的 PN 结。PN 结一般只有几个微米的宽度。

根据 P 型和 N 型半导体的掺杂浓度是否相同,PN 结分为对称结和不对称结两种。P 区和 N 区的掺杂浓度相等的 PN 结称为对称结;反之称为不对称结。其中,P 区掺杂浓度大于 N 区的称为 P^+N 结;N 区掺杂浓度大于 P 区的称为 PN^+ 结。实际的 PN 结都是不对称的。

(2) PN 结的单向导电性

PN 结由于有内电场,当外加不同方向的电压时会产生不同的导电特性。

① 正向特性

当外加正向电压(简称正偏),即电源正端接 P 型半导体,负端接 N 型半导体,如图 1.8 所示。外加电压的电场与内电场方向相反,PN 结内电场减小,破坏了扩散运动与漂移运动的平衡,漂移电流减小,扩散电流增大,形成 PN 结的正向电流。PN 结的正向电流是 N 区电子和 P 区空穴形成的,它们都是多子,因而正向电流随电压的增大而迅速增大。

② 反向特性

当外加反向电压(简称反偏),即电源正端接 N 型半导体,负端接 P 型半导体时,外加电压的电场方向与内电场方向相同,PN 结内电场增强,扩散电流减小而漂移电流增大,形成 PN 结的反向电流。反向电流是少子形成的,然而少子的浓度很低,所以反向电流非常小,而且温度一定时基本上不随反偏电压变化。

由上述分析可知,PN 结正偏时电路中有较大电流,PN 结导通;PN 结反偏时电路中电流很小,PN 结截止。可见 PN 结具有单向导电性。

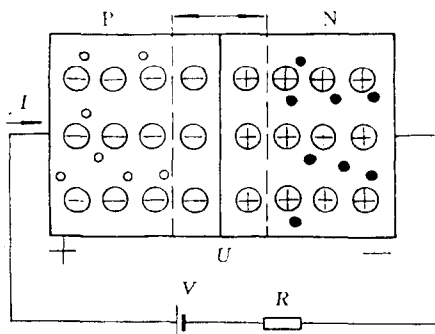


图 1.8 PN 结正偏示意图

1.1.2 半导体二极管

1. 半导体二极管的结构

半导体二极管由 PN 结加上引线 and 管壳构成。按结构不同可分为面接触型和点接触型二极管;按材料可分为硅和锗二极管。其外形与符号如图 1.9 所示。

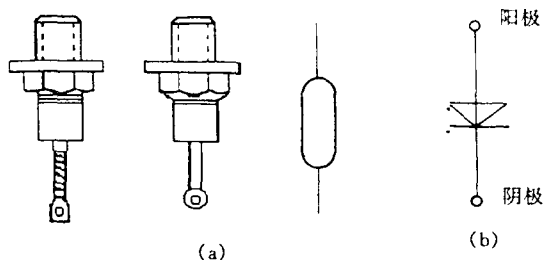


图 1.9 半导体二极管的外形及符号
(a) 外形图 (b) 符号

面接触型二极管特点是 PN 结面积大,允许流过较大的电流。但因面积大,其结电容较大,只能在较低频率下工作,常用于较小功率的整流电路。

点接触型二极管特点是 PN 结面积小,工作电流小,结电容小,可以在高频下工作,常用于高频检波、混频及小功率整流电路。

此外,还有一种开关型二极管,适用于在脉冲数字电路中做开关用。

2. 半导体二极管的伏安特性

二极管的性能可以用它的伏安特性来描述。在二极管的两端加上一个电压 U ,然后测出流过二极管的电流 I ,电流 I 与电压 U 之间的关系曲线 $I = f(U)$ 即是二极管的伏安特性。图 1.10 中分别是典型的硅、锗二极管的伏安特性。

观察二极管的伏安特性,可以把它分为以下三个部分来说明:

(1) 正向特性

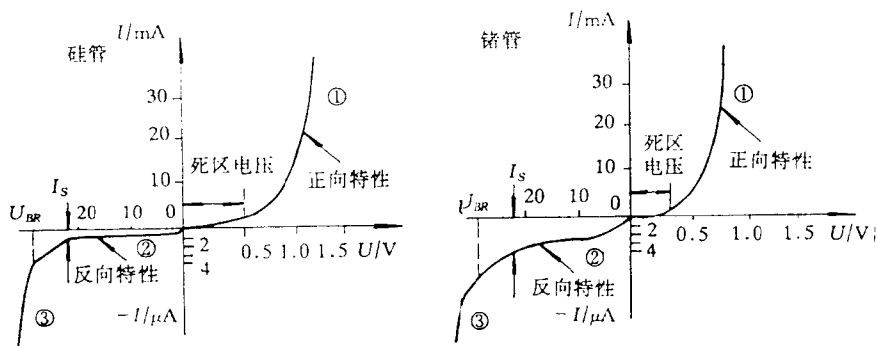


图 1.10 二极管的伏安特性

对应用于图 1.10 的第①段。此时加在二极管上的正向电压只有零点几伏,但相对来说流过二极管的电流却很大,因此,管子呈现的正向电阻很小。我们说,二极管处于正向导通状态,正向电流与电压的关系基本上是一条指数曲线。

再仔细观察发现,当加在二极管上的正向电压很小时,正向电流很小,几乎等于零。只有当加在二极管两端的正向电压超过某一数值时,正向电流才明显增加。正向特性上的这一电压数值通常称为“死区电压”,用 U_T 来表示。比较两曲线可见,死区电压的大小与二极管的材料、温度等有关。硅二极管的死区电压约为 0.5V 左右,锗二极管的死区电压约为 0.1V 左右。

(2) 反向特性

二极管的反向特性对应于图 1.10 中的②段。此时,二极管的反向电流很小。而且当反向电压超过零点几伏后,反向电流不随反向电压增大,即达到了“饱和”,这个电流称为反向饱和电流,用 I_S 表示。我们说二极管此时处于截止状态。由于反向饱和电流是少数载流子形成的,因此与温度关系较大。研究表明,温度每上升大约 10°C ,二极管的反向饱和电流 I_S 约增加一倍,即

$$I_S(T) = I_S(T_0) \times 2^{(T-T_0)/10}$$

式中, $I_S(T_0)$ 为温度 T_0 时的反向饱和电流, $I_S(T)$ 为温度变化为 T 时的反向饱和电流。

(3) 反向击穿特性

当反向电压继续增加到某一电压时,反向电流剧增,称为反向击穿。此时,二极管两端的反向电压几乎不变,该电压称为反向击穿电压,用 U_{BR} 表示,对应于图 1.10 中的③段。其原因是由于外加电场太强,破坏了 PN 结的结构,使它失去了单向导电性。反向击穿时,若对流过 PN 结的电流大小加以限制,利用击穿时二极管两端的反向电压几乎不变的特性可制成稳压二极管(参见 7.3 节)。

* 3. 二极管的电流方程

根据半导体理论研究的结果,二极管的电流可用下面的方程表示

$$I = I_S(e^{qU/KT} - 1) = I_S(e^{U/U_T} - 1)$$

式中, U 为 PN 结两端的电压,参考方向为 P 区指向 N 区; I_S 为 PN 结的反向饱和电流;

$U_T = KT/q$ 为温度电压当量, $T = 300\text{K}$ 时, $U_T \approx 26\text{mV}$; I 为流过 PN 结的电流, 参考方向为 P 区指向 N 区。该方程和 PN 结伏安特性曲线都表示 PN 结的单向导电性。

1.1.3 半导体二极管的参数

半导体器件的参数是对其特性和极限运用条件的定量描述, 是设计电路时选择器件的依据, 使用时可查阅手册。半导体二极管的主要参数有:

- (1) 最大整流电流 I_F 指二极管长期使用时允许流过的最大正向平均电流。
- (2) 最大反向工作电压 U_R 指二极管使用时允许承受的最大反向电压。一般定义为击穿电压的一半。
- (3) 反向饱和电流 I_S 指二极管未击穿时的反向电流, 其值愈小, 二极管单向导电性愈好。环境温度对 I_S 影响较大, 使用时应充分注意, 尤其是锗二极管。
- (4) 最高工作频率 f_M 主要由二极管的 PN 结电容的大小决定。使用中若频率超过 f_M , 二极管单向导电性变差, 甚至无法使用。

· (5) 二极管的电容效应

加在二极管两端的电压变化时, PN 结中的存储电荷发生变化, 因此 PN 结还具有电容效应。一般包括以下两部分:

① 结电容(势垒电容) C_j

它是 PN 结空间电荷区在外加电压作用下正、负离子电荷发生变化形成的。结电容 C_j 在加正向电压时较小, 而加反向电压时较大。

② 扩散电容 C_d

扩散电容是由 P 区和 N 区的多数载流子形成的。多数载流子由 PN 结边界处向 P 区、N 区两端扩散时, 载流子是逐渐复合消失的。这部分逐渐复合的载流子在 P 区和 N 区的存储就形成扩散电容。在二极管两端加正向电压时, 因电流较大, 这部分存储电荷也较大, 故 C_d 也大。

总之, 二极管的电容效应与加在它两端的电压有关。利用这个特性, 可制成变容二极管。集成电路中也利用它来制造小的补偿电容。

1.2 半导体三极管

1.2.1 半导体三极管的结构及电路符号

半导体三极管管芯由两个靠得很近、背靠背的 PN 结组成。根据排列方式不同, 半导体三极管可分为 PNP 型和 NPN 型两种类型, 如图 1.11 所示。图中同时画出了它们的电路符号。