

高等学校教材

Linear
Electronic
Circuit

线性电子电路

江晓安 董秀峰 编著

Linear
Electronic
Circuit

Linear
Electronic
Circuit



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

高等学校教材

线性电子电路

江晓安 董秀峰 编著

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本教材是在第一版的基础上,广泛征求教学实施者的意见,重新修订而成的。

本书共分 10 章,内容包括半导体器件、放大电路分析基础、频率特性、场效应管放大电路、负反馈放大电路、直接耦合放大电路和集成运算放大器、集成运算放大器的应用、波形产生与变换电路、功率放大电路、直流电源等。作者在编写时力求精选内容,深入浅出,图文并茂,便于阅读。另外,每章均有一定量的例题和练习题。为便于读者自学,本书配有学习指导书,并与《数字电路》配套使用(也可单独使用)。教学时数约 72 学时(不含实验)。

本教材是编者基于 30 多年之教学经验,综合有关专业的大纲要求编写而成的。本教材有较宽的专业适应面,适用于高等学校电子信息类专业本科生及大专生使用,也可用作相关专业自考教材,还可供从事电子技术方面工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

线性电子电路

江晓安 董秀峰 编著

责任编辑 李惠萍 毛红兵

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)8227828 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西画报社印刷厂

版 次 2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 17.25

字 数 394 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 18.00 元

ISBN 7-5606-0230-4/TN·0070

XDUP 0435B01-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

本书是在原《模拟电子技术》(江晓安编,1983年西安电子科技大学出版社出版)的基础上,经过总结、提高、修改而成的。

本书保留了原版的特征。为适应相关专业的教学需要,本书将频率特性单列一章,全书共10章。第一至四章和第八至十章由江晓安负责修订,第五至七章由董秀峰负责修订,全书由江晓安定稿。

教师在讲授这门课程时可根据各专业的教学需要,对书中内容进行适当取舍。如通信专业和电子技术等专业,对频率特性要求较高,故这部分内容可作为一章讲授,而其它专业可将这部分内容进行定性的讲述。第八章波形产生电路部分,因为通信专业和电子技术专业后续还要开高频电子线路(非特性电子线路)课,所以此章正弦波振荡部分可不讲,非正弦波产生电路可放在第七章集成运放应用中讲述。

由于电子技术课程是一门主干专业基础课,故本科、专科对本门课程的基本要求是一致的,只是在深度和广度上有所区别。教师在讲述时应掌握好分寸。

本书适合用作高等院校电子信息类专业本科生“线性电子电路”(或“模拟电子技术”)课程的教材,专科学校相关专业也可选作教材,同时还适用于自考、夜大、函大作为相应专业的教材。

本书的再版得到了陕西省考试管理中心王巨勇同志和西安电子科技大学出版社的大力支持,在此表示感谢。

对于书中存在的缺点和错误,敬希读者批评指正。

编 者

2002年11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)(例如， U_o 表示输出直流电压)。

U, 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_i, I_i	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， $A_{ul}=0.707A_{usm}$
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
$I_{z\ max}$	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_{be}	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 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
β	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
$U_{\text{IO}}, I_{\text{IO}}$	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 $U_{\text{GS}}=0$ 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

第一章 半导体器件	1	2.5 多级放大电路	50
1.1 半导体基础知识	1	2.5.1 多级放大电路的耦合方式	50
1.1.1 本征半导体	1	2.5.2 多级放大电路的指标计算	53
1.1.2 杂质半导体	2	思考题和习题	56
1.2 PN 结	3	第三章 放大电路的频率特性	63
1.2.1 异型半导体接触现象	3	3.1 频率特性的一般概念	63
1.2.2 PN 结的单向导电特性	4	3.1.1 频率特性的概念	63
1.2.3 PN 结的击穿	5	3.1.2 线性失真	64
1.2.4 PN 结的电容效应	6	3.2 三极管的频率参数	65
1.2.5 半导体二极管	7	3.2.1 共发射极电流放大系数 β 的	
1.2.6 稳压二极管	10	截止频率 f_{β}	65
1.2.7 二极管的应用	12	3.2.2 特征频率 f_T	65
1.2.8 其它二极管	14	3.2.3 共基极电流放大系数 α 的	
1.3 半导体三极管	15	截止频率 f_{α}	66
1.3.1 三极管的结构及类型	15	3.2.4 三极管混合参数 π 型	
1.3.2 三极管的三种连接方式	16	等效电路	66
1.3.3 三极管的放大作用	16	3.3 共 e 极放大电路的频率特性	68
1.3.4 三极管的特性曲线	19	3.3.1 中频区放大倍数 A_{um}	69
1.3.5 三极管的主要参数	20	3.3.2 低频放大倍数 A_{ul} 及波特图	70
1.3.6 温度对三极管参数的影响	22	3.3.3 高频电压放大倍数 A_{uh}	
思考题和习题	24	及波特图	71
第二章 放大电路分析基础	27	3.3.4 完整的频率特性曲线(波特图)	73
2.1 放大电路工作原理	27	3.3.5 其它电容对频率特性的影响	74
2.1.1 放大电路的组成原理	27	3.4 多级放大电路的频率特性	75
2.1.2 直流通路和交流通路	28	3.4.1 多级放大电路的通频带 f_{bw}	75
2.2 放大电路的直流工作状态	29	3.4.2 上、下限频率的计算	76
2.2.1 解析法确定静态工作点	29	思考题和习题	77
2.2.2 图解法确定静态工作点	29	第四章 场效应管放大电路	79
2.2.3 电路参数对静态工作点		4.1 结型场效应管	79
的影响	31	4.1.1 结构	79
2.3 放大电路的动态分析	32	4.1.2 工作原理	80
2.3.1 图解法分析动态特性	32	4.1.3 特性曲线	81
2.3.2 放大电路的非线性失真	34	4.2 绝缘栅场效应管	83
2.3.3 微变等效电路法	36	4.2.1 N 沟道增强型 MOS 场效应管	83
2.3.4 三种基本组态放大电路		4.2.2 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管	84
的分析	38	4.3 场效应管的主要参数	87
2.4 静态工作点的稳定及其偏置电路	44	4.3.1 直流参数	87

4.3.2 交流参数	87	6.3.2 威尔逊电流源	136
4.3.3 极限参数	88	6.3.3 比例电流源	138
4.4 场效应管的特点	88	6.3.4 微电流源	139
4.5 场效应管放大电路	89	6.3.5 多路电流源	140
4.5.1 静态工作点与偏置电路	90	6.3.6 作为有源负载的电流源电路	141
4.5.2 场效应管的微变等效电路	92	6.4 集成运算放大器介绍	142
4.5.3 共源极放大电路	93	6.4.1 偏置电路	142
4.5.4 共漏放大器(源极输出器)	93	6.4.2 输入级	143
思考题和习题	95	6.4.3 中间级	143
第五章 负反馈放大电路	98	6.4.4 输出级和过载保护	144
5.1 反馈的基本概念	98	6.5 集成运放的性能指标	144
5.1.1 反馈的定义	98	思考题和习题	148
5.1.2 反馈类型及其判定	99	第七章 集成运算放大器的应用	152
5.1.3 负反馈放大器的四种基本组态	101	7.1 集成运放应用基础	152
5.2 负反馈对放大器性能的影响	105	7.1.1 低频等效电路	152
5.2.1 使放大器的放大倍数下降	105	7.1.2 理想集成运算放大电路	153
5.2.2 稳定被取样的输出信号	105	7.1.3 集成运放的线性工作区	153
5.2.3 使放大倍数的稳定性提高	106	7.1.4 集成运放的非线性工作区	154
5.2.4 可以展宽通频带	106	7.2 运算电路	155
5.2.5 对输入电阻的影响	107	7.2.1 比例运算电路	155
5.2.6 对输出电阻的影响	108	7.2.2 求和电路	158
5.2.7 减小非线性失真和抑制 干扰、噪声	109	7.2.3 积分电路和微分电路	161
5.3 负反馈放大器的指标计算	110	7.2.4 对数和指数运算电路	163
5.3.1 等效电路法	110	7.2.5 乘法运算电路	164
5.3.2 分离法	110	7.3 有源滤波电路	166
5.3.3 强负反馈放大器的增益估算法	110	7.3.1 低通滤波电路	168
5.4 负反馈放大器的自激振荡	114	7.3.2 高通滤波电路	170
5.4.1 产生自激振荡的原因及条件	114	7.3.3 带通滤波电路和带阻滤波电路	171
5.4.2 自激振荡的判断方法	114	7.4 电压比较器	172
5.4.3 常用的消除自激的方法	115	7.4.1 简单电压比较器	173
思考题和习题	116	7.4.2 滞回比较器	175
第六章 集成运算放大器	120	7.4.3 窗口比较器	180
6.1 零点漂移	121	思考题和习题	181
6.2 差动放大电路	121	第八章 波形产生电路与变换电路	191
6.2.1 基本形式	121	8.1 非正弦波产生电路	191
6.2.2 长尾式差动放大电路	124	8.1.1 矩形波产生电路	192
6.2.3 差动放大器的主要指标	126	8.1.2 三角波产生电路	194
6.2.4 具有调零电路的差动放大器	128	8.1.3 锯齿波产生电路	195
6.2.5 恒流源差动放大电路	129	8.1.4 波形变换电路	197
6.2.6 一般输入信号情况	130	8.2 集成函数发生器 ICL8038 简介	197
6.3 电流源电路	135	8.3 正弦波产生电路	200
6.3.1 镜像电流源电路	135	8.3.1 产生正弦波振荡的条件	200
		8.3.2 RC 正弦波振荡电路	202

8.3.3 LC 正弦波振荡电路	205	10.1.2 单相全波整流电路	232
思考题和习题	211	10.1.3 单相桥式整流电路	234
第九章 低频功率放大电路	214	10.2 滤波电路	235
9.1 低频功率放大电路概述	214	10.2.1 电容滤波电路	236
9.1.1 分类	214	10.2.2 其它形式的滤波电路	238
9.1.2 功率放大器的特点	215	10.3 倍压整流	240
9.1.3 提高输出功率的方法	215	10.3.1 二倍压整流电路	240
9.1.4 提高效率的方法	216	10.3.2 多倍压整流电路	240
9.2 互补对称功率放大电路	217	10.4 稳压电路	241
9.2.1 双电源互补对称电路 (OCL 电路)	218	10.4.1 稳压电路的主要指标	241
9.2.2 单电源互补对称电路 (OTL 电路)	223	10.4.2 硅稳压管稳压电路	241
9.2.3 实际功率放大电路举例	223	10.4.3 串联型稳压电路	244
9.3 集成功率放大器	225	10.5 集成稳压电路	248
9.3.1 内部电路组成简介	225	10.5.1 基本应用电路	248
9.3.2 DG4100 集成功放的 典型接线法	226	10.5.2 扩大输出电流的电路	248
思考题和习题	227	10.5.3 扩大输出电压的电路	248
第十章 直流电源	230	10.5.4 输出电压可调的电路	249
10.1 单相整流电路	230	10.6 开关型稳压电路	249
10.1.1 单相半波整流电路	230	10.6.1 串联型开关稳压电源	250
10.1.2 单相全波整流电路	232	10.6.2 并联型开关稳压电源	253
10.1.3 单相桥式整流电路	234	思考题和习题	255
10.2 滤波电路	235	参考文献	259
10.2.1 电容滤波电路	236		
10.2.2 其它形式的滤波电路	238		
10.3 倍压整流	240		
10.3.1 二倍压整流电路	240		
10.3.2 多倍压整流电路	240		
10.4 稳压电路	241		
10.4.1 稳压电路的主要指标	241		
10.4.2 硅稳压管稳压电路	241		
10.4.3 串联型稳压电路	244		
10.5 集成稳压电路	248		
10.5.1 基本应用电路	248		
10.5.2 扩大输出电流的电路	248		
10.5.3 扩大输出电压的电路	248		
10.5.4 输出电压可调的电路	249		
10.6 开关型稳压电路	249		
10.6.1 串联型开关稳压电源	250		
10.6.2 并联型开关稳压电源	253		
思考题和习题	255		
参考文献	259		

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，它们都是四价元素，在原子结构中最外层轨道上有四个价电子。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。

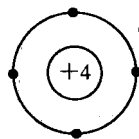


图 1-1 硅和锗简化原子结构模型

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。

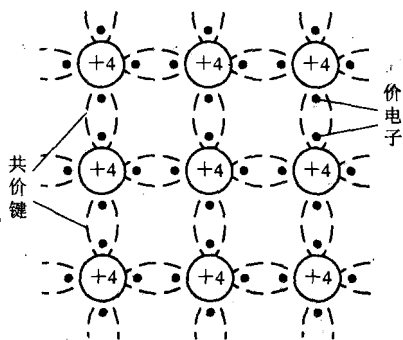


图 1-2 本征半导体共价键晶体结构示意图

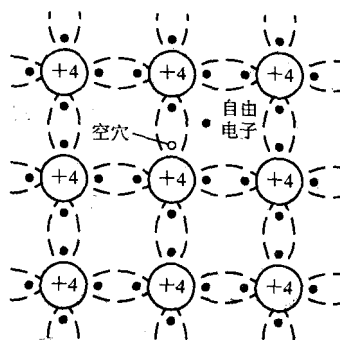


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

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 和 p 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，人们正是利用此特性，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

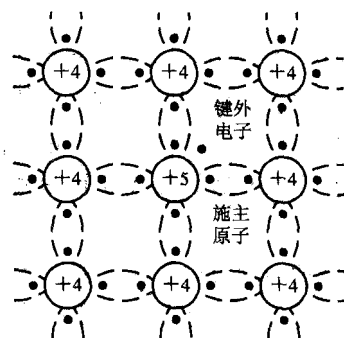


图 1-4 N 型半导体共价键结构

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。其它共价键的电子，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。

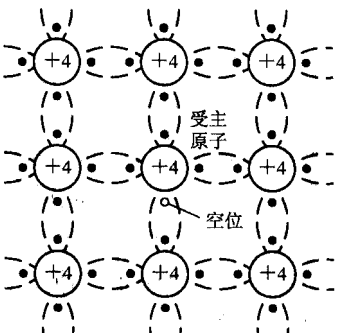


图 1-5 P 型半导体的共价键结构

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 结是构成其它半导体器件的基础。

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(a)、(b)所示。

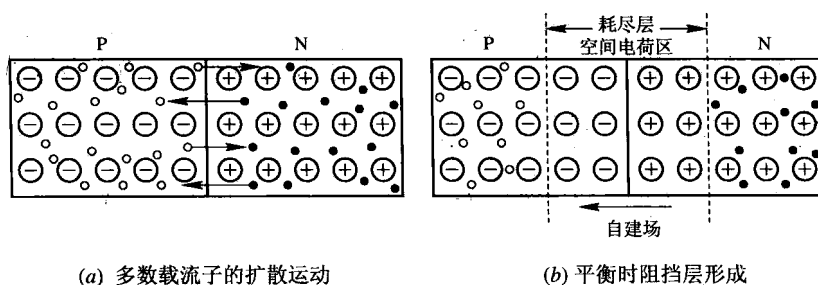


图 1-6 PN 结的形成

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。

1. PN 结外加正向电压

若将电源的正极接 P 区，负极接 N 区，则称此为正向接法或正向偏置。此时外加电压在阻挡层内形成的电场与自建场方向相反，削弱了自建场，使阻挡层变窄，如图 1-7(a) 所示。显然，扩散作用大于漂移作用，在电源作用下，多数载流子向对方区域扩散形成正向电流，其方向由电源正极通过 P 区、N 区到达电源负极。

此时，PN 结处于导通状态，它所呈现出的电阻为正向电阻，其阻值很小。正向电压愈大，正向电流愈大。其关系是指数关系：

$$I_D = I_S e^{\frac{U}{U_T}}$$

式中， I_D 为流过 PN 结的电流； U 为 PN 结两端电压； $U_T = \frac{kT}{q}$ ，称为温度电压当量，其中 k 为玻耳兹曼常数， T 为绝对温度， q 为电子的电量，在室温下即 $T = 300\text{ K}$ 时， $U_T = 26\text{ mV}$ ； I_S 为反向饱和电流。电路中的电阻 R 是为了限制正向电流的大小而接入的限流电阻。

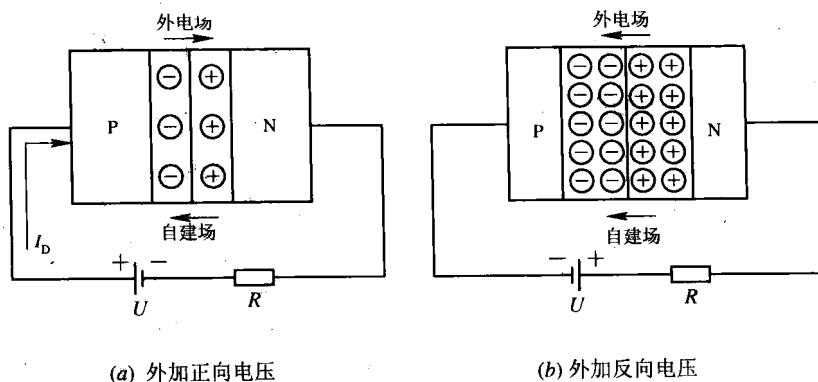


图 1-7 PN 结单向导电特性

2. PN 结外加反向电压

若将电源的正极接 N 区，负极接 P 区，则称此为反向接法或反向偏置。此时外加电压

在阻挡层内形成的电场与自建场方向相同,增强了自建场,使阻挡层变宽,如图 1-7(b)所示。此时漂移作用大于扩散作用,少数载流子在电场作用下作漂移运动,由于其电流方向与正向电压时相反,故称为反向电流。由于反向电流是由少数载流子所形成的,故反向电流很小,而且当外加反向电压超过零点几伏时,少数载流子基本全被电场拉过去形成漂移电流,此时反向电压再增加,载流子数也不会增加,因此反向电流也不会增加,故称为反向饱和电流,即 $I_D = -I_S$ 。

此时,PN 结处于截止状态,呈现的电阻称为反向电阻,其阻值很大,高达几百千欧以上。

综上所述:PN 结加正向电压,处于导通状态;加反向电压,处于截止状态,即 PN 结具有单向导电特性。

将上述电流与电压的关系写成如下通式:

$$I_D = I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

此方程称为伏安特性方程,如图 1-8 所示,该曲线称为伏安特性曲线。

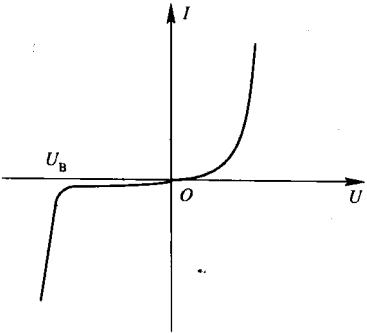


图 1-8 PN 结伏安特性

1.2.3 PN 结的击穿

PN 结处于反向偏置时,在一定电压范围内,流过 PN 结的电流是很小的反向饱和电流。但是当反向电压超过某一数值(U_B)后,反向电流急剧增加,这种现象称为反向击穿,如图 1-8 所示。 U_B 称为击穿电压。

PN 结的击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

当反向电压足够高时,阻挡层内电场很强,少数载流子在结区内受强烈电场的加速作用,获得很大的能量,在运动中与其它原子发生碰撞时,有可能将价电子“打”出共价键,形成新的电子、空穴对。这些新的载流子与原先的载流子一道,在强电场作用下碰撞其它原子打出更多的电子、空穴对,如此链锁反应,使反向电流迅速增大。这种击穿称为雪崩击穿。

所谓“齐纳”击穿,是指当 PN 结两边掺入高浓度的杂质时,其阻挡层宽度很小,即使外加反向电压不太高(一般为几伏),在 PN 结内就可形成很强的电场(可达 2×10^6 V/cm),将共价键的价电子直接拉出来,产生电子—空穴对,使反向电流急剧增加,出现击穿现象。

对硅材料的 PN 结,击穿电压 U_B 大于 7 V 时通常是雪崩击穿,小于 4 V 时通常是齐纳击穿; U_B 在 4 V 和 7 V 之间时两种击穿均有。由于击穿破坏了 PN 结的单向导电特性,因而一般使用时应避免出现击穿现象。

需要指出的是,发生击穿并不一定意味着 PN 结被损坏。当 PN 结反向击穿时,只要注意控制反向电流的数值(一般通过串接电阻 R 实现),不使其过大,以免因过热而烧坏 PN 结,当反向电压(绝对值)降低时,PN 结的性能就可以恢复正常。稳压二极管正是利用了 PN 结的反向击穿特性来实现稳压的,当流过 PN 结的电流变化时,结电压保持 U_B 基本不变。