

21世纪

高等教育·独立学院规划教材



模拟电子技术

主编 / 江小安

主审 / 孙肖子

模拟电子技术
MONIDIANZIJISHU



西北大学出版社
NORTHWEST UNIVERSITY PRESS

陕西省教育厅重点教材建设项目

模拟电子技术

主 编 / 江小安

副主编 / 邵思飞 沈金根 高 丽



西北大学出版社
NORTHWEST UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 江小安主编. — 西安: 西北大学出版社, 2006.10

ISBN 7-5604-2164-4

I. 模... II. 江... III. 模拟电路-电子技术
IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第118435号

模拟电子技术

主 编 江小安

出版发行 西北大学出版社

社 址 西安市太白北路 229 号

电 话 029 - 88303042

邮政编码 710069

经 销 新华书店

印 刷 陕西向阳印务有限公司

版 次 2006 年 10 月第 1 版

印 次 2006 年 10 月第 1 次印刷

开 本 787×1092 1/16

印 张 14.25

字 数 330 千字

印 数 1—2000

书 号 ISBN 7-5604-2164-4/TN·7

定 价 22.00 元

前 言

本教材是陕西省教育厅为适应高等教育发展的需要,培养本科应用型人才而组织编写的高等教育规划教材。

编写本教材的指导思想是:适当压缩理论部分,突出基本要求及与技能和实践有关的部分,减少数学公式的推导,尽可能地从物理概念去描述问题的实质。

模拟电子技术工程性质较强,在分析问题时往往为了突出主要因素而忽略一些次要因素,采用了近似分析和计算的方法。学习本课程除理论部分外,还应同步开出实验内容,有条件的学校建议同时开设“电子设计自动化”(EDA)课程。做实验时首先在计算机上虚拟模拟现实,然后再用硬件实现,这样可以加深对该课程内容的理解和掌握,同时也能掌握先进的电子技术设计工具和方法。

建议授课时数 74 学时。理论课 54 学时(通信、电子信息工程专业至少授课 64 学时,其他专业可以参考此学时数,对内容进行适当地调整和增减),实验课 20 学时。

西安电子科技大学江小安担任主编,同时负责全书的统纂。延安大学创新学院邵思飞、西北工业大学明德学院沈金根、西安工业大学高丽担任副主编。西安电子科技大学江小安、延安大学创新学院邵思飞、西安工业大学高丽编写第一章、第二章、第三章;李传荣编写第四章、第五章、第六章;宫丽编写第七章;侯亚玲编写第八章。

西安电子科技大学孙肖子教授担任本书的主审,仔细阅读了全部书稿并提出了宝贵的修改意见,在此致以衷心的感谢。

由于时间和水平有限,本书难免会存在一些问题和错误之处,望使用本书的老师、学生和广大读者批评指正。

编 者

2006 年 10 月

符号说明

一、基本符号

q	电荷	L	电感
φ	磁通	C	电容
I, i	电流	M	互感
U, u	电压	Z	阻抗
P, p	功率	X	电抗
W, w	能量	Y	导纳
R, r	电阻	B	电纳
G, g	电导	A	放大倍数

二、电压、电流

英文小写字母 $u(i)$, 其下标若为英文小写字母, 则表示交流电压(电流)瞬时值(例如, u_o 表示输出交流电压瞬时值)。

英文小写字母 $u(i)$, 其下标若为英文大写字母, 则表示含有直流的电压(电流)瞬时值(例如, u_o 表示含有直流的输出电压瞬时值)。

英文大写字母 $U(I)$, 其下标若为英文小写字母, 则表示正弦电压(电流)有效值(例如, U_o 表示输出正弦电压有效值)。

英文大写字母 $U(I)$, 其下标若为英文大写字母, 则表示直流电压(电流)有效值(例如, U_o 表示输出直流电压)。

$\dot{U}, \dot{I}$	正弦电压、电流相量(复数量)
U_m, I_m	正弦电压、电流幅值
U_Q, I_Q	电压、电流的静态值
U_f, I_f	反馈电压、电流有效值
U_{CC}, U_{EE}	集电极、发射极直流电源电压
U_{BB}	基极直流电源电压
U_{DD}, U_{SS}	漏极和源极直流电源电压
U_s, I_s	直流电压源、电流源
u_s, i_s	正弦电压源、电流源
U_i	输入电压有效值
u_i	含有直流成分输入电压瞬时值
u_i	输入电压瞬时值
U_o, I_o	输出交流电压、电流有效值
u_o	含有直流成分输出电压的瞬时值

U_R	基准电压、参考电压、二极管最大反向工作电压
I_R	参考电流、二极管反向电流
U_-, I_-	运放同相端输入电压、电流
U_-, I_-	运放反相端输入电压、电流
U_{id}	差模输入电压信号
U_{ic}	共模输入电压信号
U_{oim}	整流或滤波电路输出电压中基波分量的幅值
U_{CEQ}	集电极、发射极间静态压降
U_{OH}	运放输出电压的最高电压
U_{OL}	运放输出电压的最低电压
I_{BQ}	基极静态电流
I_{CQ}	集电极静态电流
ΔU_{CE}	直流变化量
Δi_c	瞬时值变化量

三、电阻

R_s	信号源内阻
r_i	输入电阻
r_o	输出电阻
r_{if}	具有反馈时的输入电阻
r_{of}	具有反馈时的输出电阻
r_{id}	差模输入电阻
$R_i(R')$	运放输入端的平衡电阻
R_w	电位器(可变电阻器)
R_c	集电极外接电阻
R_b	基极偏置电阻
R_e	发射极外接电阻
R_L	负载电阻

四、放大倍数、增益

A_u	电压放大倍数 $A_u = U_o / U_i$
A_{us}	考虑信号源内阻时电压放大倍数 $A_{us} = U_o / U_s$, 即源电压放大倍数
A_{ud}	差模电压放大倍数
A_{uc}	共模电压放大倍数
A_{od}	开环差模电压放大倍数
A_{usm}	中频电压放大倍数
A_{usl}	低频电压放大倍数
A_{ush}	高频电压放大倍数

A_f	闭环放大倍数
A_{uf}	具有负反馈的电压放大倍数,即闭环电压放大倍数
A_i	开环电流放大倍数
A_{if}	闭环电流放大倍数
A_r	开环互阻放大倍数
A_{rf}	闭环互阻放大倍数
A_g	开环互导放大倍数
A_{gf}	闭环互导放大倍数
F	反馈系数
A_p	功率放大倍数

五、功率

p	瞬时功率
P	平均功率(有功功率)
Q	无功功率
$\tilde{S}$	复功率
S	视在功率
λ	功率因数
P_o	输出信号功率
P_c	集电极损耗功率
P_E, P_s	直流电源供给功率

六、频率

f	频率通用符号
ω	角频率通用符号
$f_H(f_h)$	放大电路的上限截止频率。此时放大电路的放大倍数为 $A_{ush}=0.707A_{usm}$
$f_L(f_l)$	放大电路的下限截止频率。此时, $A_{usl}=0.707A_{usm}$
f_{BW}	通频带(带宽) $f_{BW}=f_H-f_L$
f_{Hf}	具有负反馈时放大电路的上限截止频率
f_{Lf}	具有负反馈时放大电路的下限截止频率
f_{BWf}	具有负反馈时的通频带
f_α	共基极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
f_β	共射极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
f_T	三极管的特征频率
ω_0	谐振角频率、振荡角频率
f_0	振荡频率

七、器件参数

V_D	二极管
-------	-----

U_T	温度电压当量 $U_T = kT/q$ 、增强型场效应管的开启电压
I_D	二极管电流,漏极电流
I_S	反向饱和电流,源极电流
I_F	最大整流电流
U_{on}	二极管开启电压
U_B	PN 结击穿电压,基极直流电压
V_{Dz}	稳压二极管
U_z	稳压管稳定电压值
I_z	稳压管工作电流
I_{zmax}	最大稳定电流
r_z	稳压管的微变电阻
b	基极
c	集电极
e	发射极
I_{CBO}	发射极开路、集-基极间的反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路、集-射极间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
P	空穴型半导体
N	电子型半导体
n	电子浓度
p	空穴浓度
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻
r_{be}	共射接法下,基-射极间的微变电阻
r_{ce}	共射接法下,集-射极间的微变电阻
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,或 $\bar{\alpha} = I_C / I_E$
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 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
$\bar{\beta}$	共射接法下,不考虑穿透电流时 I_C 与 I_B 的比值
g_m	跨导
BU_{EBO}	集电极开路时 e-b 间的击穿电压
BU_{CEO}	基极开路时 c-e 间的击穿电压
U_{IO}, I_{IO}	集成运放输入失调电压、失调电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
V	三极管
S_R	集成运放的转换速率
D	场效应管漏极
G	场效应管栅极

S	场效应管源极、整流电路的脉动系数
U_P	场效应管夹断电压
r_{DS}	场效应管漏源间的等效电阻
I_{DSS}	结型、耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的 I_D 值
CMRR	共模抑制比
CMR	用分贝表示的共模抑制比,即 $20\lg\text{CMRR}$
Q	静态工作点、LC 回路的品质因数
τ	时间常数
η	效率
$\varphi(\theta)$	相角
φ_F	反馈网络的相移

目录

CONTENTS

第一章 半导体器件

1.1 半导体基础知识	/1
1.1.1 本征半导体	/1
1.1.2 杂质半导体	/2
1.2 PN 结	/3
1.2.1 异型半导体接触现象	/3
1.2.2 PN 结的单向导电特性	/3
1.2.3 PN 结的击穿	/5
1.2.4 PN 结的电容效应	/5
1.2.5 半导体二极管	/6
1.2.6 稳压二极管	/10
1.2.7 二极管的应用	/11
1.2.8 其他二极管	/13
1.3 半导体三极管	/14
1.3.1 三极管的结构及类型	/14
1.3.2 三极管的 3 种连接方式	/15
1.3.3 三极管的放大作用	/15
1.3.4 三极管的特性曲线	/18
1.3.5 三极管的主要参数	/20
1.3.6 温度对三极管参数的影响	/21
思考题和习题	/23

第二章 放大电路分析基础

2.1 放大电路工作原理	/26
2.1.1 放大电路的组成原理	/26
2.1.2 直流通路和交流通路	/27
2.2 放大电路的直流工作状态	/27
2.2.1 解析法确定静态工作点	/28
2.2.2 图解法确定静态工作点	/28
2.2.3 电路参数对静态工作点的影响	/30
2.3 放大电路的动态分析	/31

2.3.1	图解法分析动态特性	/31
2.3.2	放大电路的非线性失真	/32
2.3.3	微变等效电路法	/34
2.3.4	3种基本组态放大电路的分析	/36
2.4	静态工作点的稳定及其偏置电路	/42
2.5	多级放大电路	/47
2.5.1	多级放大电路的耦合方式	/47
2.5.2	多级放大电路的指标计算	/50
2.6	放大电路的频率特性	/53
2.6.1	频率特性的一般概念	/53
2.6.2	三极管的频率参数	/55
2.6.3	共e极放大电路的频率特性	/58
2.6.4	多级放大电路的频率特性	/65
2.7	差动放大器	/67
2.7.1	零点漂移	/67
2.7.2	差动放大电路	/68
	思考题和习题	/80

第三章 场效应管放大电路

3.1	结型场效应管	/90
3.1.1	结构	/90
3.1.2	工作原理	/91
3.1.3	特性曲线	/92
3.2	绝缘栅场效应管	/94
3.2.1	N沟道增强型 MOS 场效应管	/94
3.2.2	N沟道耗尽型 MOS 场效应管	/95
3.3	场效应管的主要参数	/98
3.3.1	直流参数	/98
3.3.2	交流参数	/98
3.3.3	极限参数	/99
3.4	场效应管的特点	/99
3.5	场效应管放大电路	/100
3.5.1	静态工作点与偏置电路	/101
3.5.2	场效应管的微变等效电路	/103
3.5.3	共源极放大电路	/104
3.5.4	共漏放大器(源极输出器)	/104
	思考题和习题	/106

第四章 负反馈放大电路

4.1 负反馈的基本概念	/109
4.1.1 负反馈的基本组成	/109
4.1.2 反馈的基本关系式	/110
4.2 负反馈放大电路类型及其判别	/110
4.2.1 反馈放大电路分类	/111
4.2.2 负反馈放大电路的4种基本组态	/112
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	/117
4.3.1 对放大倍数和放大倍数稳定性的影响	/117
4.3.2 改善输出波形的非线性失真	/117
4.3.3 展宽放大电路的通频带	/118
4.3.4 负反馈对输入电阻的影响	/118
4.3.5 负反馈对输出电阻的影响	/119
4.4 负反馈放大电路的计算	/120
4.4.1 深度负反馈放大电路的计算	/120
4.4.2 串联电压负反馈估算	/121
4.4.3 串联电流负反馈估算	/121
4.4.4 并联电压负反馈估算	/122
4.4.5 并联电流负反馈估算	/123
思考题和习题	/124

第五章 集成运算放大器

5.1 集成运算放大器简介	/127
5.1.1 集成运算放大器的电路构成及特点	/127
5.1.2 主要技术指标	/129
5.2 理想集成运放及其分析特点	/130
5.2.1 集成运放的理想化	/130
5.2.2 集成运放的传输特性	/132
5.3 集成运算放大器的线性应用	/133
5.3.1 比例运算电路	/133
5.3.2 加法运算电路	/135
5.3.3 积分和微分运算电路	/137
5.3.4 对数和指数运算电路	/139
5.4 有源滤波电路	/141
5.4.1 低通滤波电路	/142
5.4.2 高通滤波电路	/143
5.4.3 带通滤波电路和带阻滤波电路	/145
5.5 电压比较器	/146

5.5.1 简单电压比较器	/147
5.5.2 滞回比较器	/148
思考题和习题	/151

第六章 波形发生与变换电路

6.1 非正弦波发生器	/154
6.1.1 矩形波发生器	/155
6.1.2 三角波发生电路	/157
6.1.3 锯齿波发生电路	/158
6.1.4 波形变换电路	/159
6.2 正弦波发生电路	/160
6.2.1 反馈式正弦振荡器的组成及原理	/160
6.2.2 桥式 RC 振荡器	/161
思考题和习题	/163
附 录	/165

第七章 低频功率放大电路

7.1 低频功率放大电路概述	/168
7.1.1 分类	/168
7.1.2 功率放大器的特点	/169
7.1.3 提高输出功率的方法	/169
7.1.4 提高效率的方法	/170
7.2 互补对称功率放大电路	/171
7.2.1 双电源互补对称电路(OCL 电路)	/172
7.2.2 单电源互补对称电路(OTL 电路)	/177
7.2.3 实际功率放大电路举例	/177
7.3 集成功率放大器	/178
7.3.1 内部电路组成简介	/178
7.3.2 DG4100 集成功放的典型接线法	/179
思考题和习题	/180

第八章 直流电源

8.1 单相整流电路	/183
8.1.1 单相半波整流电路	/183
8.1.2 单相全波整流电路	/185
8.1.3 单相桥式整流电路	/187
8.2 滤波电路	/189
8.2.1 电容滤波电路	/189

8.2.2 其他形式的滤波电路	/191
8.3 倍压整流	/192
8.3.1 二倍压整流电路	/192
8.3.2 多倍压整流电路	/193
8.4 稳压电路	/193
8.4.1 稳压电路的主要指标	/194
8.4.2 硅稳压管稳压电路	/194
8.4.3 串联型稳压电路	/196
8.5 集成稳压电路	/200
8.5.1 基本应用电路	/200
8.5.2 扩大输出电流的电路	/200
8.5.3 扩大输出电压的电路	/201
8.5.4 输出电压可调的电路	/201
8.6 开关稳压电路	/201
8.6.1 串联型开关稳压电源	/202
8.6.2 并联型开关稳压电源	/205
思考题和习题	/207
参考文献	/210

第一章 半导体器件

晶体管电子电路的核心器件是晶体管,而晶体管是由半导体制成的。因此,在讲具体的电子电路之前,应先讲晶体管原理。而要搞清晶体管原理,必须了解半导体的性质及其导电特性。

1.1 半导体基础知识

物质按导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。

物质的导电特性取决于原子结构。导体一般为低价元素,如铜、铁、铝等金属,其最外层电子受原子核的束缚力很小,因而极易挣脱原子核的束缚成为自由电子。因此,在外电场作用下,这些电子产生定向运动(称为漂移运动)形成电流,呈现出较好的导电特性。高价元素(如惰性气体)和高分子物质(如橡胶、塑料)最外层电子受原子核的束缚力很强,极不易摆脱原子核的束缚成为自由电子,所以其导电性极差,可作为绝缘材料。而半导体材料最外层电子既不像导体那样极易摆脱原子核的束缚,成为自由电子;也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧,因此,半导体的导电特性介于二者之间。

1.1.1 本征半导体

纯净晶体结构的半导体称为本征半导体。常用的半导体材料是硅和锗,它们都是4价元素,在原子结构中最外层轨道上有4个价电子。为便于讨论,采用图1-1所示的简化原子结构模型。把硅或锗材料拉制成单晶体时,相邻两个原子的一对最外层电子(价电子)成为共有电子,它们一方面围绕自身的原子核运动,另一方面又出现在相邻原子所属的轨道上。即价电子不仅受到自身原子核的作用,同时还受到相邻原子核的吸引。于是,两个相邻的原子共有一对价电子,组成共价键结构。故晶体中,每个原子都和周围的4个原子用共价键的形式互相紧密地联系起来,如图1-2所示。

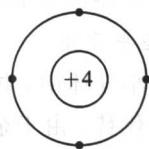


图 1-1 硅和锗简化原子结构模型

共价键中的价电子由于热运动而获得一定的能量,其中少数能够摆脱共价键的束缚而成为自由电子,同时必然在共价键中留下空位,称为空穴。空穴带正电,如图1-3所示。

在外电场作用下,一方面自由电子产生定向移动,形成电子电流;另一方面,价电子也按一定方向依次填补空穴,即空穴产生了定向移动,形成所谓空穴电流。

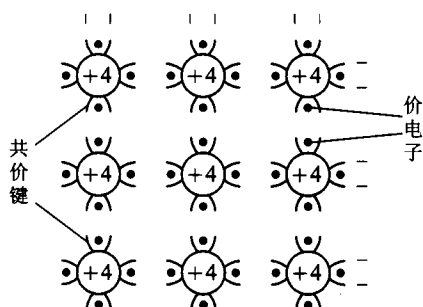


图 1-2 本征半导体共价键晶体结构示意图

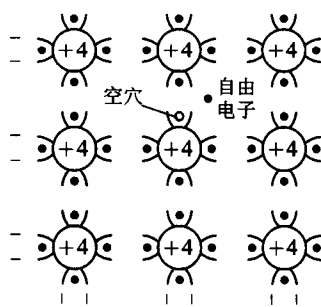


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

由此可见，半导体中存在着两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。本征半导体中，自由电子与空穴是同时成对产生的，因此，它们的浓度是相等的。我们用 n_i 和 p_i 分别表示电子和空穴的浓度，即 $n_i = p_i$ ，下标 i 表示为本征半导体。

价电子在热运动中获得能量产生了电子—空穴对。同时自由电子在运动过程中失去能量，与空穴相遇，使电子、空穴对消失，这种现象称为复合。在一定温度下，载流子的产生过程和复合过程是相对平衡的，载流子的浓度是一定的。本征半导体中载流子的浓度，除了与半导体材料本身的性质有关以外，还与温度有关，而且随着温度的升高，基本上按指数规律增加。因此，半导体载流子浓度对温度十分敏感。对于硅材料，大约温度每升高 8°C ，本征载流子浓度 n_i 增加 1 倍；对于锗材料，大约温度每升高 12°C ， n_i 增加 1 倍。除此之外，半导体载流子浓度还与光照有关，人们正是利用这一特性，制成光敏器件。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子，但因本征载流子的浓度很低，所以，它们的导电能力很差。当我们人为地、有控制地掺入少量的特定杂质时，其导电特性将产生质的变化。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中，掺入微量 5 价元素，如磷、锑、砷等，则原来晶格中的某些硅(锗)原子被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子，因此，它与周围 4 个硅(锗)原子组成共价键时，还多余 1 个价电子。它不受共价键的束缚，而只受自身原子核的束缚，因此，它只要得到较少的能量就能成为自由电子，并留下带正电的杂质离子，它不能参与导电，如图 1-4 所示。显然，这种杂质半导体中电子浓度远远大于空穴的浓度，即 $n_n \gg p_n$ (下标 n 表示是 N 型半导体)，主要靠电子导电，所以称为 N 型半导体。由于 5 价杂质原子可提供自由电子，故称为施主杂质。N 型半导体中，自由电子称为多数载流子，空穴称为少数载流子。

杂质半导体中多数载流子浓度主要取决于掺入的杂质浓度。由于少数载流子是半导体材料共价键提供的，因而其浓度主要取决于温度。此时电子浓度

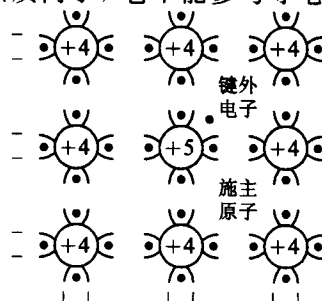


图 1-4 N 型半导体共价键结构

与空穴浓度之间,可以证明有如下关系:

$$n_n \cdot p_n = n_i p_i = n_i^2 = p_i^2$$

即在一定温度下,电子浓度与空穴浓度的乘积是一个常数,与掺杂浓度无关。

2. P 型半导体

在本征半导体中,掺入微量 3 价元素,如硼、镓、铟等,则原来晶格中的某些硅(锗)原子被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层只有 3 个价电子,当它和周围的硅(锗)原子组成共价键时,因为缺少一个电子,所以形成一个空位。其他共价键的电子,只需摆脱一个原子核的束缚,就转至空位上,形成空穴。因此,在较少能量下就可形成空穴,并留下带负电的杂质离子,它不能参与导电,如图 1-5 所示。显然,这种杂质半导体中空穴浓度远远大于电子浓度,即 $p_p \gg n_p$ (下标 p 表示是 P 型半导体),主要靠空穴导电,所以称为 P 型半导体。由于 3 价杂质原子可接受电子,相应地在邻近原子中形成空穴,故称为受主杂质。P 型半导体中,自由电子称为少数载流子,空穴称为多数载流子。

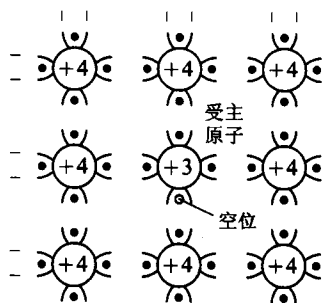


图 1-5 P 型半导体的共价键结构

P 型半导体与 N 型半导体虽然各自都有一种多数载流子,但对外仍呈现电中性。它们的导电特性主要由掺杂浓度决定。这两种掺杂半导体是构成各种半导体器件的基础。

1.2 PN 结

在一块本征半导体上,用工艺的办法使其一边形成 N 型半导体,另一边形成 P 型半导体,则在两种半导体的交界处形成了 PN 结。PN 结是构成其他半导体器件的基础。

1.2.1 异型半导体接触现象

在 P 型和 N 型半导体的交界面两侧,由于电子和空穴的浓度相差悬殊,因而将产生扩散运动。电子由 N 区向 P 区扩散;空穴由 P 区向 N 区扩散。由于它们均是带电粒子(离子),因而电子由 N 区向 P 区扩散的同时,在交界面 N 区剩下不能移动(不参与导电)的带正电的杂质离子;空穴由 P 区向 N 区扩散的同时,在交界面 P 区剩下不能移动(不参与导电)的带负电的杂质离子,于是形成了空间电荷区。在 P 区和 N 区的交界处形成了电场(称为自建场)。在此电场作用下,载流子将作漂移运动,其运动方向正好与扩散运动方向相反,阻止扩散运动。电荷扩散得越多,电场越强,因而漂移运动越强,对扩散的阻力越大。

当达到平衡时,扩散运动的作用与漂移运动的作用相等,通过界面的载流子总数为 0,即 PN 结的电流为 0。此时,在 PN 区交界处形成一个缺少载流子的高阻区,我们称为阻挡层(又称为耗尽层)。上述过程如图 1-6 所示。

1.2.2 PN 结的单向导电特性

在 PN 结两端外加不同方向的电压,就可以破坏原来的平衡,从而呈现出单向导电特性。