

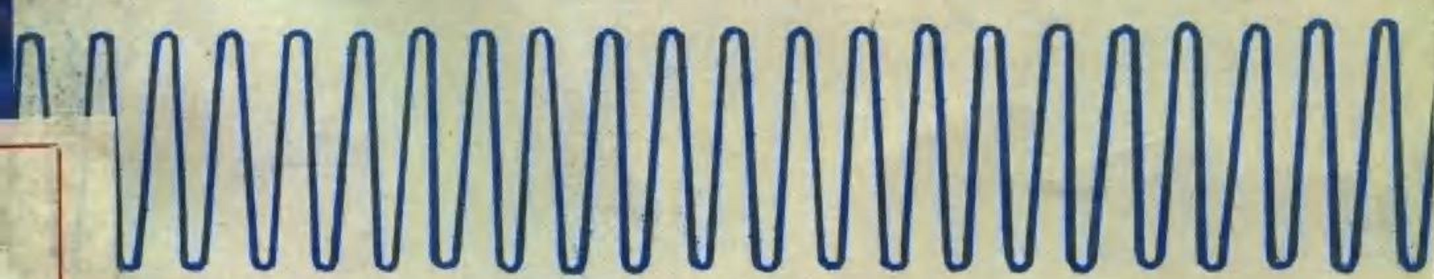
Ji suanji dianzixue

计算机电子学

(基 础)

上 册

于崇标 杨松龄 陈继纯 编



陕西科学技术出版社

内 容 简 介

本书是西北电讯工程学院计算机系电子学基础课程的教材。计算机电子学基础上册的内容有：半导体器件特性，数制与编码，逻辑代数和逻辑门，组合逻辑电路，时序逻辑电路等五章。下册的内容有：放大电路基础，负反馈放大电路，集成运算放大器及其应用，直流稳压电源，A/D及D/A变换等五章。书中每章均有要求和小结，并附有一定的例题和习题。

本书可作为大专院校计算机专业，计算机函授大学，计算机培训班和其他相近专业开设电子学基础课程的教材。本书也可供有一定电工知识的工程技术人员作为学习电子学基础的参考用书。

计算机电子学基础

陕西科学技术出版社出版

(西安北大路131号)

陕西省新华书店发行 二炮技术学院印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 19印张 480千字

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数：1—4000

统一书号：13202.98 定价：3.80元

序 言

本书是西北电讯工程学院计算系电子学基础课程的教材。

近年来,由于计算机技术的迅猛发展,它在生产、科研领域中的广泛应用,正在深刻地影响着社会生产和生活的各个方面。电子计算机是信息处理工具。它不但是实现经济振兴及国防与科学技术现代化不可缺少的设备,而且是促进社会文明的有力工具。学习与掌握计算机知识已成为事业发展的需要、时代的需要。为适应计算机技术在我国迅速推广应用,作为计算机专业的技术基础课电子学的教材,在内容选取及顺序编排上都应当加以调整、充实并兼顾软、硬件专业的需要。

编者经过多年来的教学实践,感到目前国内出版的电子技术教材,对计算机专业内容偏多,篇幅过大。为满足教学急需,我们编写了本书,并以《计算机电子学基础》为名分上、下两册出版。

在编写过程中,我们力图把内容的重点放在培养分析问题和解决问题的能力上。注意讲清基本原理、基本概念,通过例题、习题,使学生逐步掌握分析电子电路的基本方法。为了便于自学,对书中各个问题的阐述力求深入浅出,通俗易懂。

本书在内容顺序的编排上,是“先数字后模拟”,因为数字技术学生比较容易掌握。计算机软件专业对本教材的模拟部分可选讲或删掉,这样计算机软、硬件专业均可使用本教材。

在处理不断增长的新技术和有限篇幅之间矛盾时,我们采取的措施是:对于常用半导体器件突出其外特性的讨论,适当删减了分立元件组成的单元电路,而有关线性集成电路和数字集成电路及其应用部分,则相应加强了。数字集成电路部分是以小规模和中规模集成电路为主来组织内容的。书中每章均有基本要求和小结,并附有思考题、习题。与本书配套使用的《电子学基础实验指导书》同时出版。

参加本书编写的有于崇标(负责执笔写第十章),杨松龄(负责执笔写第一、六、七、八、九章),陈继纯(负责执笔写第二、三、四、五章)。

本书承蒙西北电讯工程学院计算机系主任、副教授王厚生,西安交通大学计算机系主任、副教授胡正家审稿,此外《陕西电子》编辑部主任张忠智同志和编辑董根兰同志对本书的出版做了大量工作。在此一并致以衷心的感谢。

由于我们的水平有限、加之时间仓促,又缺乏一定的教学实践,因此书中必然存在许多缺点和错误,恳切希望使用本书的师生及其它读者给予批评和指正。

编者 1986年2月

本书常用符号表

A	放大倍数通用符号
i, v	电流电压瞬时值
I, V	直流电流电压值, 正弦电流电压有效值
$\dot{I}, \dot{V}$	正弦电流电压复数值
I_m, V_m	正弦电流电压振幅值
I_{max}, V_{max}	电流电压最大值
I_{min}, V_{min}	电流电压最小值
I_Q, V_Q	电流电压静态值
E	直流电源电压
i_B	基极电流瞬时总值
i_b	基极电流交流分量瞬时值
I_B	基极直流电流
I_{BQ}	基极静态电流
I_b	基极正弦电流有效值
V_i	正弦输入电压有效值
V_o	正弦输出电压有效值
p	瞬时功率
P	功率通用符号
P_o	输出交变功率
A_i	电流放大倍数的通用符号
A_v	电压放大倍数的通用符号 $= V_o / V_i$
A_{vf}	有反馈时的电压放大倍数
A_{vh}	高频电压放大倍数
A_{vl}	低频电压放大器倍数
$A_{ms}, A_{ms'}$	中频电压放大倍数
A_{vo}	无反馈时的电压放大倍数
A_{vs}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数 $= V_o / V_s$
A_{vsl}	有反馈又考虑信号源内阻时的电压放大倍数
f	频率通用符号
f_{bw}	通频带
f_{vof}	有反馈时的通频带
f_H	放大电路的上限(下降3dB)频率
f_{Hf}	放大电路有反馈时的上限频率
f_L	放大电路的下限(下降3dB)频率

f_{if}	放大电路有反馈时的下限频率
f_o	振荡频率
f_a	共基接法下三极管电流放大系数的上限频率
f_β	共射接法下三极管电流放大系数的上限频率
f_T	三极管的特征频率, 即共射接法下三极管电流放大系数为 1 时的频率
r	微变电阻的通用符号
r_i	输入电阻
r_{if}	有反馈时的输入电阻
r_o	输出电阻
r_{of}	有反馈时的输出电阻
R	固定电阻的通用符号
g	微变电导的通用符号
C_D	扩散电容
C_T	结电容, 势垒电容
C_π	混合 π 等效电路中集电结的等效电容
C_π	混合 π 等效电路中发射结的等效电容, 器件参数符号
g_m	跨导
n	电子浓度
$n_p(0)$	在 P 区边界处的电子浓度
p	空穴浓度
r_{bb}'	基区体电阻
r_e	发射结微变电阻与发射区体电阻之和
r_z	稳压管的微变电阻
D	二极管, 场效应管的漏极
D_z	稳压管
G	场效应管的栅极
I_{CBO}	发射极开路时 c—b 间的反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路时 c—e 间的穿透电流
I_{CER}	b—e 间接入电阻时 c—e 间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
I_D	二极管电流, 场效应管的漏极电流
I_{DSS}	$V_{GS} = 0$ 时的 I_D
I_R	二极管的反向电流
I_S	二极管的反向饱和电流
N	电子型半导体
P	空穴型半导体
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
S	场效应管的源极

V_B	二极管击穿电压
V_f	反馈电压
V_h	PN结的位垒
V_p	场效应管的夹断电压
V_T	增强型场效应管的开启电压, 温度的电压当量
α	共基接法下集电极电流的变化量与发射极电流的变化量之比, 即 $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
$\bar{\alpha}$	从发射极到达集电极的载流子的百分数
β	共射接法下集电极电流的变化量与基极电流的变化量之比, 即 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
$\bar{\beta}$	在共射接法下, 不考虑穿透电流时 I_C 与 I_B 的关系用方框图表示的反馈放大电路
A_{ii}	基本放大电路的输出电流与输入电流之比 $= I_o' / I_i'$
A_{ii}'	基本放大电路的输出电流与信号电流之比 $= I_o' / I_i$
A_{iv}	基本放大电路的输出电流与输入电压之比 $= I_o' / V_i'$
A_{ivs}	基本放大电路输出短路时的 A_{iv}
A_{vi}	基本放大电路输出电压与输入电流之比 $= V_o' / I_i'$
A_{vi}'	基本放大电路输出电压与信号电流之比 $= V_o' / I_i$
A_{vio}'	负载开路 (不计 R_L) 时的 A_{vi}'
A_{vv}	基本放大电路的输出电压与输入电压之比 $= V_o' / V_i'$ 其中 I_i' 、 I_o' 、 V_i' 、 V_o' 分别为单向化等效网络中基本放大电路的输入电流、输出电流、输入电压、输出电压。
F_{ii}	反馈网络的反馈电流与输出电流之比 $= I_f' / I_o'$
F_{iv}	反馈网络的反馈电流与输出电压之比 $= I_f' / V_o'$
F_{vi}	反馈网络的反馈电压与输出电流之比 $= V_f' / I_o'$
F_{vv}	反馈网络的反馈电压与输出电压之比 $= V_f' / V_o'$
CMR	用分贝表示的共模抑制比 $= 20 \lg CMR$
CMRR	共模抑制比
K	绝对温度
L_A	基本放大电路的电压增益, 以dB计
τ	时间常数
φ	相位角
t_{ro}	二极管的反向恢复时间
t_d	延迟时间
t_r	上升时间
t_s	存储时间
t_f	下降时间
t_{on}	三极管的开启时间
t_{off}	三极管的关闭时间

目 录

第一章 半导体器件特性	(1)
§ 1.1 半导体的基本知识.....	(1)
1.1.1 导体、半导体和绝缘体.....	(1)
1.1.2 半导体原子结构的特点.....	(2)
1.1.3 本征半导体、空穴及其导电作用.....	(2)
1.1.4 杂质半导体.....	(3)
§ 1.2 PN结及其单向导电性.....	(4)
1.2.1 PN结的形成.....	(4)
1.2.2 PN结的单向导电性.....	(5)
1.2.3 半导体二极管.....	(6)
1.2.4 二极管的电容效应.....	(9)
1.2.5 二极管的主要参数及其等效电路.....	(10)
1.2.6 特殊用途的二极管.....	(14)
1.2.7 二极管的开关特性及开关参数.....	(14)
§ 1.3 半导体三极管.....	(17)
1.3.1 三极管的基本结构和分类.....	(17)
1.3.2 三极管的电流分配与放大作用.....	(18)
1.3.3 三极管的特性曲线.....	(24)
1.3.4 三极管的主要参数.....	(27)
1.3.5 温度对三极管参数的影响.....	(30)
1.3.6 三极管的开关特性及开关参数.....	(31)
§ 1.4 场效应管.....	(35)
1.4.1 结型场效应管.....	(35)
1.4.2 绝缘栅场效应管.....	(40)
1.4.3 场效应管的主要参数.....	(43)
思考题及习题.....	(45)
第二章 数制与代码	(49)
§ 2.1 数制.....	(49)
§ 2.2 数制转换.....	(50)
2.2.1 多项式替代法.....	(50)
2.2.2 基数乘法.....	(51)

2.2.3 数码直接代换法	(53)
§ 2.3 二进制代码	(54)
2.3.1 二——十进制代码	(54)
2.3.2 格雷码	(55)
2.3.3 奇偶校验码	(56)
2.3.4 字符代码	(57)
习题	(58)

第三章 逻辑代数与逻辑门 (59)

§ 3.1 逻辑代数的基本运算规则	(59)
3.1.1 基本逻辑运算	(59)
3.1.2 逻辑代数的公理和定理	(63)
3.1.3 含 n 个变量的定理	(66)
§ 3.2 逻辑运算符的完备性和复合逻辑运算	(68)
§ 3.3 逻辑函数表达式的表示方法	(72)
3.3.1 “与——或”和“或——与”表达式	(72)
3.3.2 逻辑函数的标准式	(72)
3.3.3 不完全确定的逻辑函数	(77)
§ 3.4 逻辑函数的几何图形表示法	(78)
3.4.1 维恩 (Venn) 图	(78)
3.4.2 逻辑函数的 n 维体表示	(79)
3.4.3 卡诺图	(80)
§ 3.5 逻辑函数的化简	(84)
3.5.1 代数化简法	(85)
3.5.2 卡诺图化简法	(87)
3.5.3 表格化简法	(89)
§ 3.6 逻辑门	(96)
3.6.1 DTL “与非门”	(97)
3.6.2 TTL “与非门”	(101)
3.6.3 MOS 集成逻辑门	(110)
3.6.4 ECL 集成逻辑门	(113)
3.6.5 I ² L 集成逻辑门	(115)
思考题及习题	(118)

第四章 组合逻辑电路 (122)

§ 4.1 概述	(122)
§ 4.2 组合逻辑电路的分析	(123)
§ 4.3 组合逻辑电路的设计	(126)
4.3.1 组合逻辑电路的设计步骤	(126)

4.3.2 输入无反变量的组合逻辑电路的设计	(129)
4.3.3 多输出组合逻辑电路的设计	(130)
§ 4.4 组合逻辑电路的竞争和险象	(133)
4.4.1 险象的产生和分类	(133)
4.4.2 险象的判别	(135)
4.4.3 险象的消除	(138)
§ 4.5 常用组合逻辑电路	(139)
4.5.1 编码器	(140)
4.5.2 译码器	(145)
4.5.3 数码比较器	(159)
4.5.4 加法器	(161)
4.5.5 数据选择器	(163)
思考题及习题	(171)

第五章 时序逻辑电路 (175)

§ 5.1 时序逻辑电路综述	(175)
5.1.1 时序逻辑电路的基本概念	(175)
5.1.2 时序逻辑电路的描述	(176)
§ 5.2 时序逻辑电路的记忆单元	(179)
5.2.1 R—S 触发器	(179)
5.2.2 J—K 触发器	(181)
5.2.3 D 触发器	(186)
5.2.4 T 触发器	(187)
5.2.5 触发器的激励表	(188)
§ 5.3 同步时序逻辑电路	(189)
5.3.1 同步时序逻辑电路的分析	(189)
5.3.2 同步时序逻辑电路的设计步骤	(196)
5.3.3 状态指定	(196)
5.3.4 状态化简	(198)
5.3.5 状态编码	(206)
5.3.6 同步时序电路设计举例	(217)
§ 5.4 异步时序逻辑电路	(223)
5.4.1 电位控制型异步时序电路的分析	(225)
5.4.2 异步时序电路的过渡过程	(230)
5.4.3 电位控制型异步时序电路的设计	(232)
§ 5.5 常用时序逻辑电路	(246)
5.5.1 寄存器	(246)
5.5.2 计数器	(256)
思考题及习题	(288)

第一章 半导体器件特性

本章要求

学完本章后，应能达到下列要求：

一、掌握半导体二极管的单向导电性、主要参数，为今后选择二极管和分析二极管电路打下基础。

二、掌握稳压管的稳压特性、主要参数。为今后选择稳压管和分析稳压管电路打下基础。

三、掌握三极管电流分配、放大作用，输入和输出特性曲线及主要参数，极限参数。为分析和应用三极管电路打下基础。

四、掌握二极管和三极管的开关特性及开关参数，熟悉三极管的三种工作区域的条件和特点。

五、了解温度对二极管、三极管特性及参数的影响。

六、熟悉结型和绝缘栅型场效应管的工作原理、特性曲线、主要参数及使用注意点。

§ 1.1 半导体的基本知识

大家都知道，晶体管电路的应用很广，电路种类繁多。要研究晶体管电路，不仅要用到已经学过的交、直流电路的基本概念和分析计算方法，而且还要用到有关晶体管工作原理和特性的基本知识。因此，在研究晶体管电路之前，本章将从运用晶体管的角度出发，介绍晶体管的工作原理和性能。晶体管是由半导体材料做成的，为了便于了解晶体管的工作原理和性能，必须对半导体的性质有所认识。

1.1.1 导体、半导体和绝缘体

在自然界中，存在着许多不同的物质，有的物质很容易传导电流称为导体，如铜、铝、银等。也有的几乎不传导电流称为绝缘体，如橡胶、陶瓷、塑料和石英等。此外，还有一类物质其导电性能介于导体和绝缘体之间，我们把它称为半导体，例如：锗、硅、硒、砷化镓等。

其实，半导体之所以能成为制做晶体管的材料，并不是因为它的导电性能介于导体和绝缘体之间，而是由于它具有一些独特的导电性能。例如，同一块半导体在不同的温度或不同强度的光线照射下，它的导电能力会有非常大的区别；在纯净的半导体中加入微量杂质，则半导体的导电能力就会急剧的增加等等。我们正是利用半导体的这些独特性能制造出了各种不同功能的半导体器件。要想知道半导体为什么会具有这些独特的导电性能，这就要从半导

体的内部结构分析入手了。

1.1.2 半导体原子结构的特点

我们知道，原子是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成。电子分若干层绕原子核不停地运动。在同一个原子中，内层电子受原子核的吸引力较大，外层电子受原子核的吸引力较小，而影响物质导电性能的主要是外层电子。

在近代电子学中，用得最多的半导体材料是硅和锗，它们的原子结构如图1·1。由图1·1 (a) 可见，硅原子由带正电的原子核和围绕着它的14个带负电的电子组成。这14个电子按一定的规律分布在三层电子轨道上，由于原子核带14个电子电量的正电，故正常情况下原子呈电中性。原子的内层电子受原子核的束缚较大，而最外层的四个电子受原子核的束缚力较小，通常称为价电子，物质的化学性质主要是由最外层的价电子数决定。半导体的性质也与价电子密切相关，因此价电子是我们研究的对象。一般画图时，只用1·1 (b) 所示的简化模型。

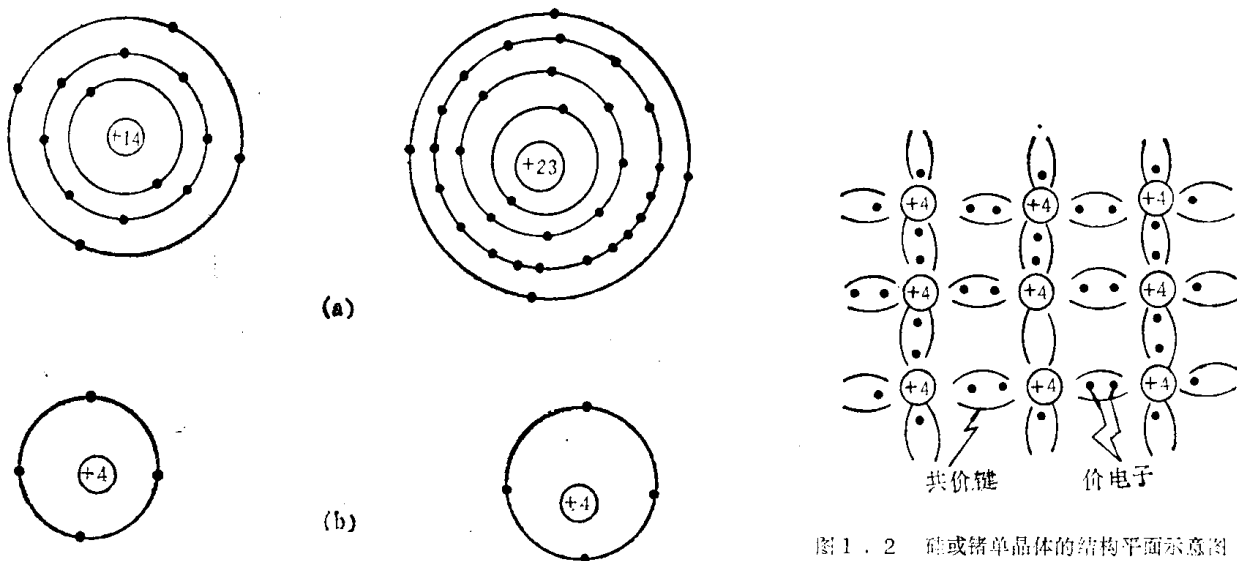


图 1.1 (a) 原子结构图 (b) 简化模型

应当指出，用于制造晶体管的硅、锗材料都必须是经过加工提炼成的纯净的单晶半导体。在单晶半导体中，其原子排列已由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态。图1·2是硅或锗单晶体的结构平面示意图，由图可见，各原子之间的距离都相等而且相距很近，这样使得每一原子中的价电子除受本身原子核的束缚外，还受到其它原子的作用。在本身原子和相邻原子的共同作用下，价电子不再属于各个原子，而成为晶体中原子所共有。这一特征称为价电子的共有化运动。

由于内层电子受核作用较强，共有化运动不象最外层的价电子那样显著。正是由于上述共有化运动，晶体的各原子才能紧紧地组成一个整体。在硅或锗晶体中，两个相邻原子好象各有一个价电子为二者所“共有”，我们把两个“共有”电子所形成的束缚作用叫做共价键。图1·2中黑点代表共有化电子，当得不到外界的能量，它们不能挣脱共价键。

1.1.3 本征半导体、空穴及其导电作用

纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体。在很低的温度下（如绝对零度），晶体接

近图1·2的理想结构。由于不存在自由电子，这时晶体相当于绝缘体，在室温下，加到晶体上的热能会使一些共价键遭到破坏而有可能导电。这种情况示于图1·3中。图中把一个脱离了共价键束缚的自由电子，想象成是被撞击出来的二次电子，在晶体中以随机形式到处自由漂移。在室温（一般指25℃，又称常温）下，破坏这样一个共价键所需能量 E_g ，对于硅来说大约是1.1eV，对于锗来说大约是0.72eV（eV是电子伏特，1eV相当于 $1.60 \times 10^{-19} \text{J}$ ）。图1·3中小圆圈表示共价键中失去电子而留下的空位，这个空位就叫做空穴。空穴和自由电子都是运载电荷的粒子，把它们统称为载流子，而空穴的重要性是它可作为一个带电“载流子”，在效果上可同自由电子相比拟。

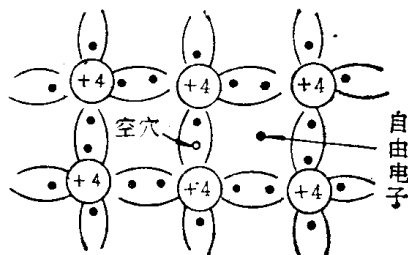


图1·3 本征半导体晶体结构示意图

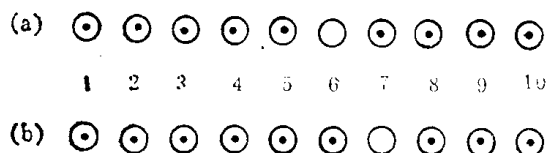


图1·4 空穴导电机理

下面就将空穴具有导电性的机理定性说明如下：当共价键不完整而存在空穴时，邻近原子的价电子比较容易离开其共价键来填补这个空穴，离开共价键去填补空穴的自由电子又在其原来位置上留下一个空穴。而这个空穴又可被其他共价键的电子所填补，空穴实际上是朝着与电子相反的方向移动。这时，我们得到一个不涉及自由电子的导电机理。这个现象在图1·4中示意画出，图中带点的圆圈表示完整的键，空白圆圈表示空穴。在图1·4(a)中画出了10个离子，在离子6处有一破坏的键（即空穴）。现在假想来自离子7的电子移进离子6处的空穴，从而形成图1·4(b)的结果。如果我们比较图1·4(a)、(b)这两个图，看起来就好象(a)中的空穴向右移动了一样（即从离子6到离子7）。以上说明这样一个事实，空穴在一个方向的运动，实际上意味着负电荷向相反方向运动了一个相等的距离。可以认为空穴是实际存在的，在这里把空穴看成一个带正电的粒子，它所带的电量与电子相等，符号相反。在外加电场作用下，可以自由地在晶体中运动，从而和自由电子一样参加导电。

本征半导体当受到外界光和热的激发，产生一个自由电子时，必然相伴随产生一个空穴，电子和空穴是成对出现的，这种现象称为本征激发。

1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量其它元素的原子，这些微量原子对本征半导体而言叫做杂质，掺有杂质的半导体叫做杂质半导体。在杂质半导体中，因掺入杂质性质不同可分为两大类：N型半导体（电子型半导体）和P型半导体（空穴型半导体）。

1. N型半导体

若在硅晶体中掺入微量的五价元素（如磷、砷、锑），现以掺磷为例，磷原子就会与硅原子组成共价键结构，如图1·5所示。由于磷原子的数目比硅原子要少的多，因此整个晶体

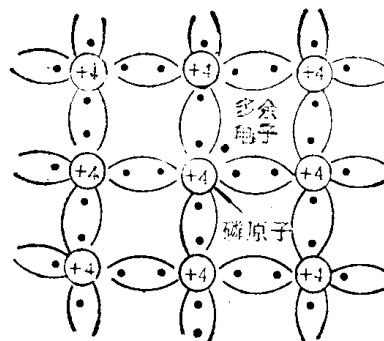


图1·5 N型半导体（硅中掺磷）结构

结构基本不变，只是某些硅原子的位置被磷原子所替代，磷原子具有五个价电子，所以一个磷原子与相邻的四个硅原子结成共价键时，还多余一个价电子在共价键之外。因磷原子对它的束缚力较弱，它很容易挣脱束缚变成自由电子。从而使硅晶体中电子载流子的数目大大增加。这种半导体主要靠电子导电，所以叫做电子型半导体或简称N型半导体。

N型半导体中，除了由于掺杂产生的大量自由电子外，还有热运动而不断产生的少量自由电子及相应数量的空穴，并且把产生的电子和空穴称为“电子——空穴对”。N型半导体中，空穴的数目与自由电子的数目相比是极少的，所以把空穴称为“少数载流子”，电子称为“多数载流子”。

2. P型半导体

在硅晶体中掺入微量的三价元素（如硼、镉、铝）以掺硼为例，硼原子与硅原子组成共价键结构，如图1.6所示。硼原子只有三个价电子，它与相邻的四个硅原子结成共价键时，还缺少一个价电子，因此在一个共价键上要出现空位即产生了空穴。当相邻的共价键上的电子受到热振动或在其它激发条件下获得能量时，就很容易来填补这个空位。这样，每个硼原子

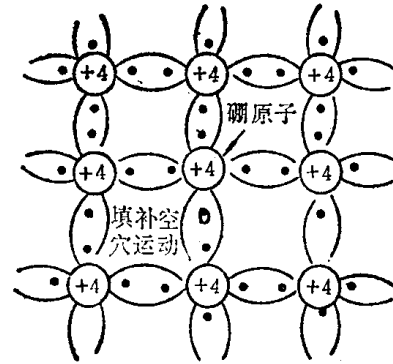


图1.6 硅中掺硼形成P型半导体

子都可能提供一个空穴，而使掺硼硅晶体中的空穴数目大大增加。这种半导体主要就靠空穴导电，所以叫空穴半导体或简称为P型半导体。同样，在P型半导体中也有由于热激发而产生的少量“电子——空穴对”，在P型半导体中与N型相反，空穴是多数载流子，而电子是少数载流子。

经过上面的分析，小结如下：

（1）在本征半导体硅或锗中，掺入微量不同的有用杂质元素，可使半导体的导电能力大大增强，并可获得N型和P型半导体。

（2）在N型半导体中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。而在P型半导体中，则与N型相反。

（3）N型和P型半导体都是电中性的，对外不显电性。这是因为本征半导体硅或锗及掺入的杂质都是电中性的，而且在掺杂过程中既不丧失也不从外界获得电荷，只是杂质原子与晶体原子的价电子数目不同。从而使半导体中出现了大量可以运动的电子或空穴，并没有破坏整个半导体内正负电荷的平衡状态。

§1.2 PN结及其单向导电性

在上节中我们讨论了N型和P型半导体的导电特性，如果二者通过某种方式结合后，在P型和N型交界的地方就形成了PN结。PN结具有特殊的导电性能，它是构成半导体二极管和三极管及其他半导体器件的基础。

1.2.1 PN结的形成

PN结是由P型和N型半导体通过一定的工艺结合而成的。结合前的P型和N型半导体

如图1.7 (a) 和 (b) 所示。

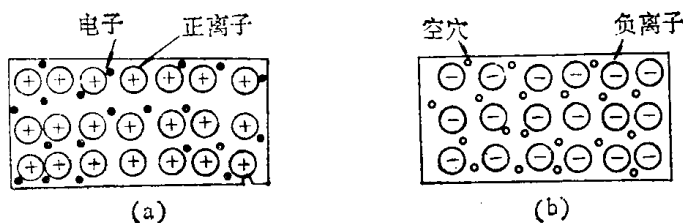


图 1.7 半导体中载流子及离子 (不考虑本征激发)

由于晶体内部处处呈现电中性，因此P型和N型半导体中导电的载流子必然与带电离子成对地出现（不考虑本征激发），对于N型半导体自由电子数等于正离子数。P型半导体空穴数等于负离子数。当结合后，因为交界面两边载流子浓度差别很大，N区内电子很多而空穴很少；P区内则相反，空穴很多而电子很少。这样，电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此有大量电子要从N区向P区扩散，同时P区的多数载流子（空穴）也必然向N区扩散。扩散到对方的载流子成为少数载流子。

电子和空穴都是带电的，它们扩散的结果破坏了P区和N区的电中性条件。P区一边失去空穴，留下了负离子；N区一边失去了电子，留下正离子如图1.8所示。正负离子在交界面两边形成一个电位差 V_{ho} 和内部电场（或称内建电场），该电场方向由N区指向P区，它将阻止载流子的继续扩散直至交界面两边的电荷量不再增加，即达到动态平衡状态。

在动态平衡时，交界面两边缺少载流子的区域称为耗尽层，也叫空间电荷区，这就是我们所说的PN结。因为它能阻止电子和空穴的继续扩散，所以又称为“阻挡层”。耗尽层很薄，约为数十微米，可以认为在该薄层内都是不能移动的正负离子。

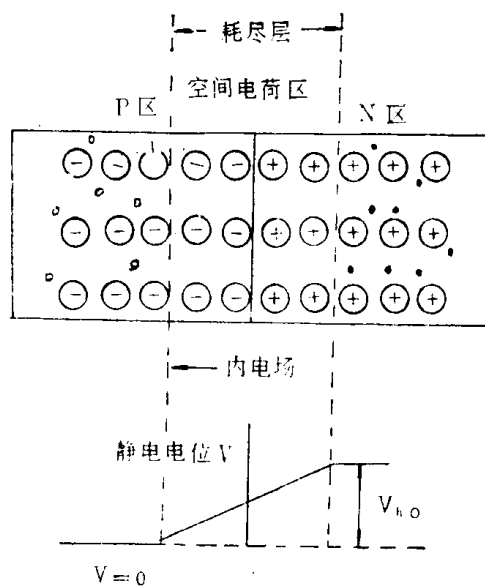


图 1.8 PN结构示意图

PN结中扩散只是载流子运动的一种现象，另外一种现象是少数载流子的漂移。所谓漂移，就是载流子在电场作用下产生的定向运动，这种运动形成了漂移电流。内建电场对多数载流子的扩散起阻止作用，对少数载流子具有吸引作用。例如N区的空穴只要靠近耗尽层，就会被内建电场推到对方的P区中去。在动态平衡状态，当P区空穴向N区扩散产生空穴扩散电流时，必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，数量相等。同理，电子的扩散电流也必然被电子的漂移电流所抵消。因此在没有外加电场或其它激发因素作用时，PN结没有电流通过。

1.2.2 PN结的单向导电性

PN结有一个很重要的特性，就是单向导电性。也就是说电流只能从一个方向流通。下面，我们运用PN结内部载流子的运动规律来解释在外部电源作用下，PN结所反映出来的

单向导电现象。

1. PN结加正向电压

在图1·9(a)中, 电源电压 V_1 通过电阻 R 加到半导体的两端产生电位差 V , 电源正极接P区, 负极接N区, 叫做加正向电压。由于PN结是一个高阻区, 所以电压 V 几乎全部降落在PN结上, 它所产生的电场又称之为外电场刚好与内建电场的方向相反。在外电场作用下, 多数载流子(简称“多子”)被推向耗尽层, 空间电荷量和耗尽层的宽度都将减小, 内建电场被削弱, 破坏了PN结中原来的平衡, 于是扩散运动超过在电场作用下的漂移运动, 扩散电流增加, 而漂移电流本来就是少数载流子(简称“少子”)运动形成的, 而少子的数量有限, 它对总电流影响可以忽略。通过PN结的电流(正向电流)主要是扩散电流, 而且随 V 的增加而增加, 在正常工作范围内, PN结上的外加电压只要稍有变化, 便能引起电流的显著变化。此时, 正向PN结表现为一个很小的电阻。

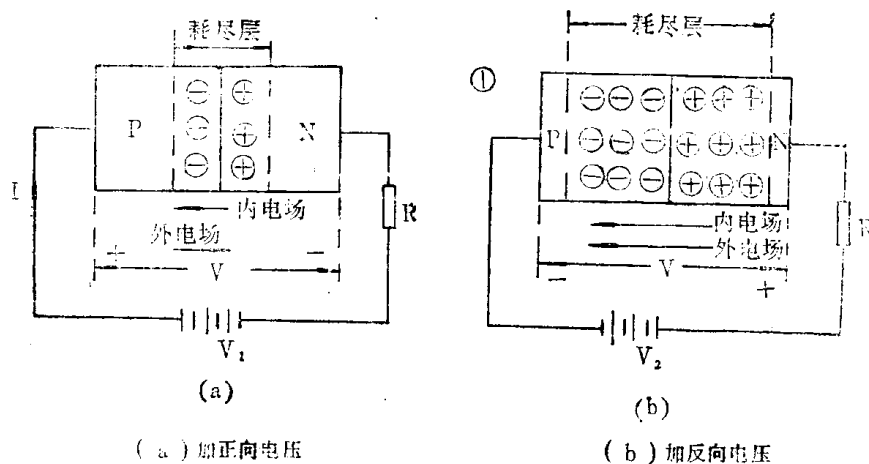


图1·9 PN结的单向导电性

2. PN结加反向电压

外加电源改成 V_2 , 如果N区接正极, P区接负极, 叫做加反向电压。PN结两端承受和前一种情况相反的电压, 如图1·9(b)所示。电压 V 所产生的外电场与内建电场方向相同, 外电场驱使多数载流子背离耗尽层, 空间电荷量和耗尽层的厚度都将增加, 在电场作用下的漂移运动超过扩散运动, 这样以来扩散无法进行, 则多子的扩散电流趋近于零。此时通过PN结的电流主要是漂移电流, 它是“少子”的漂移运动所形成的, 由于少数载流子的浓度很小, 漂移数目有限所以漂移电流很微弱, 我们把这电流称为反向电流。此时, PN结表现为一个很大的电阻, 在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压而变化, 所以通常又称之为反向饱和电流。

由此可见, PN结加正向电压呈现较小电阻, 加反向电压电阻很大, 这就是它的单向导电性。这里可以看出PN结具有单向导电性的关键是它的阻挡层(空间电荷区), PN结加正向电压空间电荷区变窄, 电阻减小形成较大的正向电流。PN结加反向电压, 空间电荷区加宽电阻增大, 扩散无法进行, 此时由少数载流子产生的反向电流是很微弱的。

1.2.3 半导体二极管

1. 二极管的构造

半导体二极管就是由一个PN结, 再加上欧姆接触电极、引出线, 最后加以封装而成。

按照它们的结构形式可分为点接触型和面接触型两类。

(1) 点接触型二极管。结构如图1·10(a)所示, 它的特点是结的面积小, 因而结电容小, 适于高频工作。但由于结面积小, 不允许通过大电流, 所以它适用于高频检波、小电流整流及小功率开关电路。

(2) 面接触型二极管。其结构如图1·10(b)所示, 它的管芯是面接触的, 由于面接触型二极管的PN结面积大, 可承受较大的电流, 但结电容也大。这种类型的管子适用于整流, 而不宜用于高频电路中。例如2cp1是面接触型硅二极管, 最大整流400mA, 最高工作频率只有3KHz。

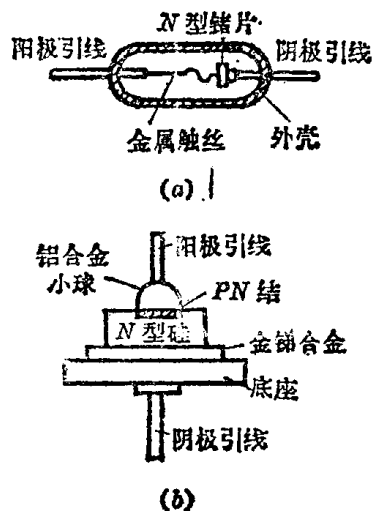


图1·10 半导体二极管的结构及符号

(a) 点接触型 (b) 面接触型 (c) 电路符号

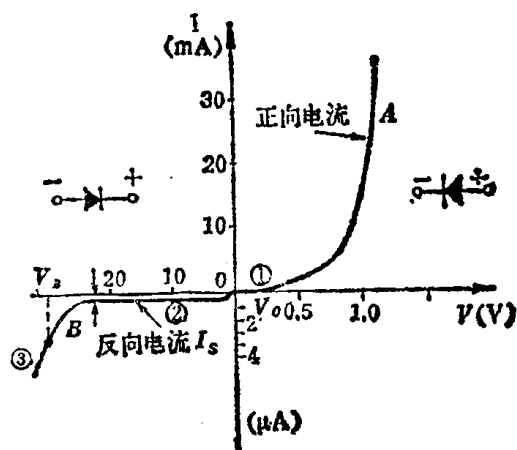


图1·11 PN结理想伏安特性

2. 二极管伏安特性及方程式

在PN结二极管两端, 加正向电压和加反向电压后, 通过管子的电流I随管子两端电压V变化的情况, 如图1·11所示。曲线OA代表管子正向偏置(即加正向电压)时的伏安特性, 而曲线OB则代表管子在反向偏置时的伏安特性。

根据理论分析, PN结二极管的理想伏安特性可由下式表示:

$$I = I_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) = I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1-1)$$

式中I——PN结二极管的电流。

I_s ——反向饱和电流。

V——外加电压。

V_T ——温度的电压当量 = $\frac{kT}{q} = \frac{T}{11500}$ 。

$k = 1.381 \times 10^{-23}$ 焦/K。

$q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库。

在常温(300K)下, $V_T \approx 26$ 毫伏。(1-1)式是理想二极管的伏安特性, 又称为半导体二极管的方程式, 下面我们对二极管的方程式从两方面加以分析。

当管子加正向电压, 只要V大于 V_T 几倍, (1-1)式中的 $e^{\frac{V}{V_T}} \gg 1$, 故1可略去, 则

管子的电流与电压成指数关系，即图1·11中特性曲线的OA段；当管子加反向电压时， V 为负值，当 $|V|$ 比 V_T 大几倍时，指数项很快趋近于零，故 $I \approx -I_s$ 。反向饱和电流 I_s 在一定温度下是个常数，不随外加反向电压而变，即为特性曲线的OB段。

由于半导体二极管的引出线和半导体内部存在电阻以及二极管表面还有漏电流等因素的影响，实测的二极管伏安特性与按二极管方程画出的理想伏安特性之间存在着一定的差别。图1·12示出硅二极管和锗二极管的实际伏安特性曲线，下面对二极管伏安特性分三部分加以说明：

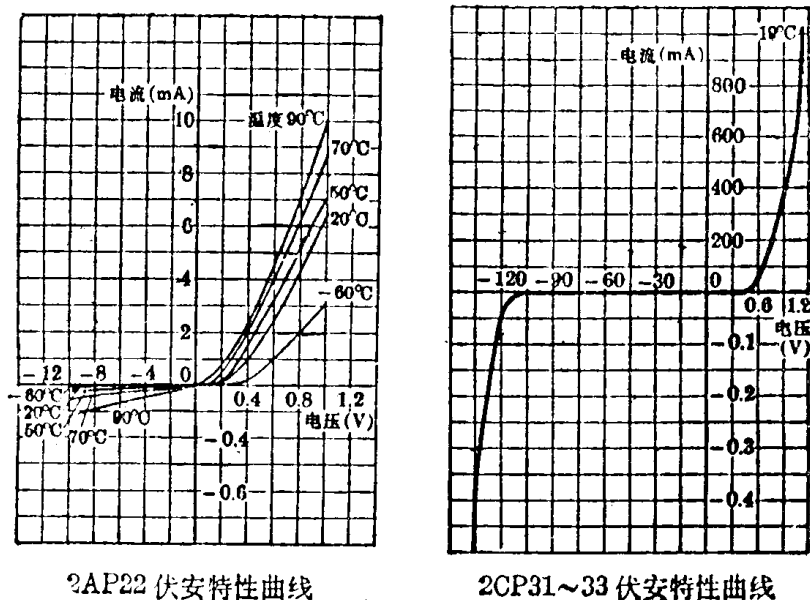


图 1.12 二极管的伏安特性曲线

(1) 正向特性

对应于图1·11中的①段为正向特性。当正向电压比较小时，外电场还不足以克服内建电场对载流子扩散运动所造成的阻力，这时正向电流几乎为零，二极管呈现出一个大电阻。当二极管两端的电压超过一定的数值 V_D 以后，内建电场被大大削弱，二极管电阻变得很小，正向电流开始显著增加。 V_D 称为死区电压也叫门坎电压，随管子材料和温度的不同而不同，硅管的死区电压约为0.5伏，锗管的死区电压约为0.1伏。

(2) 反向特性

P型半导体中的少数载流子——电子和N型半导体中的少数载流子——空穴，在反向电压作用下很容易通过PN结，形成反向电流。但由于少数载流子的数目很少，所以反向电流是很小的，如图1·11中②段所示。在相同温度下，硅管反向电流要比锗管小，硅管是纳安级(nA)，锗管是微安级(μA)。反向电流有如下特点：它随温度的上升而迅速增长，外加的反向电压在一定范围内变化，反向电流基本不变。

(3) 反向击穿特性

当增加反向电压达到一定数值时，有可能因外加的电场过强，破坏共价键而把价电子拉出，使少子数目急剧上升；强电场也可能引起电子与原子碰撞，产生新的“电子——空穴对”，引起载流子数目剧增。这两种因素所产生的现象称为电击穿，前者称为齐纳击穿（空间电荷区比较窄），后者则称为雪崩击穿（空间电荷区较宽），如图1.11中③段所示， V_B 叫反向击穿电压。当二极管的反向电压接近或超过这个数值而又没有限流措施，将会因电流过