

21

高等学校信息工程类专业“十三五”规划教材

电子线路基础

(第三版)

闵锐 徐勇 孙峥 何敏 编著

DIANZI XIANLU JICHU



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

非外借

高等学校信息工程类专业“十三五”规划教材

电子线路基础

(第三版)

闵锐 徐勇 孙峥 何敏 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是在第二版基础上,结合教学改革与实践修订而成的。本书既注重对基本概念、基本原理的阐述,又兼顾了电子技术的发展趋势,适当地增加了集成电路、电子电路仿真软件 Multisim 等方面的内容。在文字叙述上力求简洁清楚、层次分明。为便于掌握重点和难点内容,改编了部分例题和习题,尽量做到例题典型、习题与知识点相匹配。

全书共 10 章,内容包括常用半导体器件、基本放大电路、多级放大电路和集成运算放大电路、放大电路的频率响应、放大电路中的反馈、信号的运算和处理电路、信号产生与转换电路、直流稳压电源、集成门电路、电子电路仿真软件 Multisim。

本书可作为高等院校电子信息、通信、电气、自动化、计算机等专业的教科书,也可供其他相关专业和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

电子线路基础/闵锐等编著. —3 版. —西安:西安电子科技大学出版社,2018.4

ISBN 978-7-5606-4903-0

I. ① 电… II. ① 闵… III. ① 电子线路 IV. ① TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 060273 号

策 划 马乐惠

责任编辑 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2018 年 4 月第 3 版 2018 年 4 月第 8 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20.5

字 数 481 千字

印 数 24 501~26 500 册

定 价 46.00 元

ISBN 978-7-5606-4903-0/TN

XDUP 5205003-8

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

电子技术的发展日新月异,各种各样的电子产品和电子设备已经渗入到人们的日常生活及各个领域。“电子线路”是高等院校电子信息、通信、电气、自动化和计算机等专业的一门专业技术基础课,主要讲授各种半导体器件的性能、电路及其应用。《电子线路基础(第二版)》经过多年的教学实践与应用,现结合高等教育的发展需要修订为第三版。

本书修订仍然遵循“先分立后集成、先小信号后大信号”的原则,以集成电路为主线,先介绍分立元件及其基本电路,如常用半导体器件及基本放大电路;再介绍集成电路的内部电路,如多级放大电路、差分放大电路、电流源电路、互补推挽功率放大电路;最后介绍集成运放的线性应用——信号的运算和处理电路,集成运放的非线性应用——信号产生与转换电路。本书将直流稳压电源放在第8章,同时为与数字电子技术课程衔接,在第9章介绍了集成门电路。第10章介绍了电子电路仿真软件 Multisim,便于教学过程中利用虚拟器实现电路仿真,巩固理论教学知识点,提高学生探寻问题、解决问题能力。

由于电子线路课程的概念多、器件多、工程应用背景强,多数学生在学习的过程中有畏难情绪,为便于学生理解,本次修订尽可能做到通俗易懂、层次分明,表述清楚,并增加了大量习题,以期通过丰富的题型拓展学生对各个知识点的理解。本书力求展现在学生面前的是一棵电子技术的“大树”,树干是集成电路,各章节为伸出的树枝,各知识点为树叶,整棵大树枝繁叶茂,脉络清晰。

本书可作为高等院校通信、电类专业学生的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

参加本书编写工作的有闵锐(第2、3、5章,第1章1.1、1.3、1.4节)、徐勇(第4、6、7章,第1章1.5节)、孙峥(第8、9章,第1章1.2节)、何敏(第10章及5、6、7章的部分习题)。闵锐同志为主编,负责全书的策划、组织和定稿,教研室的领导及同事们为本书的编写给予了大力支持和帮助,西安电子科技大学出版社马乐惠主任为本书的编辑和出版付出了辛勤的劳动,谨向他们表示诚挚的谢意。

由于我们的水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请使用本书的读者给予批评指正。

作 者

2018年1月

本书常用符号说明

一、关于基本符号和下标大写或小写的一般规定

1. 电压和电流

I_B 、 U_{BE}	大写字母、大写下标表示直流量
i_b 、 u_{be}	小写字母、小写下标表示交流瞬时值
$\dot{I}_B$ 、 $\dot{U}_{BE}$	小写字母、大写下标表示总瞬时量(既包含直流,也包含交流)
I_b 、 U_{be}	大写字母、小写下标表示交流有效值
$\dot{I}_b$ 、 $\dot{U}_{be}$	大写字母顶上加点、小写下标表示正弦相量

2. 直流电压源

U_{CC}	双极型三极管集电极直流电源电压
U_{BB}	双极型三极管基极直流电源电压
U_{EE}	双极型三极管发射极直流电源电压
U_{DD}	场效应管漏极直流电源电压
U_{GG}	场效应管栅极直流电源电压
U_{SS}	场效应管源极直流电源电压

3. 电阻

R	直流电阻或静态电阻
r	交流电阻或动态电阻

二、基本符号

1. 电流和电压

I 、 i	电流的通用符号
U 、 u	电压的通用符号
$\dot{I}_i$ 、 $\dot{U}_i$	输入电流、输入电压
$\dot{I}_o$ 、 $\dot{U}_o$	输出电流、输出电压
$\dot{I}_f$ 、 $\dot{U}_f$	反馈电流、反馈电压
I_Q 、 U_Q	电流、电压静态值
i_+ 、 u_+	集成运放同相输入电流、输入电压
i_- 、 u_-	集成运放反相输入电流、输入电压
u_{ic} 、 u_{id}	共模输入电压、差模输入电压
Δu_{ic} 、 Δu_{id}	共模输入电压增量、差模输入电压增量
u_s	交流信号源电压
U_{OH} 、 U_{OL}	电压比较器的输出高电平、低电平
U_{T+} 、 U_{T-}	电压比较器的上、下门限电压

2. 功率

P	功率的通用符号
P_{om}	最大输出功率
P_V	直流电源提供的功率
P_T	三极管耗散功率
η	效率

3. 频率

f	频率通用符号
f_H	放大电路的上限截止频率
f_L	放大电路的下限截止频率
f_c	使放大电路增益为 0 dB 时的信号频率
f_0	电路的振荡频率、中心频率
ω	角频率通用符号
f_{BW}	通频带

4. 电阻、电容、电感、阻抗

R_i 、 R_o	输入电阻、输出电阻
R_{if} 、 R_{of}	负反馈放大电路的输入电阻、输出电阻
R_L	负载电阻
R_s	信号源内阻
G	电导通用符号
C	电容通用符号
L	电感通用符号

5. 放大倍数、增益

A	放大倍数或增益的通用符号
A_{uc}	共模电压放大倍数
A_{ud}	差模电压放大倍数
$\dot{A}_u$	电压放大倍数
$\dot{A}_{us}$	源电压放大倍数
$\dot{A}_{uf}$	闭环电压放大倍数
F	反馈系数
K_{CMR}	共模抑制比

三、器件符号

1. PN 结

C_b	势垒电容
C_d	扩散电容
C_j	结电容
U_{ho}	PN 结平衡时的电压

2. 二极管

V_D	二极管
V_{DZ}	稳压二极管
I_D	二极管的电流
I_F	二极管的最大整流平均电流
I_R	二极管的反向电流
I_S	二极管的反向饱和电流
r_d	二极管导通时的动态电阻
U_{on}	二极管的导通电压
$U_{(BR)}$	二极管的击穿电压
r_z	稳压管工作在稳压状态下的动态电阻
U_Z	稳压管工作电压
I_{DZ}	稳压管工作电流

3. 三极管

V	三极管
b	基极
c	集电极
e	发射极
α	三极管共基交流电流放大系数
$\bar{\alpha}$	三极管共基直流电流放大系数
β	三极管共射交流电流放大系数
$\bar{\beta}$	三极管共射直流电流放大系数
C_π	混合 π 等效电路中集电结的等效电容
C_μ	混合 π 等效电路中发射结的等效电容
g_m	跨导
h_{11e} 、 h_{12e} 、 h_{21e} 、 h_{22e}	三极管 h 参数等效电路的四个参数
I_{CBO}	发射极开路时 b、c 之间的反向电流
I_{CEO}	基极开路时 c、e 之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
$r_{bb'}$	基区体电阻
r_{be}	共射接法下 b、e 之间的小信号等效电阻
U_{CES}	三极管饱和压降
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路, c、b 之间的反向击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路, c、e 之间的反向击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路, e、b 之间的反向击穿电压

4. 场效应管

V	场效应管
d	漏极

g	栅极
s	源极
g_m	跨导
I_{DO}	增强型场效应管 $U_{GS}=2U_{GS(th)}$ 时的漏极电流
I_{DSS}	耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的漏极电流
$U_{GS(off)}$	耗尽型场效应管的夹断电压
$U_{GS(th)}$	增强型场效应管的开启电压

目 录

第 1 章 常用半导体器件	1	2.3 放大电路静态工作点的稳定	63
1.1 半导体基础知识	1	2.3.1 静态工作点稳定的必要性	63
1.1.1 本征半导体	2	2.3.2 稳定静态工作点的措施	64
1.1.2 杂质半导体	4	2.3.3 分压式射极偏置电路的分析	65
1.1.3 PN 结	4	2.4 共集放大电路和共基放大电路	69
1.2 半导体二极管	9	2.4.1 共集放大电路	70
1.2.1 半导体二极管的结构和符号	9	2.4.2 共基放大电路	72
1.2.2 二极管的伏安特性	10	2.4.3 三种组态电路的比较	74
1.2.3 二极管的主要参数	11	2.5 场效应管放大电路	74
1.2.4 二极管的等效模型	11	2.5.1 场效应管的特点	74
1.2.5 稳压二极管	14	2.5.2 场效应管放大电路的三种 组态电路	75
1.3 半导体三极管	16	2.5.3 场效应管放大电路的直流偏置 电路及静态分析	75
1.3.1 三极管的结构及符号	16	2.5.4 场效应管放大电路的动态分析	76
1.3.2 三极管的工作原理	17	习题	82
1.3.3 三极管的特性曲线	20	第 3 章 多级放大电路和集成运算 放大电路	89
1.3.4 三极管的主要参数	22	3.1 多级放大电路	89
1.3.5 温度对三极管参数的影响	24	3.1.1 多级放大电路的耦合方式	89
1.4 场效应管	26	3.1.2 多级放大电路的动态分析	92
1.4.1 结型场效应管	26	3.2 差分放大电路	94
1.4.2 绝缘栅型场效应管	30	3.2.1 差分放大电路的电路组成	94
1.4.3 场效应管的主要参数	35	3.2.2 差分放大电路的分析	94
1.5 集成电路中的元器件	36	3.2.3 改进型差分放大电路	100
习题	39	3.3 电流源电路	101
第 2 章 基本放大电路	44	3.3.1 基本电流源电路	101
2.1 放大电路的基本概念	44	3.3.2 多路电流源电路	104
2.1.1 基本放大电路的组成和 工作原理	44	3.3.3 以电流源为有源负载的 放大电路	105
2.1.2 放大电路的性能指标	46	3.4 功率放大电路	105
2.1.3 直流通路和交流通路	49	3.4.1 功率放大电路概述	105
2.1.4 静态工作点的设置	49	3.4.2 互补功率放大电路	108
2.2 放大电路的分析方法	50		
2.2.1 图解分析法	50		
2.2.2 小信号模型分析法	57		

3.4.3 集成功率放大电路	114	5.4.2 深度负反馈条件下放大 倍数的估算	171
3.5 集成运算放大电路	115	5.5 负反馈放大电路的稳定性	176
3.5.1 集成运放的结构特点	115	5.5.1 负反馈放大电路产生自激振荡的 原因和条件	176
3.5.2 集成运放的主要性能指标	116	5.5.2 负反馈放大电路稳定性的判定 ...	177
3.5.3 典型集成运放电路介绍	117	5.5.3 负反馈放大电路自激振荡的 消除方法	179
3.5.4 理想运算放大器	118	习题	181
习题	119		
第4章 放大电路的频率响应	126	第6章 信号的运算和处理电路	186
4.1 频率响应问题概述	126	6.1 比例运算电路	186
4.1.1 频率响应问题的提出	126	6.1.1 反比例运算电路	186
4.1.2 频率响应线性失真问题	126	6.1.2 同比例运算电路	187
4.1.3 频率响应问题的分析方法	129	6.2 基本运算电路	188
4.2 三极管的高频等效特性	132	6.2.1 加法电路	188
4.2.1 晶体三极管的完整小信号模型 ...	132	6.2.2 减法电路	189
4.2.2 晶体管高频模型的简化	133	6.2.3 积分电路	190
4.2.3 场效应管的高频等效模型	134	6.2.4 微分电路	191
4.3 单管放大电路的频率响应	134	6.3 对数指数运算电路	193
4.3.1 单管共射放大器的频率响应	134	6.3.1 对数运算电路	194
4.3.2 单管共源放大电路的频率响应 ...	141	6.3.2 指数运算电路	194
4.3.3 单管共基放大电路的频率响应 ...	141	6.4 模拟乘法器	195
4.4 多级放大电路的频率特性	144	6.4.1 模拟乘法器的基本概念	195
4.4.1 共射—共射放大器的频率特性 ...	145	6.4.2 模拟乘法器在运算 电路中的应用	198
4.4.2 共射—共基放大器的频率特性 ...	146	6.5 有源滤波电路	200
4.4.3 多级放大器频率特性的一般 分析方法	147	6.5.1 滤波电路的基本概念	200
4.5 集成运放的频率响应与相位补偿	147	6.5.2 一阶有源滤波电路	202
4.5.1 集成运放的频率响应	147	* 6.5.3 二阶有源滤波电路	204
4.5.2 集成运放的相位补偿	148	习题	207
习题	151		
第5章 放大电路中的反馈	155	第7章 信号产生与转换电路	213
5.1 反馈的基本概念	155	7.1 电压比较器	213
5.2 反馈放大电路的类型及判别	157	7.1.1 单限比较器	214
5.2.1 反馈的分类	157	7.1.2 迟滞比较器	215
5.2.2 负反馈的四种组态	160	7.1.3 双限比较器	217
5.3 负反馈对放大电路性能的改善	165	7.1.4 典型例题讲解	219
5.3.1 稳定放大倍数	165	7.1.5 比较器部分小结	221
5.3.2 减小非线性失真	166	7.2 非正弦波发生器	221
5.3.3 展宽通频带	166	7.2.1 方波和矩形波发生器	221
5.3.4 改变输入电阻和输出电阻	168	7.2.2 三角波与锯齿波发生器	224
5.4 深度负反馈放大电路的分析	171	7.3 正弦波发生器	227
5.4.1 深度负反馈的实质	171		

7.3.1 文氏桥正弦波发生器	228	9.2.3 其他类型的集成 TTL 门电路	276
7.3.2 移相式正弦波发生器	229	9.3 集成 CMOS 门电路	279
* 7.4 精密整流电路	231	9.3.1 CMOS 反相器	280
7.4.1 半波整流电路(零限幅器)	232	9.3.2 CMOS 与非门和或非门	280
7.4.2 全波整流电路(绝对值 运算电路)	233	9.3.3 CMOS 传输门和双向模拟开关	281
习题	235	9.3.4 CMOS 三态门和 OD 门	282
		9.3.5 Bi-CMOS 电路	283
第 8 章 直流稳压电源	244	9.4 集成门电路的使用	284
8.1 直流稳压电源的组成	244	习题	287
8.2 整流电路和滤波电路	244	第 10 章 电子电路仿真软件	
8.2.1 单相半波整流电路	245	Multisim	290
8.2.2 单相桥式整流电路	246	10.1 Multisim 仿真软件概述	290
8.2.3 滤波电路	248	10.2 Multisim 软件的基本功能	291
8.3 稳压管稳压电路	251	10.2.1 Multisim 基本操作	291
8.3.1 稳压电路的性能指标	252	10.2.2 电路的创建	292
8.3.2 稳压管稳压电路分析	252	10.2.3 虚拟仪器的使用	294
8.4 串联型稳压电路	254	10.3 Multisim 的基本分析方法	298
8.4.1 串联型稳压电路的工作原理	254	10.3.1 直流工作点分析	298
8.4.2 三端集成稳压器的原理	256	10.3.2 交流分析	299
8.4.3 三端集成稳压器的应用	258	10.3.3 瞬态分析	301
* 8.5 开关型稳压电路	260	10.4 Multisim 在电子线路基础中的 应用	302
习题	262	10.4.1 静态工作点设置对电路 性能的影响	302
第 9 章 集成门电路	266	10.4.2 负反馈对放大电路性能的 改善	304
9.1 分立元件门电路	266	10.4.3 集成运算放大电路	309
9.1.1 基本门电路	266	习题	315
9.1.2 复合门电路	269	参考文献	316
9.2 集成 TTL 门电路	270		
9.2.1 集成 TTL 门电路的工作原理	270		
9.2.2 集成 TTL 门电路的主要 特性与参数	273		

第 1 章 常用半导体器件

本章讨论的主要问题

- 半导体有哪些特殊性质？
- N 型半导体和 P 型半导体各有什么特点？
- PN 结的主要特性是什么？
- PN 结上的端电压与电流是否符合欧姆定律？
- 半导体二极管是否具有放大作用？
- 稳压二极管是二极管吗？它通常工作在什么区？
- 为什么半导体三极管和场效应管能作为放大器件？
- 为了保证三极管具有放大作用，其内部应具有什么样的结构条件？外部加电原则是什么？
- 三极管的电流分配关系如何？
- 如何表示三极管的伏安特性和场效应管的伏安特性？它们的输出特性有何区别？
- 表征场效应管放大作用的重要参数是什么？何为场效应管的开启电压和夹断电压？

1.1 半导体基础知识

自然界中存在着许多不同的物质，根据其导电性能的不同大体可分为导体、绝缘体和半导体三大类。通常将很容易导电、电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质，称为导体，例如铜、铝、银等金属材料；将很难导电、电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质，称为绝缘体，例如塑料、橡胶、陶瓷等材料；将导电能力介于导体和绝缘体之间、电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的物质，称为半导体。常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。

用半导体材料制作电子元器件，不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是由于其导电能力会随着温度的变化、光照或掺入杂质的多少发生显著的变化，这就是半导体的热敏特性、光敏特性和掺杂特性。例如，纯净的半导体硅，当温度从 30°C 升高到 40°C 时，电阻率减小一半^①。又如，纯净硅在室温时的电阻率为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，如果在纯净硅中掺入百万分之一浓度的磷原子，此时硅的纯度仍可高达 99.9999%，但它的电阻率却下降到 $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$ ，几乎减少到原来的百万分之一。可见，当半导体受热或掺入杂质后，导电性能会发生变化。人们利用半导体的热敏特性和光敏特性可制作各种热敏元件和光敏元件，利用掺杂特性制成的 PN 结是各种半导体器件的主要组成部分。

半导体为什么会具有这样一些特殊的性质呢？由于物质的导电性能取决于原子的外层结构，下面通过半导体材料的特殊结构来了解它的导电性能。

^① 而金属铜，当温度从 30°C 升高到 100°C 时，电阻率的减少还不到 1/2。

1.1.1 本征半导体

纯净的单晶半导体称为本征半导体，即不含任何杂质，结构完整的半导体。

1. 本征半导体的晶体结构

常用的半导体材料硅(Si)和锗(Ge)的原子序数分别为 14 和 32，它们的原子结构如图 1-1(a)和(b)所示。由图可见，硅和锗原子的最外层轨道上都有四个电子，同属于四价元素。由于内层电子受原子核的束缚力很大，很难脱离原子核，为简化起见，将内层电子和原子核看成一个整体，称为惯性核，它的净电量是四个正电子电量。最外层的四个电子受原子核的束缚力较小，有可能成为自由电子，常称为价电子。硅或锗原子的简化模型如图 1-1(c)所示。

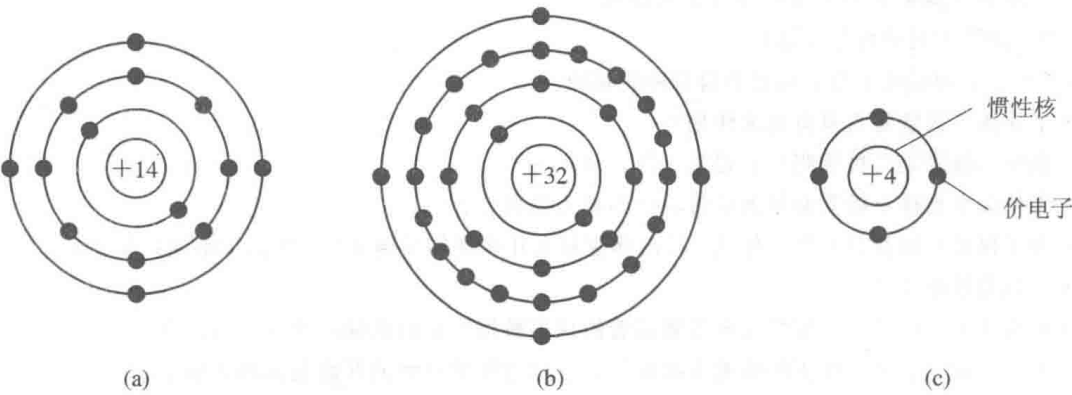


图 1-1 硅和锗的原子结构模型
(a) 硅；(b) 锗；(c) 原子简化模型

原子在晶体中按一定几何规律排列的空间格架叫晶格。整块晶体内部原子排列规律相同，晶格位相一致的晶体称为单晶体。硅和锗的单晶体即为本征半导体。硅或锗制成单晶体后，相邻两个原子的一对最外层电子(即价电子)不但受本身原子核的吸引，而且受相邻原子核的吸引，从而将两个原子牢固地束缚在一起，这种共用价电子所形成的束缚作用就叫共价键。硅或锗原子最外层的四个价电子，正好和相邻的四个原子中的价电子组成四个共用电子对，构成四个共价键，使每个硅或锗原子的最外层电子获得稳定结构，如图 1-2 所示。

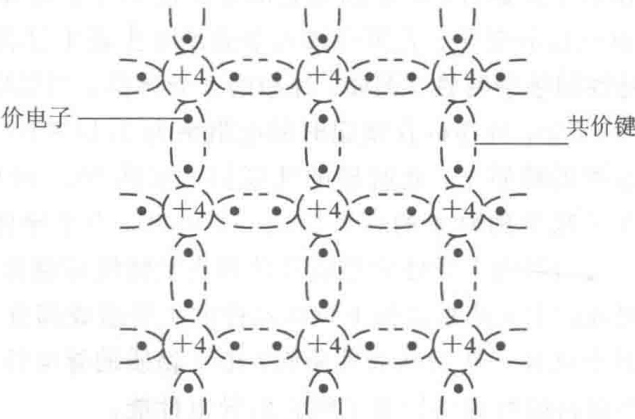


图 1-2 硅和锗晶体共价键结构示意图

2. 本征半导体中的两种载流子

在绝对零度($T = -273^{\circ}\text{C}$ 或 $T = 0\text{ K}$)下,本征半导体中的每个价电子都被束缚在共价键中,不存在自由运动的电子,本征半导体相当于绝缘体。但在室温下($T = 27^{\circ}\text{C}$ 或 $T = 300\text{ K}$),本征半导体中一部分价电子因受热而获得足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子,与此同时,在该共价键上留下了空位,这个空位称为空穴。由于本征半导体在室温下每产生一个自由电子必然会有一个空穴出现,即电子与空穴成对产生,称之为电子—空穴对。这种由于本征半导体受热而产生电子—空穴对的现象称为本征激发。

本征激发产生的空穴很容易被邻近共价键中的价电子所填补,这样,空穴就转移到邻近的共价键中,而新的空穴又被其邻近的价电子所填补,这说明空穴是能够运动的,其运动的实质是价电子填补空位的运动,空穴的运动方向与价电子的运动方向相反,如图 1-3 所示。通常,将运载电荷的粒子称为载流子,由于带负电荷的价电子依次填补空穴的作用与带正电荷的粒子作反方向运动的作用效果相同,因此可把空穴看成是带正电荷的粒子,即空穴也是一种载流子,它所带电量与电子电量相等,符号相反。

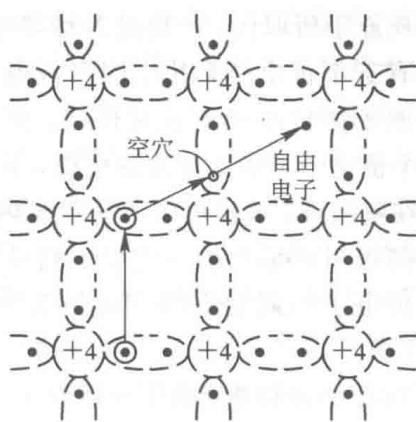


图 1-3 电子—空穴对的产生和空穴的移动

通过上述分析可知,本征半导体导电依靠两种载流子——自由电子和空穴。一方面,本征激发能使本征半导体内自由电子和空穴成对产生;另一方面,有些自由电子和空穴在运动中相遇,空穴又被自由电子填入,电子—空穴成对消失,这种现象称为复合。

3. 热平衡载流子的浓度

在本征半导体中不断地进行着激发与复合两种相反的过程,当温度一定时,两种状态达到动态平衡,即本征激发产生的电子—空穴对,与复合的电子—空穴对数目相等,这种状态称为热平衡状态。

半导体中自由电子和空穴的多少分别用浓度(单位体积中载流子的数目) n_i 和 p_i 来表示。处于热平衡状态下的本征半导体,其载流子的浓度是一定的,并且自由电子的浓度和空穴的浓度相等。根据半导体物理中的有关理论,可以证明

$$n_i = p_i = KT^{3/2} e^{-E_{g0}/(2kT)} \quad (1-1)$$

式中,浓度单位为 cm^{-3} , K 是常量(硅为 $3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$, 锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$), T 为热力学温度, k 是玻尔兹曼常数($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), E_{g0} 是 $T = 0\text{ K}$ (即 -273°C)时的禁带宽度(硅为 1.21 eV , 锗为 0.785 eV)。

式(1-1)表明,本征半导体的载流子浓度和温度、材料有关。尽管本征半导体在室温情况下具有一定的导电能力,但是,本征半导体中载流子的数目远小于原子数目,因此本征半导体的导电能力是很低的。

1.1.2 杂质半导体

利用半导体的掺杂特性，人为地在本征半导体中掺入少量的其他元素(这些元素相对于本征半导体就是杂质)，可使半导体的导电性能发生显著的变化。掺入杂质的半导体称为**杂质半导体**。根据掺入的杂质不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在纯净的单晶体硅中，掺入微量的五价杂质元素，如磷、砷、锑等，使原来晶格中的某些硅原子被杂质原子所取代，便构成 **N 型半导体**。由于杂质原子有五个价电子，其中四个价电子与相邻的四个硅原子的价电子形成共价键，还剩一个价电子，这个价电子不受共价键的束缚，只受原子核的吸引，在室温下，该价电子所获得的热能使它摆脱原子核的吸引而成为自由电子，则杂质原子因失去一个价电子而成为不能移动的杂质正离子，如图 1-4 所示。

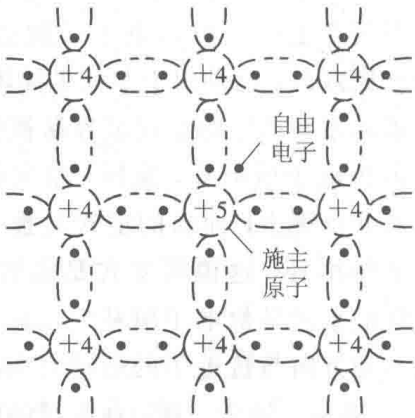


图 1-4 N 型半导体结构示意图

在 N 型半导体中，由于杂质原子产生自由电子的同时并不产生空穴，因此自由电子的浓度远大于空穴的浓度，故称自由电子为**多数载流子**(简称多子)，空穴为**少数载流子**(简称少子)。由于五价杂质原子能释放出电子，因此这类杂质原子称为**施主原子**。

2. P 型半导体

在纯净的单晶硅中掺入微量的三价杂质元素，如硼、镓、铟等，便构成 **P 型半导体**。由于杂质原子只有三个价电子，当杂质原子替代硅原子的位置后，杂质原子的三个价电子仅与相邻的三个硅原子的价电子形成共价键，与第四个相邻的硅原子不能构成完整的共价键而出现一个空位。这个空位极易接受其他硅原子共价键中的价电子，使杂质原子成为带负电的杂质负离子，同时硅原子的共价键中因缺少一个价电子而产生一个空穴，如图 1-5 所示。

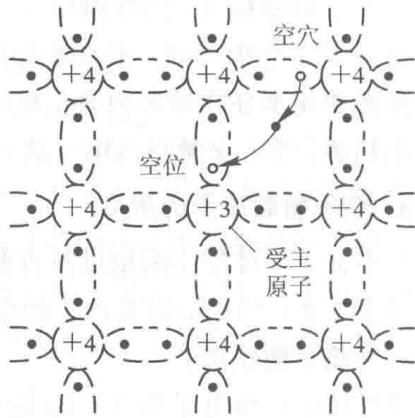


图 1-5 P 型半导体结构示意图

由于三价杂质原子所产生的空位起着接受电子的作用，因此称之为**受主原子**。在 P 型半导体中，由于掺入的是三价杂质元素，使空穴浓度远大于自由电子浓度，因此空穴为多数载流子，自由电子是少数载流子。

1.1.3 PN 结

在一块完整的本征半导体硅或锗片上，利用不同的掺杂工艺，使其一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，在它们的交界处便形成 **PN 结**。

半导体器件的核心是 PN 结。半导体二极管是单个 PN 结；半导体三极管具有两个 PN 结；场效应管的基本结构也是 PN 结。下面介绍 PN 结的形成及其主要特性。

1. PN 结的形成

在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面，由于载流子浓度的差别，载流子会从浓度高的区域向浓度低的区域产生**扩散运动**。即 P 型区的多子(空穴)向 N 型区扩散，N 型区的多子(自由电子)向 P 型区扩散，如图 1-6(a)所示。扩散的结果是在交界面附近，P 型区一侧由于失去空穴而留下了不能移动的杂质负离子，N 型区一侧由于失去电子而留下了不能移动的杂质正离子。扩散到对方的载流子成为异型半导体中的少数子而与该区的多子复合，这样，在交界面两侧就出现了由不能移动的杂质正负离子构成的**空间电荷区**，也就是 PN 结，如图 1-6(b)所示。由于空间电荷区中的载流子已经复合掉或者说消耗尽了，因此空间电荷区又可称为**耗尽层**。随着多子扩散运动的进行，空间电荷区交界面两侧的离子电荷量增多，空间电荷区加宽，而空间电荷区以外的 P 型区和 N 型区仍处于热平衡状态且保持电中性。

在空间电荷区里，由于杂质正负离子的极性相反，于是产生了由带正电的 N 型区指向带负电的 P 型区的电场，因为这个电场是由内部载流子扩散运动形成的，故称为**内电场**。在内电场的作用下，少数载流子产生漂移运动，N 型区的少数子(空穴)漂移到 P 型区，P 型区的少数子(自由电子)漂移到 N 型区。这样，从 N 型区漂移到 P 型区的空穴填补了原来交界面上 P 型区所失去的空穴，从 P 型区漂移到 N 型区的自由电子填补了原来交界面上 N 型区所失去的自由电子，漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。显然，同类型载流子漂移运动的方向与扩散运动的方向相反。由于内电场阻止多子的扩散运动、增强少子的漂移运动，因此又将这个空间电荷区称为**阻挡层**。

当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时，由多子扩散运动所形成的扩散电流和少子的漂移运动所形成的漂移电流相等，且两者方向相反，此时，空间电荷区的宽度一定，PN 结电流为零。在动态平衡时，由内电场产生的电位差称为**内建电位差** U_{ho} ，如图 1-6(c)所示。处于室温时，锗的 $U_{ho} \approx 0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ ，硅的 $U_{ho} \approx 0.5 \sim 0.7 \text{ V}$ 。

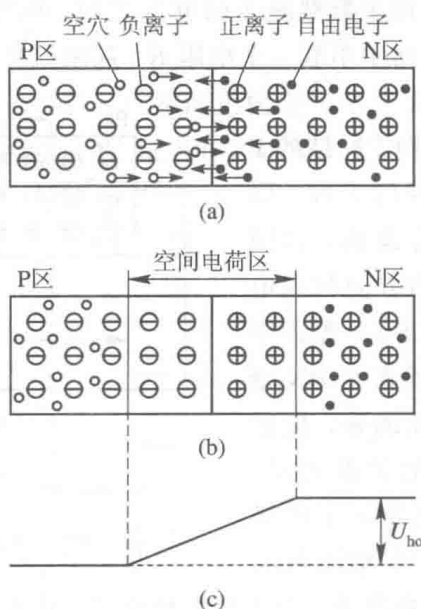


图 1-6 PN 结的形成

(a) 载流子的扩散运动；(b) 空间电荷区；(c) 电位分布

由上述分析可知，若 P 型和 N 型半导体的掺杂浓度不同，空间电荷区内正、负离子的宽度也将不同，P 型区和 N 型区的掺杂浓度相等时，正离子区与负离子区的宽度也相等，称为**对称 PN 结**；当两边掺杂浓度不等时，浓度高的一侧的离子区宽度低于浓度低的一侧，称为**不对称 PN 结**。其中，P 型区掺杂浓度大于 N 型区的称为 P^+N 结；N 型区掺杂浓度大于 P 型区的称为 N^+P 结。

2. PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加电压，动态平衡将遭到破坏，扩散电流和漂移电流不再相等，PN 结中将有电流流过。外加电压的极性不同，PN 结所呈现的导电性能也不同。

1) 正向特性

若 PN 结外加正向电压，即 PN 结的 P 区接电源的正极，N 区接电源的负极，则称 PN 结处于**正向偏置**，简称**正偏**，如图 1-7 所示。此时，外加电压的方向与内电场方向相反，在外电场的作用下，N 型半导体中性区中的自由电子向空间电荷区移动，与空间电荷区中的正离子中和，P 型半导体中性区中的空穴向空间电荷区移动，与空间电荷区的负离子中和，而中性区失去的自由电子和空穴则由外电源源源不断地向 N 型区和 P 型区注入，结果是空间电荷区变窄，内电场减弱。由于多子的扩散运动大于少子的漂移运动，因此当外加电压增大到一定值以后，扩散电流将大大增加。可见，正向偏置时，PN 结中的电流主要是由扩散运动所形成的**扩散电流**，它是两种多数载流子的电流之和，称为**正向电流**。为了防止 PN 结因电流过大而损坏，通常在回路中串联一个电阻 R ，起限流作用。

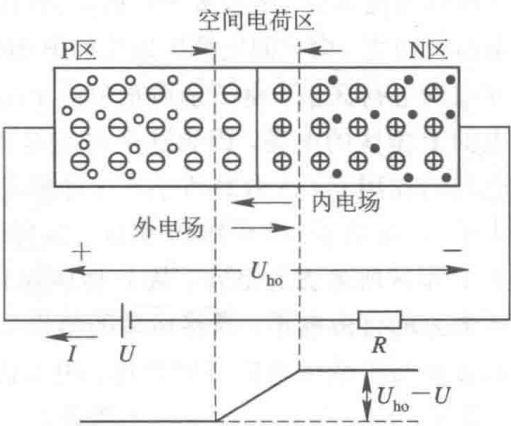


图 1-7 PN 结外加正向电压时导通

2) 反向特性

若 PN 结外加反向电压，即 PN 结的 P 区接电源的负极，N 区接电源的正极，则称 PN 结处于**反向偏置**，简称**反偏**，如图 1-8 所示。此时，外加电压的方向与内电场方向相同，在外电场的作用下，P 型区中的空穴和 N 型区中的自由电子离开 PN 结而使空间电荷区变宽，内电场加强，促进少子的漂移运动，阻止多子的扩散运动。此时，流过 PN 结的电流主要是少子的漂移电流，外电路电流方向与 PN 结正偏时的正向电流方向相反，称为**反向电流**。由于少数载流子是由本征激发产生的，其浓度很低，因此反向电流数值很小。在一定的温度下，当外加反向电压超过某个数值（约为零点几伏）后，反向电流将不再随着外加反向电压的增加而增大，故又称为**反向饱和电流**，用 I_s 表示。

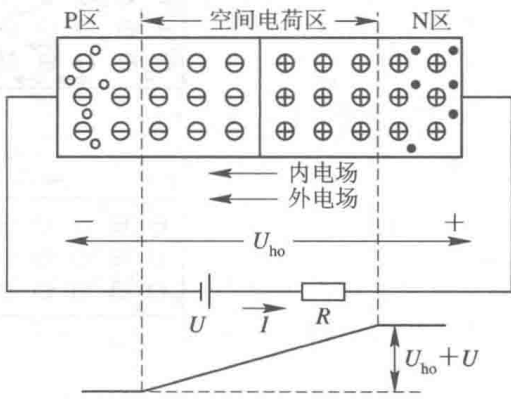


图 1-8 PN 结外加反向电压时截止