



高等院校
通信与信息专业规划教材

电子电路基础

解月珍 谢沅清 编著



本书主要包括：常用半导体器件，放大器基础，放大器中的反馈、放大器的频率特性、场效应晶体管及其放大电路、功率输出级。运算放大器电路、模拟信号的运算与处理电路。

本书着重物理概念和基础理论阐述，人工估算和计算机辅助分析互为补充。

本书可作为高等学校电子类、通信类和自动化类的专业基础课教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子电路基础/解月珍, 谢沅清编著. —北京: 机械工业出版社,
2005.4
高等院校通信与信息专业规划教材
ISBN 7-111-15773-7

I. 电… II. ①解…②谢… III. 电子电路—高等学校—教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 128649 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 胡毓坚

责任编辑: 王颖 版式设计: 张世琴 责任校对: 魏俊云

责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·17.75 印张·437 千字

0 001—5 000 册

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业规划教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委会主任	乐光新			
编委会副主任	张文军	张思东	杨海平	徐澄圻
编委会委员	王金龙	冯正和	刘增基	李少洪
	邹家禄	吴镇扬	赵尔沅	南利平
	徐惠民	彭启琮	解月珍	
秘书长	胡毓坚			
副秘书长	许晔峰			

出版说明

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，为了配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业系列教材，并且将陆续出版。

这套教材将力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异地发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速，而且涉及领域非常宽，这套教材的选题和编审中难免有缺点和不足之处，诚恳希望各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

前 言

本书和本套丛书中的《通信电子电路》互为配套教材。

为了便于使用本教材的教师和学生事先对本教材有个初步的了解，在此对教材的主要特色作一简要说明。

1. 选材的考虑

作为一门技术基础课，应着眼于最基本的内容同时能反映最新技术。所谓最基本的内容是指原理上有其独立性和代表性。一些可以由基本电路演化或组合出来的电路，均予以舍去。

本书的对象主要是电路应用专业的学生，而非制造专业的学生。对于从事电路应用的技术人员，其主要任务是根据工程提供的参数和要求选用若干集成块，添加某些必要的外围或接口电路组成一个系统。要较好地完成这一任务，需要对器件的工作点是否合适，动态运用范围应该多大，各集成块之间的电平和阻抗应该怎样配合，带负载能力如何等等搞清楚；把影响电路工作的因素弄明白。故本书重点在介绍单元电路的性能及工作原理，对于集成块内部的电路，只对那些和外部电路连接有关的部分，详加分析。与此同时，大致地介绍各部分的组成，不涉及集成块的整体设计。

关于电路的分析、计算与设计，以分析为主。有关计算的问题，则是手工估算和计算机辅助分析互为补充的作法。手工估算着重于工程简化分析计算，目的不在于得到精确的结果，而是着眼于获得清晰的定性的概念与结论。这些概念与结论，用来指导构成电路系统时，能够判知各部分电路连接后的相互关系，正确处理接口处的电平配置，有助于在实验中迅速判断电路中出现故障的原因。而计算机辅助分析与设计（Computer Aided Analysis and Design，简称 CAA 和 CAD），则是使用通用电路分析软件对电路进行较为精确的分析与设计。它是当今大规模集成电路分析与设计的主要手段。作为现代电子工程师，必须掌握这种方法。本书主要介绍基于 SPICE 的通用电路分析程序的 Multisim 电路仿真软件对电路进行分析，但不涉及软件本身的介绍。书中很多电路分析的结果是使用计算机仿真得到的。在例题中，则使用手工估算与计算机仿真相结合，并将其结果进行比较。而对于电路设计，本书只求解局部电路设计。

2. 关于教学内容

根据我们多年来从事电子电路的教学和科研的实践。深感流行的教材中，存在不少不能自圆其说和不符合实验结果的论述。为此，本书提出了若干与传统讲述不同的看法。我们认为，其中有些是人们对问题的认识有一个逐步探索和认识的过程，也有的是治学态度的问题。本书中，对某些问题采取不同观点相对比的讲述方式，这有利于培养学生独立思考的能力，避免学生误以为教材上写的和课堂上讲授的都是百分之百成熟的。本书的一些有异于传统讲述方法的内容大致可分下述几类：

（1）线性电子电路中的非线性问题。

工作于线性电子电路中的电子器件，本质上具有非线性。线性电子电路工作于大信号

时，往往会因器件工作延伸至非线性区，而使按线性条件导出的结论不适用。例如：功率输出级中，负载电阻等于放大器输出电阻不能得到最大功率输出；用负反馈来改善放大器的非线性失真，导出反馈后的失真系数是反馈前的 $1 + AB$ 分之一，是错误地将叠加原理应用于非线性电路；负反馈改善容性负载下的高频失真和器件的动态运用范围余量有关等等。

(2) 误将有条件成立的结论当作普遍原理。

在电子电路中，有不少结论，其成立是有条件的。某些教材没有把必要的条件讲清楚，往往误导学生当成普通原理应用，铸成错误结果。这是学生认为电子线路难学，教学效果不好的重要原因之一。在负反馈改善放大器特性的论述中存在这样的问题甚多。

(3) 含混不清，不确切乃至错误的名词和术语。

高频、低频电路的划分，导致低频电路的工作频率比高频电路的工作频率还高。定义晶体管是电流控制器件，可是，其电压控制特性是实现对数、指数、相乘运算的可贵特性。由运放理想化条件推论出虚短路、虚开路特性。理想化运放分析电路的方法有局限性，不可靠，却被当作经典方法。电流反馈运算放大器称谓不符合电流反馈的经典定义，制造混乱概念等等。

(4) 适应实际需要，增添新的提法。

基于不少集成电路中的晶体管工作于集电结零偏压，提出晶体管实际的进入饱和区是在集电结加有不大的正偏压，而非理论上的以集电结零偏压作为放大区与饱和区的分界标志。

3. 教学方法

(1) 强调工程方法和相对误差。

电子电路是一门工程性很强的课，也是电子专业学生遇到的第一门工程性课程。给学生传授简化处理问题的工程方法是本课程的重要任务之一。在工程上对分析计算的简化处理，主要依据是简化处理造成的相对误差值。传统的讲法很少强调相对误差，往往是抽象地讲某个量很大或很小，因而可以忽略不计。某些教科书的作者或课堂上的讲授者，实际上所考虑的是相对大小，他脑子里存有可供比较的数量，但他没有写出来或讲出来。以致初学者搞不清楚究竟大者要大到多大，小者要小到多小，方能将其略去，以便作简化处理。他看到教师在课堂上三下五去二，轻松地将一个电路简化，戏称老师在“变戏法”。轮到自己处理问题时，便不知所措，要么该简化的不简化，不该简化的随意简化。

前述由运放理想化推论出运放虚短路和虚开路特性，实际上是混淆绝对误差和相对误差所导致的错误。

(2) 提出问题由个别到一般，难点分散。这是考虑人的认识过程总是从个别开始的。当其与系统性有矛盾时，考虑教科书的读者是初学者，我们将“系统性”割爱。

(3) 注重物理概念的描述。

电子电路这门课程，物理方面的描述是十分重要的。我们从教学实践中体会到，概念搞清楚了，应付计算往往问题不大；而概念不清楚，可能会因前提条件弄混，以致得出错误结果而不知所措。特别是那些需要综合考虑多个已知条件，而又必须灵活面对的问题。基于此，本书所选思考题和习题，概念性的题目占了相当大的比重。

(4) 增加例题。书中尽量增加一些例题，以帮助学生消化和理解基本原理。

(5) 行文力求简洁。

本书文字叙述力求简洁。其中一个重要的出发点是为了培养学生的阅读能力。某些经过简单逻辑推理就能理解的问题，略而不作解释。

标有 * 号者为选学内容，可以根据学时和学生接受情况予以取舍。

本书编写大纲承北京航空航天大学李少洪教授和张晓林教授审阅，他们提出了许多宝贵的意见，在此表示感谢。

由于我们的水平有限，对问题的认识有待不断加深和提高，书中谬误在所难免，敬请使用本书的师生，不吝指正。

作 者

常用符号表

一、基本符号

I, i	电流
U, u	电压
P, p	功率
R, r	电阻
G, g	电导
X, x	电抗
B, b	电纳
Z, z	阻抗
L	电感
C	电容
A	放大倍数
t	时间、摄氏温度
T	热力学温度
f, F	频率
ω, Ω	角频率
$S = \sigma + j\omega$	复频率
BW	带宽(通频带)

二、不同书写体的电压、电流

小写 $u(i)$ 表示交流电压(电流)瞬时值(例如 u_{be} 表示基极发射极之间的交流电压瞬时值)

大写 $U(I)$ 表示直流电压(电流)值(例如, U_{BE} 表示基极发射极之间的直流电压)

大写 V 表示直流供电电源电压(例如, V_{CC} 表示集电极直流供电电源电压)

小写 $u(i)$ 大写下标表示含有直流电压(电流)的瞬时值(例如 u_{BE} 表示基极发射极之间含有直流电压的瞬时值)

大写 $U(I)$ 小写下标表示正弦电压的有效值(例如, U_{be} 表示基极发射极之间的正弦电压有效值)。

三、正弦信号作用下, 电压、电流、阻抗、导纳、复数、模值、相角等符号如下所示(以电压为例):

$U(j\omega) = U(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$	正弦电压复数值
$U(\omega), \varphi(\omega)$	电压的模值和相角
$U(S)$	电压的拉氏变换

四、下标意义

i	输入量(例 u_i 为输入电压)
o	输出量(例 u_o 为输出电压)
L	负载(例 R_L 为负载电阻)
f	反馈量(例 u_f 为反馈电压)
s	信号源量(例 u_s 为信号源电压)
d	直流分量(例 U_d 为电压直流分量)
R	基准值(例 U_R 为基准电压)

五、频率

f_l	3dB 下限(截止)频率
f_h	3dB 上限(截止)频率
$BW_{0.7}$	3dB 带宽

六、器件符号及参数

1. 二极管

VD	二极管
VD_W	稳压管
U_D	导通电压
I_S	反向饱和电流

C_T	势垒电容
C_D	扩散电容

U_Z 稳压管的击穿电压

$U_T \left(= \frac{kT}{q} \right)$ 热电压

2. 三极管

VT 三极管

I_{CBO} 发射极开路时的集电结反向饱和电流

I_{CEO} 基极开路时, 集电极与发射极之间的穿透电流

I_{CES} 发射结短路时, 集电极与发射极之间的电流

I_{CER} 基极与发射极之间接有电阻时, 集电极与发射极之间的电流

I_{CM} 集电极电流最大容许值

I_{cm} 集电极正弦电流振幅值

U_{CES} 集电极发射极之间的饱和压降

U_{BES} 基极发射极之间的饱和压降

BU_{CBO} 发射极开路时的集电结击穿电压

BU_{CEO} 基极开路时, 集电极发射极之间的击穿电压

U_A 欧拉电压

P_{CM} 集电极最大容许功率损耗

g_m 跨导

α 共基极短路电流放大系数

β 共发射极短路电流放大系数

f_α 共基极短路电流放大系数的截止频率

f_β 共发射极短路电流放大系数的截止频率

f_T 特征频率 (双极型晶体管)

r_b ($r_{bb'}$) 基极体积 (欧姆) 电阻

3. 场效应管

I_{DSS} $U_{GS} = 0$ 时的饱和漏极电流

$U_{GS(off)}$ 夹断电压

$U_{GS(th)}$ 开启电压

BU_{DS} 漏源间击穿电压

f_c 特征频率 (场效应管)

七、差动放大及运算放大器

U_{IO} 输入失调电压

I_{IO} 输入失调电流

U_{id} 差模输入电压

U_{ic} 共模输入电压

A_d 差模放大倍数

A_c 共模放大倍数

R_{id} 差模输入电阻

R_{ic} 共模输入电阻

$CMRR$ 共模抑制比

SR 摆动速率 (压摆率)

八、其他符号

γ 非线性失真系数

η_c 效率 等于输出功率与电源提供的直流功率之比

τ 时间常数

n 变压器变比

Q 静态工作点

B 反馈系数

$T = AB$ 环反馈系数

$F = 1 + AB$ 反馈深度

目 录

出版说明

前言

常用符号表

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 半导体的特性..... 1

1.1.2 本征半导体..... 1

1.1.3 杂质半导体..... 3

1.1.4 载流子在半导体中的运动..... 4

1.2 PN 结..... 5

1.2.1 PN 结的基本原理..... 5

1.2.2 外加直流电压下的 PN 结..... 6

1.2.3 PN 结的伏安特性..... 7

1.2.4 PN 结的温度特性..... 8

1.3 晶体二极管..... 9

1.3.1 晶体二极管的图形符号及 几种常见结构..... 9

1.3.2 二极管的伏安特性..... 10

1.3.3 二极管的等效电阻..... 10

1.3.4 二极管的主要参数..... 11

1.3.5 稳压二极管..... 12

1.3.6 二极管的 SPICE 模型参数..... 13

* 1.3.7 其他类型二极管..... 14

1.4 晶体三极管..... 16

1.4.1 晶体三极管的结构及图形符号..... 16

1.4.2 晶体三极管的工作原理..... 17

1.4.3 晶体三极管的放大作用..... 21

1.4.4 晶体三极管的特性曲线..... 22

1.4.5 晶体三极管的主要参数..... 24

* 1.5 集成电路及其特点..... 29

1.5.1 集成电路工艺简介..... 29

1.5.2 集成电路中的晶体管..... 31

1.5.3 集成化元器件的特点..... 32

1.6 本章小结..... 32

1.7 习题..... 33

第 2 章 放大器基础..... 35

2.1 放大器的主要性能指标..... 35

2.1.1 增益..... 35

2.1.2 输入、输出电阻..... 36

2.1.3 失真..... 37

2.2 基本单管放大电路..... 37

2.3 放大电路的分析方法..... 38

2.3.1 图解分析法..... 39

2.3.2 等效电路分析法..... 46

2.4 共基放大电路..... 52

2.4.1 电路说明..... 52

2.4.2 基本特性..... 52

2.5 共集放大电路..... 53

2.5.1 电路说明..... 53

2.5.2 基本特性..... 53

2.6 双极型晶体管的 SPICE 模型参数及 放大电路的计算机辅助分析..... 56

2.6.1 双极型晶体管的 SPICE 模型参数..... 56

2.6.2 放大电路的计算机 辅助分析..... 57

2.7 有源负载放大电路..... 59

2.7.1 问题的提出..... 59

2.7.2 有源负载放大电路分析..... 60

2.8 本章小结..... 61

2.9 习题..... 62

第 3 章 放大器中的反馈..... 67

3.1 反馈电路的识别和正、 负反馈的区分..... 67

3.1.1 单级反馈放大器..... 67

3.1.2 两级反馈放大器	68	4.4.1 负反馈法	116
3.2 反馈元件的作用	69	4.4.2 不同组态电路混合连接法	122
3.3 反馈类型及其判别方法	71	4.4.3 外接电感补偿元件法	126
3.3.1 串联反馈与并联反馈	71	4.5 放大器的时域特性	128
3.3.2 电压反馈和电流反馈	72	4.6 本章小结	129
3.3.3 负反馈放大器的四种类型	72	4.7 习题	131
3.4 深负反馈放大电路放大倍数的工程估算	75	第5章 场效应管及其放大电路	133
3.5 负反馈对放大器特性的影响	77	5.1 结型场效应管	133
3.5.1 放大器静态工作点的稳定	77	5.1.1 结型场效应管的工作原理	133
3.5.2 放大器放大倍数的稳定性	80	5.1.2 结型场效应管的特性	135
3.5.3 负反馈对输入输出电阻的影响	82	5.2 绝缘栅场效应管	138
3.5.4 负反馈对非线性失真的影响	84	5.2.1 绝缘栅场效应管的工作原理	138
3.5.5 负反馈对噪声的影响	86	5.2.2 绝缘栅场效应管的特性	140
3.6 本章小结	88	5.3 场效应管的偏置电路	143
3.7 习题	89	5.3.1 偏置变量的选择	143
第4章 放大器的频率特性	94	5.3.2 电路形式	144
4.1 频率特性的分析方法	94	5.4 场效应管放大电路	145
4.1.1 放大器不产生频率失真的条件	94	5.4.1 共源放大电路	146
4.1.2 分析频率特性的工程简化法	96	5.4.2 共漏放大电路	149
4.2 晶体三极管的高频参数及等效电路	98	5.4.3 有源负载放大级	150
4.2.1 PN结电容	98	5.5 本章小结	152
4.2.2 晶体三极管的瞬态模型	100	5.6 习题	153
4.2.3 晶体三极管共射高频混合 π 等效电路	101	第6章 功率输出级	155
*4.2.4 晶体三极管共基高频T型等效电路	103	6.1 功率输出级的主要问题	155
4.2.5 等效电路诸参数的确定方法	104	6.1.1 功率输出级的主要技术指标	155
4.3 单管共射放大电路的高频特性	105	6.1.2 非线性失真	156
4.3.1 密勒效应及等效电路的简化	105	6.1.3 器件的安全运用	157
4.3.2 共射放大电路的高频特性	107	6.2 互补推挽功率输出级	159
4.3.3 低通一阶函数的分析	109	6.2.1 电路的构成及工作原理	159
4.3.4 高阶函数的频率特性	114	6.2.2 输出功率与负载电阻的关系	161
4.4 扩展放大器通频带的方法	115	6.2.3 能量关系	163
		6.2.4 放大器工作状态的类别	165
		6.2.5 乙类推挽功率输出级电路分析	168

6.3 功率输出级的其他电路	172	线性运算电路	219
6.3.1 准互补推挽功率输出级电路	172	8.1.1 运算放大器的放大电路 (比例运算)	219
6.3.2 单电源供电互补推挽功率输出级电路	174	8.1.2 相加运算电路	222
6.3.3 桥式推挽功率输出级电路	175	8.1.3 相减运算电路	225
6.3.4 保护电路	175	8.1.4 积分运算电路	227
6.3.5 提高输出电压幅度的自举电路	176	8.1.5 微分运算电路	228
6.3.6 变压器耦合输出级电路	176	8.2 由运算放大器构成的非线性运算电路	230
6.3.7 场效应管功率输出级电路	179	8.2.1 对数运算电路	230
6.4 本章小结	181	8.2.2 指数运算电路	233
6.5 习题	183	8.2.3 利用对数和指数运算电路实现相乘和相除运算的电路	235
第7章 运算放大器电路	186	8.3 利用元器件伏安特性构成互逆运算的电路结构	236
7.1 运算放大器电路概述	186	8.4 由运算放大器构成的电路的分析计算与实际应用中的若干问题	237
7.1.1 运算放大器的图形符号及电路结构特点	186	8.4.1 分析计算方法	237
7.1.2 运算放大器电路的组成框图	187	8.4.2 供电电源电压对输出电压幅度的限制	239
7.2 集成电路基础	187	8.4.3 电压摆动速率 SR 对输出波形的影响	240
7.2.1 恒流电路	187	8.5 模拟相乘器及其在运算电路中的应用	241
7.2.2 恒压电路	191	8.5.1 模拟相乘器工作原理	241
7.2.3 差动放大电路	192	8.5.2 模拟相乘器电路及主要参数	243
7.2.4 跨导线性电路	199	8.5.3 模拟相乘器在运算电路中的应用	245
7.3 通用型运算放大器电路	205	8.6 电压比较器	248
7.3.1 双极型通用运算放大器电路	205	8.6.1 简单比较器	248
7.3.2 MOS 通用运算放大器电路	207	8.6.2 迟滞比较器	250
7.4 运算放大器的主要参数	207	8.6.3 单片电压比较器的电路特点	251
7.4.1 直流参数	207	8.7 电流模型运算放大器	254
7.4.2 交流参数	208	8.7.1 电路工作原理	254
7.5 单电源供电运算放大器	211	8.7.2 特性分析	255
7.6 跨导运算放大器	212	8.8 本章小结	262
7.7 本章小结	213	8.9 习题	263
7.8 习题	214	参考文献	270
第8章 模拟信号的运算与处理电路	219		
8.1 由运算放大器构成的			

第 1 章 常用半导体器件

半导体器件可以分为分立器件和集成电路器件。分立器件是一个独立的、不可分割的物理实体。集成电路器件则是将分立元器件集成在一个芯片上,并实现一个完整的电路功能的器件。本章主要讲述常用的分立器件,如晶体二极管、晶体三极管。场效应管将在第 5 章介绍。对集成电路器件,则简单介绍其工艺特点。

在讲述半导体器件之前,我们先对半导体的基础知识作一简要介绍。这些知识对大多数读者来说是熟悉的,因为,曾在中学或大学的物理和化学课中学习过,故不做全面的论述,只是简要地介绍与半导体器件工作原理有关的内容。

另外,本课程主要是面向器件应用专业的,因此讲述半导体器件着重其外特性,为后面分析电子电路提供技术基础。即使涉及器件内部电路的工作过程,也只是为了更好地掌握器件外特性所必须了解的内容。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 半导体的特性

物体按照其导电能力可以分为导体、半导体和绝缘体三类。常见的金、银、铜、铝等金属,是良好的导体,它们的电导率是 $10^6 \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级。另一些物质,如橡皮、木材、云母、陶瓷等,则几乎不导电,称为绝缘体,它们的电导率在 $10^{-22} \sim 10^{-4} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,称为半导体,它们的电导率为 $10^{-9} \sim 10^2 \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。用于制造半导体元器件的半导体有锗、硅和砷化镓等。

半导体之所以被用来制造电子元器件,不是在于它的导电能力处于导体和绝缘体之间,而是它的导电能力在外界某种因素作用下会发生显著的变化。例如:

(1) 半导体的电导率可以因加入杂质而发生显著的变化。例如在室温 30°C 时,纯锗中掺入一亿分之一的杂质(称掺杂),其电导率会增加几百倍。各种不同器件的制作,正是利用了掺杂以改变和控制半导体的电导率。

(2) 温度的变化也会使半导体的电导率发生显著的变化,利用这种热敏效应人们制作出了热敏元件。但另一方面,热敏效应会使半导体元、器件的热稳定性下降。在本课程中,我们还要讲述克服因半导体元器件热敏特性造成电路不稳定的有关措施。

(3) 光照不仅可以改变半导体的电导率,而且可以产生电动势,上述现象统称半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光电晶体管、光电耦合器和光电池等。

物质的导电特性取决于原子的外层结构,即最外一层电子的分布状态。下面我们以制造半导体器件使用的锗、硅晶体为例,讲述半导体的导电性能。

1.1.2 本征半导体

没有杂质、而且晶体结构完整的半导体,称为本征半导体(Intrinsic Semiconductor),它

是制造半导体器件的基本材料。

1. 硅和锗晶体的共价键结构

我们知道，原子都是由带正电的原子核和分布在原子核外层轨道上的电子所构成的。而处于最外层的电子为价电子（Valence Electron），物质的导电性能与价电子有关。图 1-1a 和 b 分别示出了硅和锗的原子结构模型，由图可见，它们都有四个价电子，同属于四价元素，故可以用同一个简化模型表示，如图 1-1c。

由原子理论得知，当原子的外层有八个电子时才处于稳定状态，硅和锗都只有四个价电子，因此在组成单晶时，每个原子都要从四周相邻原子取得四个价电子，以构成稳定状态。这样，每两个原子共用一对价电子，形成共价电子对，这种结构称为共价键（Covalent Bond）结构。图 1-2 示出共价键二维结构示意图。

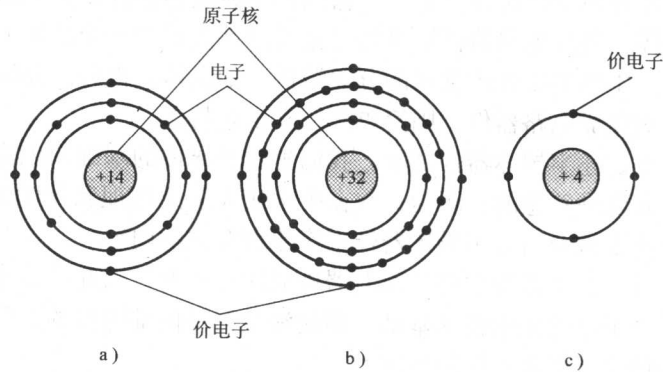


图 1-1 硅和锗的原子结构模型
a) 硅 b) 锗 c) 简化模型

2. 半导体中的两种载流子

本征半导体中的价电子被束缚在共价键中，在热力学温度 $T = 0K$ 和无外界其他因素激发时，半导体内不存在自由运动的电子。当温度升高或光线照射时，某些价电子获得足够的能量，便挣脱共价键的束缚而成为自由电子（Free Elec-

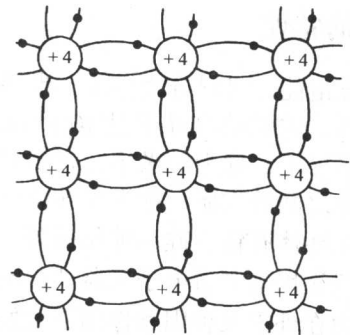


图 1-2 晶体共价键二维结构示意图

tron)，同时在该共价键留下一个空位。这时相应的原子就带有一个电子电荷量的正电，相邻共价键中的价电子在它的作用下很容易跳过来填补这个空位，而在相邻共价键中出现了空位。这个过程继续进行下去，就相当于一个空位在移动。由于带负电荷的价电子依次填补空位的作用与带正电荷的粒子作反方向的运动效果相同，因此可以把空位看作带正电的载流子，并称它为空穴（Hole）。以上这种自由电子和空穴成对出现的现象，称为本征激发。

在没有外加电场时，自由电子和空穴在晶体中都做杂乱无章的运动，对外部不显现电流。

有外加电场时，自由电子和空穴都在电场的作用下，作定向运动。这种定向运动叠加在原来的无规则运动上，对外部显现电流。自由电子逆电场方向而动，空穴则因价电子逆电场方向而动，显现出空穴是顺电场而动，自由电子带负电，空穴带正电，它们对外部显现的电流效应是相加的。

自由电子和空穴都是载运电流的粒子，统称为载流子。在以后我们将自由电子移动形成的导电现象简称电子导电，而将价电子移动形成电流的导电现象称为空穴导电。

理论和实验证明：随着温度的升高，电子-空穴对剧烈增加，其增加的速度，基本上遵循指数律。

在实际的半导体中，除了产生电子-空穴对以外，还存在一个逆过程。这就是自由电子也会释放能量而进入有空位的共价键，同时消失一个自由电子和空穴，人们称这种现象为复合（Recombination）。当温度一定时，激发和复合数相等，维持动态平衡。

1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中，人为地掺入少量其他元素（称杂质），可以使半导体的导电性能发生显著的改变。利用这一特性，制成了人们所期望的各种性能的半导体器件。

掺入杂质的半导体称作杂质半导体（Impurity Semiconductor）。根据掺入杂质性质的不同，可分为两种：电子型半导体和空穴型半导体。载流子以电子为主的半导体称作电子型半导体。因为电子带负电，取英文单词“负”（Negative）的第一个字母“N”，将电子型半导体称作N型半导体。载流子以空穴为主的半导体称作空穴型半导体。取英文单词“正”（Positive）的第一个字母“P”，将空穴型半导体称作P型半导体。

1. N型半导体

本征半导体中掺入少量的五价元素（如磷、砷和钨），使每一个五价元素取代一个四价元素中的位置，就形成N型半导体。图1-3示出一个砷原子取代一个锗原子后，晶体的二维结构示意图。由图可见，砷原子有五个价电子，其中四个与锗原子结合成共价键，余下的一个不在共价键之内，砷原子对它的束缚力较弱，因此只需较小的能量便可激发而成为自由电子。由于砷原子很容易贡献出一个自由电子，故称为“施主（Donor）杂质”。

砷原子提供一个电子（成为自由电子）后，砷原子本身因失去电子而成为正离子，但并不产生新的空穴，因为砷原子周围的共价键中并没有空位。这与本征激发成对产生载流子有所不同。

在上述情况下，半导体中除了本征激发产生的电子-空穴对以外，还由于掺入了砷元素增加了大量的由砷元素提供的自由电子。这种杂质半导体以自由电子导电为主，因而称为电子型半导体或N型半导体。在N型半导体中，由于自由电子居多数，故N型半导体中的自由电子称为“多数载流子”，简称多子（Majority Carriers），而空穴称为“少数载流子”，简称少子（Minority Carriers）。

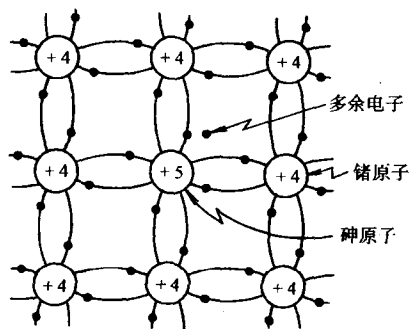


图 1-3 N型半导体二维结构示意图

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素，可以形成P型半导体，常用于掺杂的三价元素有硼、铝和镓。图1-4为一个镓原子在晶体中取代锗原子的二维结构示意图。

镓原子只有三个价电子。这三个价电子只能和相邻的三个锗原子结合成共价键，余下的一个相邻的锗原子的共价键不完整，产生一个价电子的空位。当相邻共价键中的价电子填补

此空位时，在镉原子所在位置因得到一个价电子而形成一个负离子，而在原来减少一个价电子处产生一个新的空位。这个空位与镉原子处被填补的空位不同。因为镉原子处有空位，在镉原子处呈电中性；而新产生空穴的原子处，因缺少一个电子而带正电，新产生的空位是可以参与导电的空穴。由上可见，镉原子起着接受一个价电子而产生空穴的作用，故称“受主 (Acceptor) 杂质”。

在 P 型半导体中，除了由本征激发产生的电子-空穴对外，还增加了因为掺杂形成的镉原子提供空位，邻近价电子移过来而产生的空穴。这种杂质半导体以空穴导电为主，所以 P 型半导体中空穴称为“多数载流子”，而自由电子则成为“少数载流子”。

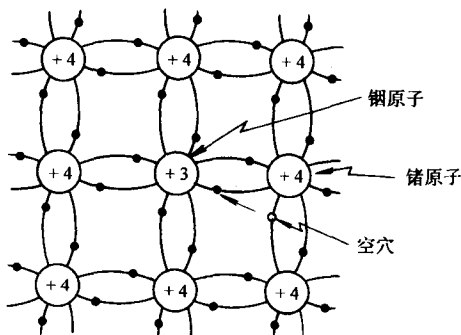


图 1-4 镉原子在晶体中取代
锗原子的二维结构示意图

1.1.4 载流子在半导体中的运动

半导体中的两种载流子——自由电子和空穴，在电场的作用下会做漂移运动，形成漂移电流。同时，当载流子浓度存在梯度时，还会产生定向的扩散运动，形成扩散电流。

1. 载流子在电场作用下的漂移

在外加电场的作用下，半导体中的载流子将作定向运动，其中自由电子逆电场方向运动，空穴产生顺电场方向的运动。载流子的这种定向运动称为漂移运动，由载流子的漂移而产生的电流称为漂移电流 (Drift Current)，而且，两种载流子产生的漂移电流的方向均与电场方向相同。

漂移电流的大小取决于载流子的浓度、载流子的迁移率及外加电场强度。设 J_{pt} 和 J_{nt} 分别表示空穴和自由电子漂移电流的电流密度 (单位截面积通过的电流)，则它们可以表示为

$$J_{pt} = qp\mu_p E \quad (1-1)$$

$$J_{nt} = -(-q)n\mu_n E = qn\mu_n E \quad (1-2)$$

式中， $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ (库仑) 为电子电荷； p 和 n 分别为空穴和自由电子浓度； μ_p 和 μ_n 分别是空穴和自由电子的迁移率，其单位为 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ，它是半导体材料的物理结构和温度的复杂函数； E 为电场强度，单位是 V/cm 。

若半导体材料长度为 l ，截面积为 S ，则半导体两端的电压 $U = El$ ，流过的漂移电流 $I_t = J_t S$ ，其中 $J_t = J_{pt} + J_{nt}$ 。该半导体呈现的电阻

$$R = \frac{U}{I_t} = \frac{El}{J_t S} = \frac{l}{\sigma S} = \rho \frac{l}{S} \quad (1-3)$$

式中， $\rho = \frac{E}{J_t}$ 为电阻率，而 $\sigma = \frac{1}{\rho}$ 是电导率，单位为 s/cm (西门子/厘米)。由式 (1-1)、(1-2)、(1-3)，可得

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{J_t}{E} = q(p\mu_p + n\mu_n) \quad (1-4)$$

上式说明, 电导率取决于载流子的浓度及其迁移率。

在 $T = 300\text{K}$ 时, 最佳导体是银, 其 $\sigma = 6.3 \times 10^5 \text{ s/cm}$, 最佳绝缘体是石英, 其 $\sigma = 10^{-20} \text{ s/cm}$, 半导体材料的 σ 在 $10^{-9} \sim 10^2 \text{ s/cm}$ 之间。

2. 载流子在浓度梯度作用下的扩散

处于热平衡状态下的载流子的随机运动, 不会产生定向电流。但是, 若一个区域的载流子浓度比其相邻的另一区域的载流子浓度高, 则处于热扰动中的载流子就会从浓度高的区域向浓度低的区域流动, 最后趋于均衡。这种因载流子浓度存在梯度而引起载流子的定向运动称为扩散运动, 相应产生的电流为扩散电流 (Diffusion Current)。

设 $\frac{\partial n(x)}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial p(x)}{\partial x}$ 分别为自由电子和空穴沿 x 方向变化的浓度梯度, D 为扩散系数, 则自由电子和空穴沿 x 方向的扩散电流密度分别为:

$$J_{nd} = -(-q)D_n \frac{\partial n(x)}{\partial x} = qD_n \frac{\partial n(x)}{\partial x} \quad (1-5)$$

$$J_{pd} = qD_p \frac{\partial p(x)}{\partial x} \quad (1-6)$$

式中, 扩散系数 D 的单位是 cm^2/s (厘米²/秒), 其值与载流子的迁移率有关, D 与 μ 的关系式如下:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = U_T \quad (1-7)$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} = U_T \quad (1-8)$$

式中, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (玻尔兹曼常数), T = 热力学温度。当 $T = 300\text{K}$ 时, $kT/q = U_T \approx 26\text{mV}$, 称 U_T 为热电压。

载流子在电场作用下的漂移运动和在浓度梯度作用下的扩散运动, 形成半导体中的电流。这是我们分析半导体器件特性的基础。

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的基本原理

PN 结是晶体二极管、晶体三极管和其他半导体器件的基本结构, 我们从讲述 PN 结入手, 进而讲述其余各种半导体器件。

1. PN 结的形成

对同一块半导体, 一端掺入受主杂质, 成为 P 型半导体; 另一端掺入施主杂质, 成为 N 型半导体。这两种杂质半导体紧密地接触在一起, 在接触处保持晶格的连续性。于是在接触面, 便形成一个所谓 PN 结 (PN Junction)。

2. PN 结的势垒

我们以图 1-5a 所示接触面上杂质成分突然改变的 PN 结为例, 来研究 PN 结势垒的形成。图 1-5b 和 c 分别表示在均匀掺杂情况下, 晶体中受主杂质 n_a 和施主杂质 n_d 的浓度分布状态。理论和实验表明, 在室温下, 每一个受主杂质将产生一个空穴, 同时形成一个负离子;