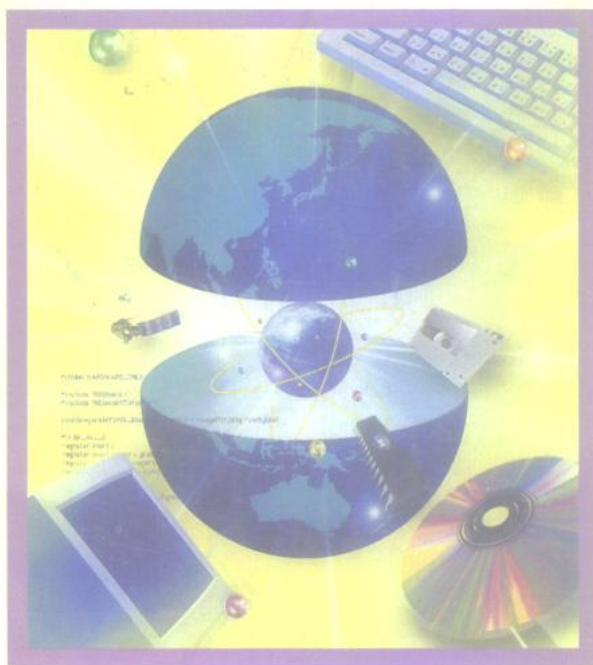


MO
DI
AN
Z
J
SHU

江晓安 编

模拟电子技术



西安电子科技大学出版社

模拟电子技术

江晓安 编

西安电子科技大学出版社

2000

(陕)新登字 010 号

内 容 简 介

本书内容包括：半导体器件；放大电路分析基础；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；波形发生与变换电路；功率放大电路；直流电源共九章。每章均有例题和练习题。为便于读者自学本书配有学习指导书，并与《数字电子技术》配套使用。教学时数约 72 学时(不含实验)。

编者积三十多年的教学经验，综合有关专业的大纲要求，写出适应面较宽的教材。本教材适用于高等工科院校有关专业本科生、大专生。也可供从事电子技术方面工作的工程技术人员学习参考。

模拟电子技术

江晓安 编著

责任编辑 王绍菊

西安电子科技大学出版社出版发行

西安兰翔印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张：16.5 字数：380 千字

1993 年 4 月第 1 版 2000 年 6 月第 10 次印刷 印数：66 501—76 500

ISBN 7-5606-0230-4/TP·0070(课) 定价：13.40 元

前 言

电子技术是目前发展最快的学科之一。随着科学技术的发展,许多专业相继开设了电子技术课程。

电子技术分为“模拟电子技术”和“数字电子技术”,它们均是学习其它有关课程的基础。本书只讨论“模拟电子技术”。

编写时我们注意了精选内容、突出重点,加强基本概念、基本原理、基本分析方法、基本单元电路的训练和培养。由于本课程的工程性强,因此在分析、计算时往往突出主要矛盾和主要问题,而忽略其次要因素,所以不追求数学上的严密性,而主要着重实用性及物理概念的清晰。

全书共分九章,第一章主要讲述半导体器件的工作原理,为学习以后各章创造必要的条件;第二章主要讨论了基本放大电路组成原理、工作状态的分析以及放大电路指标计算,这是本课程的重要基础;第三章为场效应管及其放大电路;第四章为负反馈放大电路,负反馈是改善放大电路性能的重要措施;第五章为直接耦合放大电路和集成运算放大电路;第六章为集成运算放大电路的应用;第七章为波形发生与变换电路;第八章为功率放大电路;第九章为直流电源。

为了方便读者自学,我们还编写了《模拟电子技术学习指导书》。书中讲述了学习要求、重点内容,并通过大量例子,讲述解题方法,使读者逐渐掌握分析问题、解决问题的思路和方法,并附有本书全部习题的题解。

本书适合做高等工科院校有关专业本科生“模拟电子技术”课程的教材;专科生教材;适用于自考、夜大、函大作为相应教材。

本书的出版过程中,得到西安电子科技大学吕建伟、王和平、付长进同志的支持。在此表示感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,本书一定会有不少问题,恳请读者和使用本书的教师批评、指正。

编者

1993年1月

符号说明

一、基本符号

I, i	电流
U, u	电压
P, p	功率
R, r	电阻
L	电感
C	电容
M	互感
A	放大倍数

二、电压、电流

小写 $u(i)$ 、小写下标表示交流电压(电流)瞬时值(例如, u_o 表示输出交流电压瞬时值)。

小写 $u(i)$ 、大写下标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)。

大写 $U(I)$ 、小写下标表示正弦电压(电流)有效值(例如, U_o 表示输出正弦电压有效值)。

大写 $U(I)$ 、大写下标表示直流电压(电流)(例如, U_o 表示输出直流电压)。

$\dot{U}, \dot{I}$	正弦电压、电流复数量
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	信号源电压有效值、源极电压
u_s	信号源交流电压瞬时值
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_{o1m}	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_S	场效应管外接源极电阻
r_i	输入电阻
r_o	输出电阻
r_{if}	具有反馈时输入电阻
r_{of}	具有反馈时输出电阻
r_{id}	差模输入电阻
$R_p(R')$	运放输入端的平衡电阻
R_W	电位器电阻器
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
R_D	漏极外接电阻
R_G	栅极外接电阻

四、放大倍数、增益

A_u	电压放大倍数 $A_u = \frac{U_o}{U_i}$
A_{us}	考虑信号源内阻时电压放大倍数 $A_{us} = \frac{U_o}{U_s}$ ，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_{uom}	中频电压放大倍数
A_{uol}	低频电压放大倍数
A_{uoh}	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_o	输出信号功率
P_c	集电极功率损耗
P_E	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	放大电路的上限截止频率。此时放大电路的放大倍数为 $A_{usi} = 0.707A_{um}$
f_l	放大电路的下限截止频率。此时， $A_{usi} = 0.707A_{um}$
f_{bw}	通频带 $f_{bw} = f_h - f_l$
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_o	谐振角频率、振荡角频率
f_o	振荡频率

七、器件参数

D	二极管
U_T	温度电压当量 $U_T = \frac{kT}{q}$ 、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
I_F	最大整流电流、源极电流
U_{on}	二极管开启电压

U_B	PN 结击穿电压、基极直流电压
D_z	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-基间反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路、集-射间穿透电流
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, 集射极之间的微变电阻
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 $\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e}$
$\bar{\alpha}$	从发射极到达集电极的载流子的百分数, 或 $\bar{\alpha} = \frac{I_c}{I_e}$
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 $\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$
$\bar{\beta}$	共射接法时, 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
T	三极管、温度、周期
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
φ	相角
φ_r	反馈网络的相移

目 录

第一章 半导体器件	1	一、频率特性的一般概念	57
§ 1 半导体基础知识	1	二、三极管的频率参数	59
一、本征半导体	1	三、三极管混合参数 π 型等效电路	60
二、杂质半导体	2	四、共 e 极放大电路的频率特性	62
§ 2 PN 结	3	五、多级放大电路的频率响应	68
一、异型半导体接触现象	3	思考题和习题	71
二、PN 结的单向导电特性	4	第三章 场效应管放大电路	79
三、PN 结的击穿	5	§ 1 结型场效应管	79
四、PN 结的电容效应	6	一、结构	79
五、半导体二极管	7	二、工作原理	79
六、稳压二极管	10	三、特性曲线	81
七、二极管的应用	12	§ 2 绝缘栅场效应管	83
§ 3 半导体三极管	14	一、N 沟道增强型 MOS 场效应管	83
一、三极管的结构及类型	14	二、N 沟道耗尽型 MOS 场效应管	84
二、三极管的放大作用	14	§ 3 场效应管的主要参数	85
三、三极管的三种连接方式	18	一、直流参数	85
四、三极管的特性曲线	18	二、交流参数	87
五、三极管的主要参数	20	三、极限参数	88
六、温度对三极管参数的影响	22	§ 4 场效应管的特点	88
思考题和习题	23	§ 5 场效应管放大电路	89
第二章 放大电路分析基础	27	一、静态工作点与偏置电路	89
§ 1 放大电路工作原理	27	二、场效应管的微变等效电路	92
一、放大电路的组成原理	28	三、共源极放大电路	93
二、直流通路和交流通路	28	四、共漏放大电路(源极输出器)	93
§ 2 放大电路的直流工作状态	28	思考题和习题	95
一、解析法确定静态工作点	29	第四章 负反馈放大电路	97
二、图解法确定静态工作点	29	§ 1 反馈的基本概念	97
三、电路参数对静态工作点的影响	31	一、反馈的定义	97
§ 3 放大电路的动态分析	32	二、反馈的分类及判断	97
一、图解法分析动态特性	32	§ 2 负反馈的四种组态	99
二、放大电路的非线性失真	33	一、反馈的一般表达式	99
三、微变等效电路法	37	二、串联电压负反馈	100
四、三种基本组态放大电路的分析	39	三、串联电流负反馈	100
§ 4 静态工作点的稳定及其偏置电路	45	四、并联电压负反馈	101
§ 5 多级放大电路	51	五、并联电流负反馈	102
一、多级放大电路的耦合方式	51	§ 3 负反馈对放大电路性能的影响	103
二、多级放大电路的指标计算	53	一、提高放大倍数的稳定性	104
§ 6 放大电路的频率特性	57	二、减小非线性失真和抑制干扰、噪声	105

三、扩展频带	105	三、积分电路和微分电路	155
四、负反馈对输入电阻的影响	107	四、对数和指数运算电路	158
五、负反馈对输出电阻的影响	108	§ 3 有源滤波电路	160
§ 4 负反馈放大电路的计算	110	一、低通滤波器	162
一、深负反馈放大电路的近似估算	110	二、高通滤波电路	163
二、串联电压负反馈	111	三、带通滤波电路和带阻滤波电路	165
三、串联电流负反馈	111	§ 4 电压比较器	166
四、并联电压负反馈	112	一、简单电压比较器	167
五、并联电流负反馈	113	二、滞回比较器	167
§ 5 负反馈放大电路的自激振荡	114	三、窗口比较器	172
一、产生自激振荡的原因及条件	114	思考题和习题	173
二、自激振荡的判断方法	115	第七章 波形发生与变换电路	185
三、常用的消除自激的方法	115	§ 1 非正弦波发生电路	185
思考题和习题	116	一、矩形波发生电路	186
第五章 集成运算放大器	121	二、三角波发生电路	188
§ 1 零点漂移	122	三、锯齿波发生电路	190
§ 2 差动放大电路	122	四、波形变换电路	191
一、基本形式	122	§ 2 集成函数发生器 ICL 8038 简介	191
二、长尾式差动放大电路	124	§ 3 正弦波发生电路	194
三、恒流源差动放大电路	128	一、产生正弦波振荡的条件	195
四、差动放大电路四种接法	129	二、RC 正弦波振荡电路	196
§ 3 电流源电路	133	三、LC 正弦波振荡电路	199
一、镜像电流源电路	133	思考题和习题	205
二、威尔逊电流源	134	第八章 低频功率放大电路	210
三、微电流源	135	§ 1 低频功率放大电路概述	210
四、多路偏置电流源	135	一、分类	210
五、作为有源负载的电流源电路	136	二、功率放大电路的特殊问题	211
§ 4 集成运算放大器介绍	136	§ 2 互补对称功率放大电路	211
一、偏置电路	137	一、双电源互补对称电路(OCL 电路)	212
二、输入级	138	二、单电源互补对称电路(OTL 电路)	217
三、中间级	139	三、实际功率放大电路举例	218
四、输出级和过载保护	139	思考题和习题	219
§ 5 集成运放的性能指标	140	第九章 直流电源	223
思考题和习题	143	§ 1 单相整流电路	223
第六章 集成运算放大器的应用	148	一、单相半波整流电路	223
§ 1 集成运放应用基础	148	二、单相全波整流电路	225
一、低频等效电路	148	三、单相桥式整流电路	227
二、理想运算放大电路	148	§ 2 滤波电路	228
三、集成运放工作在线性区	149	一、电容滤波电路	228
四、运放工作在非线性区	150	二、其它形式的滤波电路	231
§ 2 运算电路	150	§ 3 倍压整流	232
一、比例运算电路	150	一、二倍压整流电路	233
二、和、差电路	153	二、多倍压整流电路	233

§ 4 稳压电路	234	二、扩大输出电流的电路	242
一、稳压电路的主要指标	234	三、扩大输出电压的电路	243
二、硅稳压管稳压电路	234	四、输出电压可调的电路	243
三、串联型稳压电路	237	§ 6 开关型稳压电路	244
§ 5 集成稳压电路	242	思考题和习题	246
一、基本应用电路	242	参考文献	250

第一章 半导体器件

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 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，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。

一、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，如图 1-2 所示。

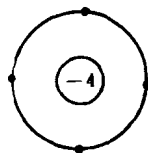


图 1-1 硅和锗简化原子结构模型

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。

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

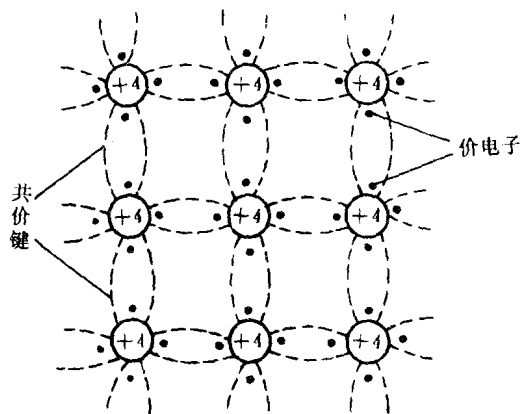


图 1-2 本征半导体晶
体结构示意图

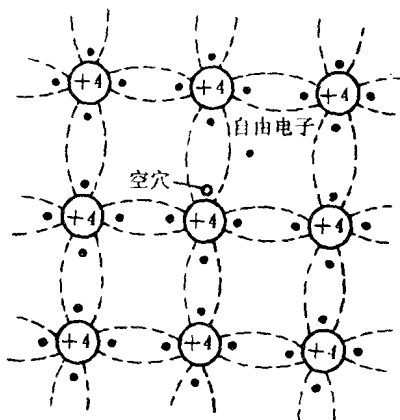


图 1-3 本征半导体中的
自由电子和空穴

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。硅材料，大约温度每升高 8°C ，本征载流子浓度 n_i 增加一倍；锗材料，大约温度每升高 12°C ， n_i 增加一倍。除此之外，半导体载流子浓度还与光照有关，正是利用此特性，制成光敏器件。

二、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。当我们人为的有控制的掺入少量的特定杂质，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 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，还多余一个价电子。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，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 $n_i \gg p_i$ （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，所以其浓度主要取决于温度。此时电子浓度与空穴浓度的关系，可以证明有如下关系：

$$n_s \cdot p_s = n_i p_i = n_i^2 = p_i^2$$

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。

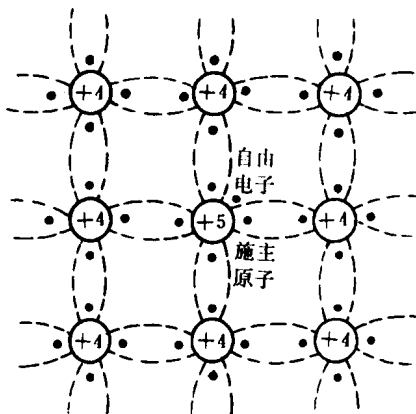


图 1-4 N 型半导体结构

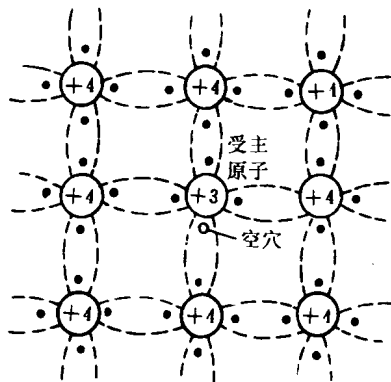


图 1-5 P 型半导体结构

2. P 型半导体

在本征半导体中，掺入 3 价元素，如硼、镓、铟等，它将在某些位置取代硅（锗），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，由于缺少一个电子，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，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 $p \gg n$ ，（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，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。

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多少决定。这两种掺杂半导体是构成各种半导体器件的基础。

§ 2 P-N 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 P-N 结。P-N 结是构成其它半导体器件的基础。

一、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，则将产生扩散运动。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，所以电子由 N 区向 P 区扩散的同时，在 N 区剩下带正电的杂质离子；空穴由 P 区向 N 区扩散的同时，在 P 区剩下带负电的杂质离子，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。扩散得越多，电场越强，漂移运动越强，对扩散的阻力越大，当平衡时，扩散运动作用与漂移运动作用相等，通过界面的载流子数为 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。

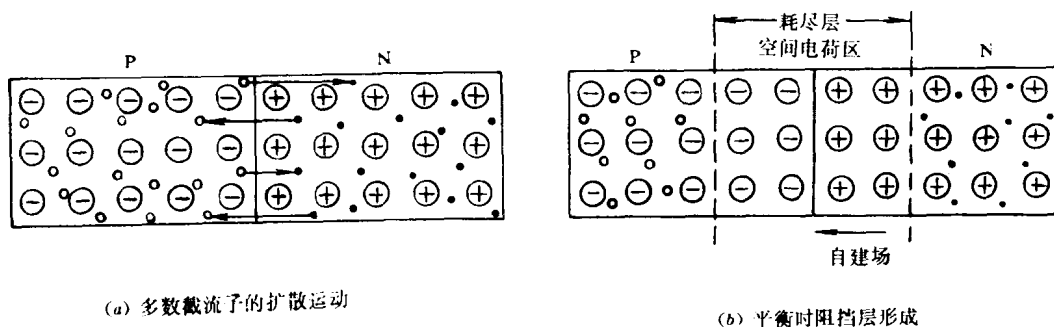


图 1-6 PN 结的形成

二、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, 而呈现出单向导电特性。

1. PN 结外加正向电压

其电源的正极接 P 区, 负极接 N 区, 称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 ——流过 PN 结的电流; U ——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 ——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。

2. PN 结外加反向电压

其电源的正极接 N 区, 负极接 P 区, 称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, 形成漂移电流, 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。

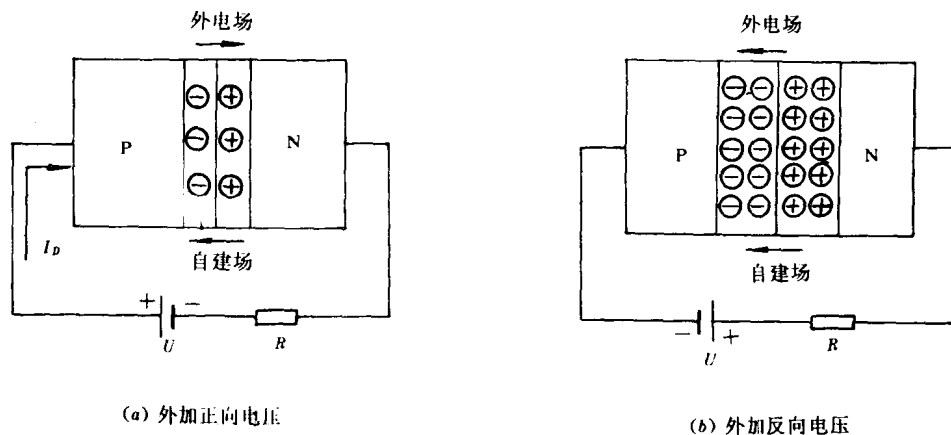


图 1-7 PN 结单向导电特性

将上述电流与电压关系写成如下通式：

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

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。

三、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。

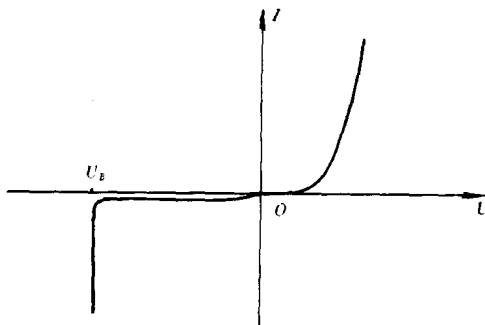


图 1-8 PN 结伏-安特性

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”击穿是当 PN 结两边掺入高浓度的杂质，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，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，所以一般使用时应避免出现击穿现象。

需要指出的是，发生击穿并不意味着 PN 结被损坏。当反向击穿时，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，避免因过热而烧坏 PN 结，当反向