

高等院校教材

模拟电子技术基础

夏应清 陈小宇 吴建斌 编著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书在保持模拟电子技术基础课程多年形成的比较成熟的体系的同时,结合新世纪科学与教育发展方向和需求,力求讲透基本概念、原理和方法,重点培养学生分析问题和解决问题的能力。围绕信号放大、运算、处理、转换和产生,按照先基础后应用,从简单到复杂的思路进行介绍。

全书共8章。第1章介绍二极管、三极管和场效应管等几种常用的半导体器件。第2章介绍放大电路概念及基本组态放大电路和多级放大电路的工作原理。第3章介绍功率放大电路的概念及互补功率放大电路的工作原理。第4章主要介绍集成运放内部组成及工作原理。第5章介绍负反馈的基本概念、判断方法及其对放大电路的影响,并且介绍了负反馈放大电路的分析方法。第6章介绍基本运算电路和有源滤波电路的分析方法。第7章介绍正弦波和非正弦波产生电路的工作原理和分析方法。第8章介绍直流稳压电源的组成及各部分工作原理。最后在附录中对电子电路的计算机辅助分析与设计作了简要介绍。

本书既可作为高等院校电子信息类专业电子技术基础课程的教材,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

模拟电子技术基础/夏应清,陈小宇,吴建斌编著. —北京:科学出版社, 2006

(高等院校教材)

ISBN 7-03-016238-2

I. 模… II. ①夏…②陈…③吴… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第103472号

责任编辑:朱海磊 潘继敏 / 责任校对:鲁 素

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第 1 版 开本:B5(720×1000)

2006年1月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—4 500 字数:360 000

定价:26.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

本书是为了适应电子技术高度发展和新世纪高等教育培养高素质人才的需要,根据编者多年来在教学实践中总结出的课程改革经验编写而成。在保持本课程多年形成的比较成熟的体系的同时,对相关教学内容做了修改和更新,使本书更符合新世纪科学与教育发展方向和需求。在编写本书过程中,力求讲透基本概念、原理和方法,重点培养学生分析问题和解决问题的能力。主要体现在以下几个方面:

(1) 按照基本概念→基本器件→基本电路→集成电路→电路模块的结构体系,围绕信号放大、运算、处理、转换和产生,先基础后应用,从简单到复杂进行介绍。

(2) 为适应当前电子技术发展的趋势,在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下,加强以集成运算放大电路为主的各种模拟集成电路的分析和应用。将集成运算放大电路的介绍安排在半导体器件和放大电路的基本原理等最基本原理的内容之后,便于对以集成电路为主的反馈放大电路、运算电路、信号处理电路以及信号产生电路等进行分析。

(3) 更突出电子技术基础课程的实践性。在讨论各类器件时,重点放在器件的基本工作原理、器件的外特性及主要参数;在讨论具体电路时,突出构成该电路的思路、电路特点、重要技术指标的计算,尽量删去繁杂的数学推导。

(4) 力求以精练、准确的文字和简明清晰的图表介绍基本概念、原理和方法;选取典型的、有特色的电路来讲述和分析。在书后附录中对电子电路的计算机辅助分析与设计(EDA)作了简要介绍,并在每章后对相关内容辅以 EDA 介绍,便于读者了解电子技术的新发展。每章都安排有丰富的典型而有价值的习题,便于读者加深对基本概念的理解和深化学习,培养分析计算和综合应用的能力。

参加本书编写工作的有吴建斌(第 1、3、4 章)、夏应清(第 2、5、8 章)和陈小宇(第 6、7 章及附录)等同志,夏应清负责组织各章节内容的讨论和定稿。在本书编写过程中得到了李玲远老师的大力支持和热情指导。在此谨向对本书编写、出版提出过意见和建议的同志们表示衷心的感谢!

电子技术日新月异,本课程教学改革任重道远,由于编者水平有限及编写时间仓促,书中一定存在不少错误和不妥之处,诚恳地希望各方面的读者提出宝贵意见和建议,以便今后不断改进。

编者

2005 年夏于武汉桂子山

本书常用文字符号说明

1. 基本原则

文字符号通常包括两部分:基本符号和下标。基本符号大都为一个字母,少数情况有多个字母;下标可由一个或多个字母组成。当基本符号或下标采用大写或小写时,各自所表示的含义是不同的,一般规定如下:

1) 电流和电压(以晶体管基极电流和基极-发射极电压为例)

I_B, U_{BE} 大写字母、大写下标表示直流量

I_b, U_{be} 大写字母、小写下标表示交流有效值

$\dot{I}_B, \dot{U}_{be}$ 大写字母上面加点、小写下标表示正弦相量

i_B, u_{BE} 小写字母、大写下标表示总瞬时值

i_b, u_{be} 小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值

2) 直流电源电压

V_{CC} 晶体三极管集电极直流电源电压

V_{BB} 晶体三极管基极直流电源电压

V_{EE} 晶体三极管发射极直流电源电压

V_{DD} 场效应管漏极直流电源电压

V_{GG} 场效应管栅极直流电源电压

V_{SS} 场效应管源极直流电源电压

3) 电阻

R 大写字母表示电路中外接的电阻或电路的等效电阻

r 小写字母表示器件的等效电阻

2. 基本符号

1) 电流和电压

I_i, U_i 输入电流、输入电压

I'_i, U'_i 净输入电流、净输入电压

I_o, U_o 输出电流、输出电压

$I_{o(AV)}, U_{o(AV)}$ 输出电流平均值、输出电压平均值

U_{om} 最大输出电压

I_F 、 U_F 反馈电流、反馈电压

I_Q 、 U_Q 静态电流、静态电压

U_{REF} 参考电压

U_s 信号源电压

U_T 温度的电压当量

I_+ 、 U_+ 集成运放同相输入端的电流、电压

I_- 、 U_- 集成运放反相输入端的电流、电压

2) 功率

P 功率的通用符号

P_o 输出交变功率

P_{om} 输出交变功率最大值

P_D 电源提供的直流功率

P_C 器件的耗散功率

3) 频率

BW 通频带

f_H 放大电路的上限频率

f_L 放大电路的下限频率

f_o 振荡频率、谐振频率

ω 角频率的通用符号

4) 电阻、电容、电感、阻抗

R_i 、 R_o 电路的输入电阻、输出电阻

R_{if} 、 R_{of} 有反馈时电路的输入电阻、输出电阻

R_L 负载电阻

R_s 信号源内阻

G 电导的通用符号

C 电容的通用符号

L 电感的通用符号

X 电抗的通用符号

Z 电阻的通用符号

5) 增益或放大倍数、反馈系数

A 增益或放大倍数的通用符号

A_e 共模电压放大倍数

A_d 差模电压放大倍数

A_i 电流放大倍数

- A_u 电压放大倍数
- A_{uf} 有反馈时电压放大倍数
- A_{us} 考虑信号源内阻时的电压放大倍数
- F 反馈系数的通用符号

3. 器件符号

1) 器件引脚名称

- T 晶体三极管、场效应管
- D 二极管
- D_z 稳压二极管

2) 器件引脚名称

- b 晶体三极管的基极
- c 晶体三极管的集电极
- e 晶体三极管的发射极
- D 场效应管的漏极
- G 场效应管的栅极
- S 场效应管的源极

3) 器件参数

- A_{od} 集成运放的开环差模电压放大倍数
- $C_{b'c}$ 集电结等效电容
- $C_{b'e}$ 发射结等效电容
- I_{CBO} 集电极-基极之间的反向饱和电流
- I_{CEO} 集电极-发射极之间的穿透电流
- I_{CM} 集电极最大允许电流
- $I_{D(AV)}$ 整流二极管平均电流
- I_S 二极管反向饱和电流
- I_Z 稳压管稳定电流
- I_{IB} 集成运放输入偏置电流
- I_{IO} 集成运放输入失调电流
- P_{CM} 集电极最大允许耗散功率
- S_R 集成运放转换速率
- U_Z 稳压管稳定电压
- $U_{(BR)CBO}$ 发射极开路时集电极-基极之间的反向击穿电压
- $U_{(BR)EBO}$ 集电极开路时发射极-基极之间的反向击穿电压

U_{CES} 集电极-发射极之间的饱和管压降

U_{idmax} 最大差模输入电压

U_{icmax} 最大共模输入电压

U_{IO} 集成运放输入失调电压

U_P 场效应管的夹断电压

U_T 场效应管的开启电压

BW_G 集成运放的单位增益带宽

g_m 场效应管的跨导

r_b 基区体电阻

$r_{b'e}$ 发射结电阻

r_{be} 基极-发射极之间的微变等效电阻

r_{ce} 集电极-发射极之间的微变等效电阻

r_{DS} 漏极-源极之间的微变等效电阻

r_{GS} 栅极-源极之间的微变等效电阻

r_{id} 集成运放差模输入电阻

α 共基电流放大系数

$\bar{\alpha}$ 共基直流电流放大系数

β 共射电流放大系数

$\bar{\beta}$ 共射直流电流放大系数

4. 其他符号

D 非线性失真系数

K_{CMR} 共模抑制比

M 互感系数

Q 品质因数

S 整流电路的脉动系数

S_r 稳压系数

T 周期、温度

η 效率

τ 时间常数

φ 相位角

目 录

前言

本书常用文字符号说明

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 半导体及其结构	1
1.1.2 本征半导体、空穴及其导电作用	2
1.1.3 杂质半导体	4
1.1.4 PN 结的形成及其特性	5
1.2 半导体二极管	9
1.2.1 半导体二极管的结构	9
1.2.2 半导体二极管的 $V-I$ 特性	10
1.2.3 二极管的参数	11
1.2.4 二极管的基本应用电路	13
1.3 特殊二极管	15
1.3.1 稳压二极管	15
1.3.2 变容二极管	16
1.3.3 光电二极管	16
1.3.4 发光二极管	18
1.4 半导体三极管	18
1.4.1 三极管的结构及类型	18
1.4.2 三极管的电流分配与放大作用	19
1.4.3 三极管的共射特性曲线	23
1.4.4 三极管的主要参数	25
1.4.5 温度对三极管特性的影响	26
1.5 场效应管	27
1.5.1 结型场效应管	27
1.5.2 绝缘栅型场效应管	31
1.5.3 场效应管与晶体管的比较	35
习题	36
EWB 例题	38

EWB 习题	39
第 2 章 基本放大电路	41
2.1 放大电路的基本知识	41
2.1.1 放大的概念	41
2.1.2 放大电路的主要性能指标	42
2.2 共射放大电路	45
2.2.1 基本共射放大电路的组成及其工作原理	45
2.2.2 放大电路的组成原则	46
2.3 放大电路的基本分析方法	47
2.3.1 放大电路的直流通路和交流通路	47
2.3.2 静态工作点的近似估算	48
2.3.3 图解分析法	48
2.3.4 h 参数等效电路分析法图解分析法	54
2.4 共集电极电路和共基极电路	63
2.4.1 共集电极电路	63
2.4.2 共基极电路	66
2.4.3 三种基本组态电路的比较	68
2.5 场效应管放大电路	69
2.5.1 场效应管的直流偏置电路及静态分析	69
2.5.2 场效应管放大电路的动态分析	71
2.6 多级放大电路	74
2.6.1 多级放大电路的耦合方式	74
2.6.2 多级放大电路的动态分析	75
2.7 放大电路的频率响应	78
2.7.1 频率响应的一般概念	78
2.7.2 晶体管的高频等效模型	80
2.7.3 放大电路的频率响应分析	82
习题	86
EWB 例题	95
EWB 习题	97
第 3 章 功率放大电路	98
3.1 功率放大电路的特点和分类	98
3.1.1 功率放大电路的特点	98
3.1.2 功率器件	100
3.1.3 功率放大电路的分类	102
3.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	104

3.2.1	电路组成与工作原理	104
3.2.2	主要技术指标分析计算	105
3.2.3	功率三极管的选择	106
3.3	甲乙类互补对称功率放大器	108
3.3.1	甲乙类双电源互补对称电路	108
3.3.2	甲乙类单电源互补对称电路	111
3.4	集成功率放大器	113
3.4.1	LM386 集成功率放大器	113
3.4.2	LM386 的典型应用	114
	习题	115
	EWB 例题	119
	EWB 习题	121
第4章	集成运算放大电路	122
4.1	差分放大电路	122
4.1.1	基本差分放大电路工作原理	123
4.1.2	主要技术指标分析计算	124
4.1.3	差分式放大电路的传输特性	128
4.2	集成电路运算放大器	130
4.2.1	集成电路运算放大器的基本组成及特点	130
4.2.2	集成运算放大电路中的电流源电路	131
4.2.3	集成运算放大器典型电路分析	134
4.2.4	集成电路运算放大器的主要参数	138
	习题	141
	EWB 例题	146
	EWB 习题	146
第5章	负反馈放大电路	148
5.1	反馈的基本概念	148
5.1.1	反馈的基本概念	148
5.1.2	反馈的分类及判断	149
5.1.3	反馈放大电路的方框图及一般表达式	152
5.1.4	负反馈放大电路的基本放大电路及反馈网络	154
5.1.5	负反馈放大电路的四种基本组态	156
5.2	负反馈对放大电路性能的改善	158
5.2.1	提高增益的稳定性	158
5.2.2	减小非线性失真	158
5.2.3	扩展通频带	159

5.2.4 对输入电阻和输出电阻的影响	160
5.3 负反馈放大电路的分析	162
5.3.1 深度负反馈条件下的近似计算	163
5.3.2 方框图分析法	165
5.4 负反馈放大电路的稳定问题	167
5.4.1 负反馈放大电路自激振荡	168
5.4.2 负反馈放大电路稳定性分析	168
习题	170
EWB 例题	177
EWB 习题	178
第 6 章 信号的运算与处理电路	179
6.1 理想集成运算放大器	179
6.1.1 理想集成运算放大器	179
6.1.2 理想集成运算放大器工作在线性区时的特点	179
6.1.3 理想集成运算放大器工作在非线性区时的特点	180
6.2 信号的基本运算电路	181
6.2.1 比例运算电路	181
6.2.2 加减运算电路	185
6.2.3 积分运算电路和微分运算电路	188
6.2.4 对数运算电路和指数运算电路	189
6.3 模拟乘法器及其在运算电路中的应用	192
6.3.1 模拟乘法器的工作原理	192
6.3.2 模拟乘法器在运算电路中的应用	195
6.4 有源滤波电路	196
6.4.1 滤波器电路基本概念与分类	196
6.4.2 有源低通滤波电路	198
6.4.3 有源高通滤波电路	200
6.4.4 有源带通滤波电路	201
6.4.5 有源带阻滤波电路	202
习题	204
EWB 例题	211
EWB 习题	213
第 7 章 信号产生电路	215
7.1 正弦波振荡电路	215
7.1.1 正弦波振荡电路的振荡条件	215
7.1.2 RC 正弦波振荡电路	217

7.1.3	LC 正弦波振荡电路	221
7.1.4	石英晶体正弦波振荡电路	227
7.2	电压比较器	231
7.2.1	概述	231
7.2.2	过零比较器	232
7.2.3	单门限电压比较器	232
7.2.4	迟滞比较器	233
7.3	非正弦波产生电路	234
7.3.1	矩形波产生电路	234
7.3.2	三角波产生电路	236
7.3.3	锯齿波产生电路	238
7.4	集成函数发生器	239
7.4.1	电路结构	239
7.4.2	常用方法	240
习题		241
EWB 例题		247
EWB 习题		249
第 8 章	直流稳压电源	250
8.1	直流电源的组成及各部分作用	250
8.2	小功率整流电路	251
8.2.1	单相半波整流电路	251
8.2.2	单相桥式整流电路	252
8.3	小功率滤波电路	254
8.3.1	电容滤波电路	255
8.3.2	电感滤波电路	256
8.3.3	倍压整流电路	257
8.4	串联反馈式稳压电路	257
8.4.1	稳压电路的质量指标	257
8.4.2	串联反馈式稳压电路的工作原理	258
8.4.3	三端集成稳压器	260
8.5	串联型开关式稳压电路	266
习题		267
EWB 例题		273
EWB 习题		274
参考文献		276
附录	EWB 软件简介	277

第 1 章 常用半导体器件

半导体器件是现代电子技术的重要组成部分,由于它具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点,从而得到了广泛的应用。特别是近几十年来,中、大规模集成电路乃至超大规模集成电路的不断涌现,使电子设备在微型化、可靠性和电子系统设计的灵活性等方面有了重大的进步,电子技术对人类进入信息社会起到了不可估量的推动作用。

本章首先简要地介绍了半导体的基础知识,接着讨论半导体的核心环节——PN 结,对它的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数以及二极管电路及其分析方法与应用作了详细的讨论。在此基础上,详细讨论了几种特殊二极管的工作原理,同时,对三极管和场效应管的特点、特性曲线和工作原理也作了详细的分析。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 半导体及其结构

人们对半导体的利用始于 19 世纪 90 年代,但是对于半导体材料的大量使用却是开始于 20 世纪的中叶,半导体材料的导电性能介于导体和绝缘体之间,它的导电机理比较复杂。要想从电路的观点理解由半导体材料制造的电子器件的工作原理,必须从物理的角度了解它们是如何工作的。

在半导体中存在两种不同的载流子(多数载流子和少数载流子),每一种载流子既可借助漂移作用来载运电流,也可利用扩散作用来载运电流。因此电流的流动就有可能是四种不同的过程所导致的。常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;掺杂或制成其他化合物半导体的材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)、锑(Sb)等。其中硅是目前最常用的一种半导体材料。半导体除了导电性能方面和导体、绝缘体不同外,它还具有不同于其他物质的特点,例如,温度和光照对它的导电能力有很大的影响。如果同时在纯净的半导体中加入微量的杂质,其导电能力也会有明显的增加。

锗和硅是制作电子器件中用得最多的半导体材料。它们都是四价元素,最外层轨道上有 4 个电子,称为价电子,可以认为它们是由 4 个价电子和一个具有 +4 电荷的离子核心(原子核)构成的,价电子环绕原子核运行,每一个原子呈现电中性。半导体的性质和价电子有关。半导体与金属和许多绝缘体一样,也具有晶体结构,它的原子有序的排列,临近的原子由共价键连接在一起,它的简化原子模型如

图 1.1 所示,其简化的共价键结构模型如图 1.2 所示。

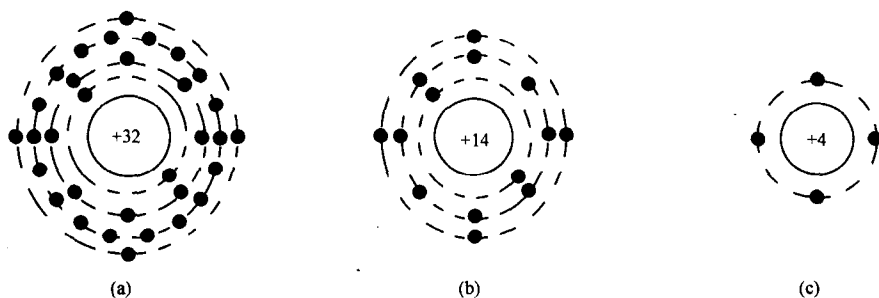


图 1.1 锗、硅的原子模型和简化模型

(a) 锗原子; (b) 硅原子; (c) 简化模型

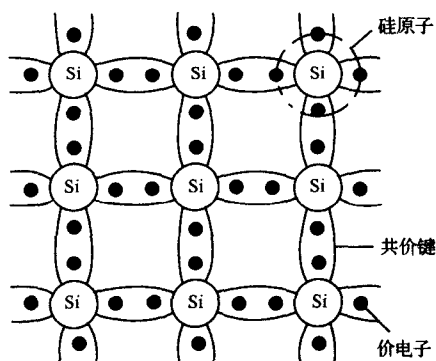


图 1.2 硅晶体中的共价键结构示意图

1.1.2 本征半导体、空穴及其导电作用

1. 本征半导体

纯净的、没有结构缺陷的半导体叫做本征半导体。一般情况下,价电子被束缚于共价键中。但是,价电子的这种被束缚状态并不是牢不可破的。只要给这些价电子以足够的能量(如升高温度),使原子在晶格中的热扰动加强,就可以使价电子脱离共价键的束缚,成为自由电子,参与导电,这种现象叫做“本征激发”。本征激发所需的能量决定于物质的性质。对于锗,至少需要 0.67eV 的能量,才能激发出自由电子;硅至少需要 1.1eV 的能量。

2. 空穴

当价电子挣脱束缚成为自由电子后,在原来的共价键处就留下一个空位,这个

空位就叫做“空穴”。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。空穴可以认为是一个与电子的负电荷 $-q$ 数值相等的正电荷 $+q$ 。这是因为,当原子失去一个价电子后,它本身不再是电中性的,而成为 $+q$ 了,它具有从另外原子中俘获一个电子的能力。一旦它得到一个电子,空穴就移至另外的原子。这时失去了价电子的邻近共价键中出现的空穴又可以吸引其邻近的价电子来填补,从而又出现一个空穴。如此进行下去,就相当于空穴在移动。空穴是带正电的,价电子填充空穴的移动相当于带正电荷的粒子(空穴)的移动,也会形成电流。可以看出,空穴也像自由电子一样,可以在晶格中自由移动,不过它移动的方向正好与自由电子的运动方向相反,如图 1.3 所示。

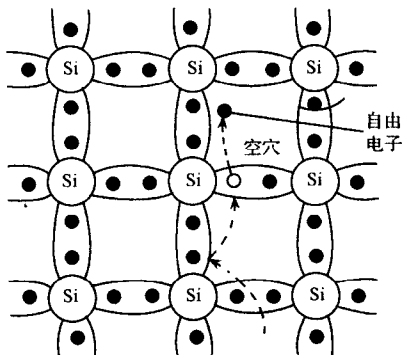


图 1.3 空穴和电子的形成

在外电场的作用下,空穴的运动方向与电场方向相同,即由空穴运动形成的电流与电场方向相同;自由电子所形成的电子流与电场方向相反,即电子所形成的电流也与电场方向相同。而金属只有电子导电一种作用。这是与半导体导电机理的根本区别。

在本征半导体中,空穴和自由电子总是成对出现的。也就是说,有一个自由电子就必定有一个空穴。因此在本征半导体中空穴和自由电子的数目总是相等的。没有外电场时,电子和空穴的运动都是无规律的,不能形成电流。在外加电场作用下,共价键中的电子沿与电场相反的方向运动,填补空位。这就表现为空穴沿电场方向移动。这时,半导体中出现两部分电流:即自由电子做定向移动而形成的电子电流和仍被原子核束缚的价电子递补空穴而形成的空穴电流。因此,在半导体中的电流等于电子电流与空穴电流的总和。可以看出,半导体导电具有电子导电和空穴导电两种方式,为此,自由电子和空穴都称为载流子。两种载流子同时参与导电是半导体导电方式的最大特点,也是半导体和金属在导电原理上的本质区别所在。

自由电子会不会填补空穴呢?会的,自由电子填补空穴叫做复合。在一定的温度下,本征半导体中的电子空穴对的数目保持一定,也就是说,电子和空穴对不断产生,同时又不断复合,处于一种动态平衡状态。温度愈高,载流子数目愈多,导电能力也愈强。所以,温度是影响半导体导电能力的一个很重要的外部因素。

不过需要注意的是,空穴导电不能看成是正离子的运动,因为离子质量很大,它们被束缚在晶格内,本身不能移动,空穴导电归根到底还是电子运动的结果,不过不是导电电子,而是大量价电子运动的表现,相当于使一个电离的原子通过俘获另一个原子的价电子,将电离状态移至另一个原子的结果。

1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入少量的杂质就会明显改善半导体的导电性能,实践证明,能明显改善锗和硅的电导率的材料有两类,即三价元素,如硼、铝、镓、铟等;五价元素,如磷、锑等。

根据所掺的杂质的性质,可以将杂质半导体分为两类,即 P 型半导体和 N 型半导体。

1. N 型半导体

在纯净半导体中掺入极微量的五价元素时,由于杂质极少,可以认为半导体的晶格结构基本没有改变,每一个杂质原子都被锗(或硅)原子所包围,彼此的价电子

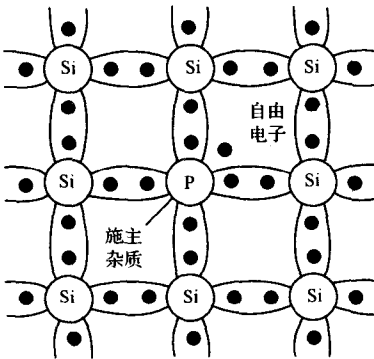


图 1.4 硅晶体中掺入磷元素

形成共价键,但是由于磷原子有五个价电子,只需要四个价电子即足以与临近的锗(或硅)原子的价电子形成共价键,这就多出一个电子,这个多余的电子没有被束缚在共价键中,虽然受到磷原子核的正电荷吸引,但是这种吸引作用比较弱,只要给它较小的能量,就能够使它摆脱吸引,成为导电电子。而原来的磷原子则因失去一个电子,成为带正电的磷离子,如图 1.4 所示。可以看出掺入五价元素后,半导体内的导电电子数目大大增加,远大于空穴的数目,这种半导体叫做 N 型半导体。

因为掺入的杂质是导电电子的主要来源,所以叫施主杂质。在 N 型半导体中,电子叫做多数载流子(多子),空穴叫做少数载流子(少子)。需要注意的是,此时半导体仍是电中性,在产生导电电子的同时,并没有产生相应的空穴。

2. P 型半导体

如果在本征硅(或锗)中掺入少量的三价元素(如硼),由于杂质只有三个价电子,因此它与附近的硅原子形成共价键时,还缺少一个电子。这样,在硼原子处就具有从附近的硅原子夺取一个价电子来填充这个共价键的能力。夺取了临近的价电子之后,就在附近的硅原子中产生一个空穴,硼原子多获得一个电子,就变成带负电荷的硼离子,如图 1.5 所示。这样,半导体内掺入三价元素后,空穴数

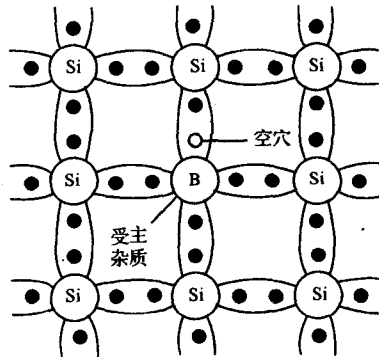


图 1.5 硅晶体中掺入硼元素

目大大增加,远大于导电电子的数目,因此这种半导体叫做P型半导体。因为掺入的杂质是从其他硅原子中夺取价电子,所以叫受主杂质。在P型半导体中,空穴是多数载流子,电子是少数载流子。同样要注意的是,对于整体来说,半导体仍是电中性。

不论是N型半导体还是P型半导体,尽管都有一种载流子占多数,但是整个晶体仍是电中性的。需要强调的是,不论是在N型半导体中的正离子还是P型半导体中的负离子,都被束缚于晶格中,不能参与导电,只有载流子(电子和空穴)才是产生电流的源泉。

1.1.4 PN结的形成及其特性

1. PN结的形成

如前所述,P型半导体中含有受主杂质,在室温下,受主杂质电离为带正电的空穴和带负电的受主离子。N型半导体中含有施主杂质,在室温下,施主杂质电离为带负电的电子和带正电的施主离子。如果在一块半导体上用杂质补偿的方法在它的各个部分掺入不同的杂质,以使一部分呈N型导电性,另一部分呈P型导电性,在两区的交界处即为PN结。

在N型半导体和P型半导体结合后,在它们的交界处就会形成电子和空穴的浓度差别,N型区内电子很多而空穴很少,P型区内则相反,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。因此有一些电子要从N型区向P型区扩散,也有一些空穴要从P型区向N型区内扩散。由于电子和空穴都带电,扩散的结果是P区和N区原有的电中性被破坏了。P区失去空穴,留下了带负电的杂质离子;N区失去电子,留下带正电的杂质离子。但是,这些离子并不能移动,被束缚在晶格中,这些不能移动的带电粒子称为空间电荷,很明显,它们集中在P区和N区交界面附近,形成了一个很薄的空间电荷区,如图1.6所示,这就是所谓的PN结。在这个区域内多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,因此空间电荷区有时又称耗尽区,它的电阻率很高,扩散越强,空间电荷区越宽。不过要注意的是,在空间电荷区外的P区和N区内仍然是电中性。

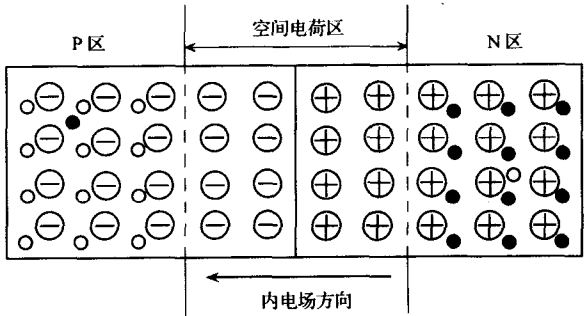


图 1.6 PN 结的形成