



高等院校精品课程系列教材 ● 省级

JINGPIN
KECHENG

模拟电子电路 原理与设计基础

刘祖刚 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等院校精品课程系列教材

模拟电子电路原理与设计基础

刘祖刚 编著



机械工业出版社

本书内容力求理论紧密联系实际,在阐明概念的基础上,着重讲清讲透模拟电子电路的工作原理、分析方法;各章对一些基本电路的设计作了必要的讨论。通过本书的学习,读者不仅能较好地理解和掌握模拟电子电路的工作原理和分析方法,而且还能根据实际要求初步设计一些实用的模拟电子电路,以此培养读者在电子技术应用方面的创新思维和创新能力。

本书共8章,主要内容包括:半导体基础知识与半导体器件的工作原理、基本放大电路、集成运算放大电路、功率放大电路、放大电路中的反馈、运算电路和有源滤波电路、正弦波和非正弦波发生电路、直流稳压电源。

本书可作为高等院校电子信息与电气学科本科各专业的教材和非电子电气信息类本科相关专业的选用教材,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

模拟电子电路原理与设计基础/刘祖刚编著. —北京:机械工业出版社, 2011.7
高等院校精品课程系列教材
ISBN 978-7-111-34392-9

I. ①模… II. ①刘… III. ①模拟电路—理论—高等学校—教材②模拟电路—
电路设计—高等学校—教材 IV. ③TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第125103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:时静 责任编辑:时静 王荣

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22.25印张·552千字

0001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-34392-9

定价:42.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

“模拟电子电路”（或称“模拟电子技术基础”、“低频电子线路”）是电子信息与电气学科各专业一门重要的专业基础课，其理论可直接指导电子技术实践。“模拟电子电路”课程教学的基本原则是注重理论与实际紧密结合，特别强调用理论去直接指导和解决电子技术的实际问题；其教学的根本目的就是使学生深入理解和熟练掌握模拟电子电路的工作原理和分析方法，能根据实际需要正确合理地应用各种电路（包括电路调试、参数测试、故障分析与排除等），并初步学会根据工程实际要求设计出一些实用的基本电路。因此，模拟电子电路教材不应仅仅局限在理论分析的“框架”之中，而应结合实际，将理论分析最终落实到基本电路的实际应用和设计之上，这才是该课程教学所要达到的基本目标。

电子信息及电气类专业中，“模拟电子电路”课程的教学应加强学生基本电路的实际应用和工程设计能力的培养，这既是模拟电子电路教学所要达到的基本目标，也是加强学生实践能力、创造性思维和创新能力的培养的重要教学环节；学生只有掌握了基本电路的实际应用和基本电路的设计原理和设计方法，才能在理论与实践相结合的基础上更深刻地理解电路的工作原理，更正确合理、乃至创造性地将这些基本电路运用于电子技术的实践中。

本书是基于上述基本思想和作者 30 多年的教学体会，并依照高等院校电子信息与电气学科教材编审委员会审定通过的教材编写大纲编写而成的。本书内容力求从实际出发，理论紧密联系实际，在讲清讲透电路工作原理和分析方法的基础上，各章对一些基本电路的工程设计作了必要的讨论，使学生初步学会和掌握一些基本电路的设计原理和设计方法，以加强学生创新思维和创新能力的培养。

从有利于教学需要出发，本书在基本内容和知识结构体系上作了如下几个方面调整：

(1) 对每一个具体电路讨论之前，减少了不必要的“铺垫”，避免了某些“繁琐”。

(2) 为了使不同章节的有关内容更好地前后“衔接”和避免前后不必要的重复，在知识结构体系上作了如下几个方面的整合：

1) 将现有一般教材中分布在三章的内容（基本放大电路、多级放大电路、放大电路的频率响应）整合在第 2 章基本放大电路之中。

2) 考虑集成运放输入级和中间级用到差分放大电路，因此，将差分放大电路调整到第 3 章集成运算放大电路中讨论。

3) 考虑目前绝大多数情形下，已很少用到变压器耦合的功率放大器，故这部分内容在第 4 章功率放大电路中删去，重点讨论了 OCL、OTL 和集成功率放大电路。

(3) 考虑到实际应用中的负反馈电路一般满足深度负反馈条件，故负反馈电路这部分内容重点讨论了深度负反馈条件下的近似分析法，删去了工程实际中已很少应用的繁琐的框图分析法。

本书可作为高等学校电子信息与电气类本科各专业“模拟电子电路”课程教材和非电子信息与电气类本科相关专业的“模拟电子电路”课程的选用教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

本书理论授课学时为 56 ~ 72 小时，包含习题课、课堂讨论等课内教学环节。若教学计划少于 56 学时，建议可部分或全部舍去带“*”号的内容及有关部分的电路设计内容。

天津大学孙雨耕教授、清华大学华成英教授对本书编写大纲提出过宝贵意见，赵柏树、谢菊芳、杨维明、钟志锋、刘国君、张玲等老师对本书的编写给予了很大的支持，曾梅香老师在绘图和书稿校对方面作了大量的工作，在此一并表示衷心感谢！

因时间仓促和作者水平所限，书中若有疏漏和错误之处，敬请各位教师和读者不吝指正。

作 者

本书常用符号说明

1. 电流和电压符号的含义（以基极电流、发射结电压为例，其他以此类推）

字母符号	字母符号代表的含义
$I_B (U_{BE})$	大写字母、大写下标，表示直流或静态电流（电压）
$i_b (u_{be})$	小写字母、小写下标，表示交流瞬时量
$I_B (u_{BE})$	小写字母、大写下标，表示包含直流和交流量的瞬时总量
$I_b (U_{be})$	大写字母、小写下标，表示交流量有效值
$\dot{i}_b (\dot{U}_{be})$	表示正弦电流（电压）复数量
$\Delta I_B (\Delta U_{BE})$	表示直流变化量
$\Delta i_B (\Delta u_{BE})$	表示瞬时总量的变化量

2. 基本量、单位、符号表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
电流	I, i	安 [培]	A	电容	C	法 [拉]	F
电压	U, u	伏 [特]	V	放大倍数	A	倍或分贝	无或 dB
功率	P, p	瓦 [特]	W	时间	t	秒	s
电阻	R, r	欧 [姆]	Ω	摄氏温度	t	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$
电导	G, g	西 [门子]	S	热力学温度	T	开 [尔文]	K
电抗	X, x	欧 [姆]	Ω	频率	f, F	赫 [兹]	Hz
电纳	B, b	西 [门子]	S	角频率	ω, Ω	弧度每秒	rad/s
阻抗	Z, z	欧 [姆]	Ω	频带宽度	f_{bw}	赫 [兹]	Hz
电感	L	亨 [利]	H				

注：单位名称中去掉方括号中的字即为其名称的简称。

3. 下角标的含义

i, I	输入量（例如 u_i 为输入电压）
o, O	输出量（例如 u_o 为输出电压）
i	电流量（例如 A_i 为电流放大倍数）
u	电压量（例如 A_u 为电压放大倍数）
f	反馈量（例如 u_f 为反馈电压， A_f 为反馈放大倍数）
s	信号源量（例如 u_s 为信号源电压， A_{us} 为源电压放大倍数）

4. 功率、电源电压符号

P_V	电源供给的平均功率	V_{CC}	集电极回路电源电压
P_o	输出信号功率	V_{EE}	发射极回路电源电压
P_i	输入信号功率	V_{DD}	漏极回路电源电压
P_T, P_C	晶体管损耗功率		

5. 频率符号

f_H	放大电路上限截止频率	f_0	选频回路固有谐振频率
f_L	放大电路下限截止频率	f_P	滤波器通带截止频率
f_{BW}	放大电路通频带		

6. 元器件符号及参数

(1) 二极管、稳压二极管

VD	普通二极管	VZ	稳压二极管
I_S 、 I_R	反向饱和电流	U_Z	稳定电压或反向击穿电压
I_F	最大整流电流	I_Z 、 I_{Zmin}	(最小) 稳定电流
U_{BR}	反向击穿电压	I_{Zmax}	最大稳定电流
U_R	最大反向工作电压	P_{ZM}	额定管耗
f_M	最高工作频率	r_z	动态电阻
U_{on}	二极管开启电压	$U_T = KT/q$	温度的电压当量
U_D	二极管正向导通电压		

(2) 晶体管

VT	晶体管 (三极管)	P_{CM}	集电结最大允许功耗
B、b	基极	I_{CM}	集电极最大允许电流
C、c	集电极	g_m	跨导
E、e	发射极	β	共发射极电流放大倍数 (系数)
I_{CBO}	发射极开路时集电结反向饱和电流	α	共基极电流放大倍数 (系数)
I_{CEO}	基极开路时集电极与发射极间的电流	f_β	共发射极截止频率
U_{CES}	集电极与发射极间的饱和电压降	f_α	共基极截止频率
U_{CEO}	基极开路时集电极与发射极间的反向击穿电压	f_T	特征频率 (β 下降至 1 时对应的频率)
U_{CBO}	发射极开路时集电极与基极间的反向击穿电压	r_{be} 、 r_b	基区体电阻
U_{EBO}	集电极开路时发射极与基极间的反向击穿电压	r_{b1e}	发射结微变等效电阻
		C_{b1e}	混合 π 形等效电路发射结的等效电容
		C_{b1c}	混合 π 形等效电路集电结的等效电容
		U_{on}	发射结开启电压

(3) 场效应晶体管

VT	场效应晶体管	I_{DSS}	耗尽型场效应晶体管 $u_{GS} = 0$ 时的漏极电流
D、d	漏极	r_{ds}	d-s 间的微变等效电阻
G、g	栅极	I_S	源极电流
S、s	源极	g_m	低频跨导
C_{ds}	d-s 间的等效电容	I_{DM}	最大漏极电流
C_{gs}	g-s 间的等效电容	P_{DM}	最大允许功耗
C_{gd}	g-d 间的等效电容	$U_{(BR)GS}$	栅-源极间的击穿电压
I_D	漏极电流	$U_{(BR)DS}$	漏-源极间的击穿电压
I_{DO}	增强型 MOS 管 $u_{GS} = 2 U_{GS(th)}$ 时的漏极电流	$U_{GS(off)}$	耗尽型场效应晶体管的夹断电压
		$U_{GS(th)}$	增强型场效应晶体管的开启电压

7. 放大倍数、增益、反馈系数

A	放大倍数或增益的通用符号	\dot{A}_g	开环互导放大倍数
\dot{A}_u	电压放大倍数: \dot{U}_o / \dot{U}_i	\dot{A}_{uf}	闭环电压放大倍数
\dot{A}_{us}	源电压放大倍数: \dot{U}_o / \dot{U}_s	\dot{A}_{if}	闭环电流放大倍数
\dot{A}_{um}	中频电压放大倍数	\dot{A}_{rf}	闭环互阻放大倍数
\dot{A}_{usm}	中频源电压放大倍数	\dot{A}_{gf}	闭环互导放大倍数
\dot{A}_{usl}	低频源电压放大倍数	\dot{F}_u	电压反馈系数
\dot{A}_{ush}	高频源电压放大倍数	\dot{F}_i	电流反馈系数
\dot{A}_u	开环电压放大倍数	\dot{F}_r	互阻反馈系数
\dot{A}_i	开环电流放大倍数	\dot{F}_g	互导反馈系数
\dot{A}_r	开环互阻放大倍数		

8. 差动放大电路及集成运算放大电路

$u_{id}、u_i$	差模输入电压	$i_N、u_N$	集成运放的反相输入电流、电压
$u_{Od}、u_O$	差模输出电压	U_{IO}	输入失调电压
u_{ic}	共模输入电压	I_{IO}	输入失调电流
u_{Oc}	共模输出电压	I_{IB}	输入偏置电流
A_{ud}	差模电压放大倍数	f_H	-3dB 带宽
A_{uc}	共模电压放大倍数	K_{CMR}	共模抑制比
U_T	电压比较器的阈值电压	A_{od}	集成运放的开环差模电压放大倍数
U_{OH}	电压比较器输出的高电平	$U_{id\ max}$	最大差模输入电压
U_{OL}	电压比较器输出的低电平	$U_{ic\ max}$	最大共模输入电压
$i_P、u_P$	集成运放的同相输入电流、电压	$I_{REF}、U_{REF}$	参考电流、电压

9. 其他符号

η	效率	Q	静态工作点
γ	非线性失真系数	R_i	输入电阻
τ	时间常数	R_o	输出电阻
T	温度、周期	R_b	基极偏置电阻
S	整流电路的脉动系数	K	模拟乘法器的相乘系数
S_r	稳压电路的稳压系数	R_c	集电极负载电阻
D	非线性失真系数	R_e	发射极电阻
φ	相位角	R_g	场效应晶体管栅极偏置电阻
AF	反馈环路放大倍数	R_d	场效应晶体管漏极负载电阻
$1 + AF$	反馈深度	R_s	源极电阻、信号源内阻

目 录

前言	
本书常用符号说明	
第1章 半导体基础知识与半导体器件的工作原理	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体的共价键结构	2
1.1.3 本征半导体热激发	2
1.1.4 杂质半导体	4
1.1.5 P型和N型半导体导电机构模型的表示方法	5
1.1.6 半导体中的电流	5
1.2 PN结	7
1.2.1 PN结的形成	7
1.2.2 PN结的单向导电性	8
1.3 半导体二极管	11
1.3.1 半导体二极管常见的几种结构	11
1.3.2 二极管的伏安特性	12
1.3.3 二极管的主要参数	13
1.3.4 半导体二极管的等效模型	13
1.3.5 稳压二极管	15
1.3.6 其他二极管简介	17
1.4 晶体管	18
1.4.1 晶体管的结构及分类	18
1.4.2 晶体管内部载流子的传输过程	19
1.4.3 晶体管的电压放大作用简述	21
1.4.4 晶体管的共射特性曲线	21
1.4.5 晶体管的主要参数	24
1.5 场效应晶体管	26
1.5.1 结型场效应晶体管	26
1.5.2 绝缘栅场效应晶体管	31
1.5.3 场效应晶体管与晶体管的比较	39
本章小结	39
自我检测题	40
思考题与习题	41
第2章 基本放大电路	45
2.1 放大与放大电路	45
2.1.1 放大的概念	45
2.1.2 阻容耦合共发射极放大电路的组成	46
2.1.3 放大器的主要性能指标	48
2.2 三种基本组态放大电路	51
2.2.1 基本共射放大电路	52
2.2.2 共集电极放大电路	69
2.2.3 共基极放大电路	72
2.2.4 三种基本放大器的性能比较	74
2.3 多级放大电路	75
2.3.1 放大电路的级间耦合方式	75
2.3.2 多级放大电路的分析	76
2.3.3 晶体管组合电路	79
2.4 场效应晶体管基本放大电路	81
2.4.1 共源极放大电路	82
2.4.2 共漏极放大电路	87
2.5 放大电路的频率特性	88
2.5.1 频率特性的一般概念	88
2.5.2 RC高通电路与RC低通电路	90
2.5.3 晶体管的高频等效电路	94
2.5.4 场效应晶体管的高频等效电路	97
2.5.5 放大电路的频率特性	97
*2.5.6 多级放大电路的频率特性	109
2.6 基本放大电路的设计	112
2.6.1 基本放大电路设计的一般原则	112
2.6.2 晶体管基本放大电路的设计	114
本章小结	117
自我检测题	118
思考题与习题	120
第3章 集成运算放大电路	127
3.1 集成运算放大电路的特点及电流源电路	127
3.1.1 集成运放的特点及组成	127
3.1.2 集成运放的电压传输特性	128
3.1.3 集成运放中的电流源电路	129
3.2 差分放大电路	134

3.2.1	差分放大电路概述	134	判别	176	
3.2.2	基本差分放大电路的工作原理及性能分析	135	5.2	负反馈放大电路的四种基本类型及放大倍数的一般表达式	179
3.2.3	具有恒流源的差分放大电路	141	5.2.1	负反馈放大电路的四种基本类型	179
3.2.4	具有恒流源的差分放大电路的设计	146	5.2.2	负反馈放大电路放大倍数的一般表达式	182
3.3	集成运算放大电路的输出级电路	147	5.3	负反馈对放大电路性能的改善	185
3.3.1	互补型共集电路	148	5.3.1	提高放大倍数的稳定性	185
3.3.2	设置静态偏置的互补型共集输出级电路	148	5.3.2	展宽通频带	186
*3.4	集成运算放大电路简介	149	5.3.3	减小非线性失真	187
3.4.1	集成运算放大器 F007 原理简介	149	5.3.4	改变输入电阻	188
3.4.2	集成运算放大器的主要性能指标	151	5.3.5	改变输出电阻	189
3.5	集成运放的选择和使用	152	5.4	深度负反馈放大电路	192
本章小结		154	5.4.1	深度负反馈的实质	192
自我检测题		154	5.4.2	反馈系数的确定	193
思考题与习题		156	5.4.3	深度负反馈放大电路的放大倍数分析	194
第4章	功率放大电路	159	*5.4.4	负反馈放大电路的自激振荡	198
4.1	概述	159	*5.4.5	负反馈放大电路的设计	199
4.2	互补功率放大电路	161	*5.5	放大电路中的正反馈	201
4.2.1	双电源乙类互补功率放大电路 (OCL 电路)	161	本章小结		204
4.2.2	采用复合管组成的准互补功率放大电路	165	自我检测题		205
4.2.3	双电源甲乙类互补功率放大电路	167	思考题与习题		206
4.2.4	单电源准互补功率放大电路 (OTL 电路)	167	第6章	运算电路和有源滤波电路	211
4.2.5	单电源准互补功率放大电路设计	169	6.1	集成运算放大电路的应用基础	211
4.3	集成功率放大电路	171	6.1.1	理想集成运放的主要性能参数	211
4.3.1	DG4100 内部电路组成简介	171	6.1.2	理想集成运放工作在线性区的条件及其特点	212
4.3.2	DG4100 集成功放的应用	172	6.1.3	理想运放工作在线性区的条件及其特点	212
本章小结		172	6.2	基本运算电路	213
自我检测题		172	6.2.1	比例运算电路	214
思考题与习题		173	6.2.2	加、减法运算电路	218
第5章	放大电路中的反馈	176	6.2.3	积分运算电路和微分运算电路	221
5.1	反馈的概念及正、负反馈的		6.2.4	对数和指数运算电路	224
			6.2.5	由对数和指数运算电路组成乘法或除法运算电路	226
			6.3	模拟乘法器及其应用	228

6.3.1 变跨导型模拟乘法器	228	8.2 小功率整流滤波电路	298
6.3.2 模拟乘法器在运算电路中的 应用	231	8.2.1 半波整流电路	299
6.4 运算电路设计	233	8.2.2 全波整流电路	300
6.4.1 运算电路的设计原则	233	8.2.3 桥式整流电路	302
6.4.2 运算电路的设计方法与步骤	234	8.2.4 电源滤波电路	304
6.5 有源滤波电路	235	*8.2.5 倍压整流电路	308
6.5.1 滤波电路的基础知识	235	8.2.6 其他形式的滤波电路	309
6.5.2 有源低通滤波电路	239	8.3 二极管稳压电路	311
6.5.3 其他有源滤波电路	243	8.3.1 二极管稳压电路的 组成及稳压原理	311
*6.5.4 开关电容滤波电路	248	8.3.2 稳压电路的主要性能参数	312
本章小结	250	8.3.3 二极管稳压电路设 计时电路参数的选择	313
自我检测题	250	8.4 串联型反馈式稳压电路	316
思考题与习题	251	8.4.1 串联型反馈式稳压电路的 工作原理及电路分析	316
第7章 正弦波和非正弦波发生电路 ...	258	8.4.2 串联型反馈式稳压电路设计	322
7.1 正弦波发生电路	258	8.5 集成稳压电路	324
7.1.1 产生正弦波的条件	258	8.5.1 三端集成稳压器分类	325
7.1.2 RC 正弦波振荡电路	261	8.5.2 三端集成稳压器的组成框图 及其功能概述	325
7.1.3 LC 正弦波振荡电路	264	8.5.3 三端集成稳压器的应用	326
7.1.4 LC 正弦波振荡电路设计	270	*8.6 开关稳压电路简介	328
7.1.5 石英晶体正弦波振荡电路	272	8.6.1 开关稳压电路的分类	328
7.2 非正弦波发生电路	275	8.6.2 串联型开关稳压电路	328
7.2.1 电压比较器	276	8.6.3 并联型开关稳压电路	331
7.2.2 矩形波发生电路	282	本章小结	332
7.2.3 三角波发生电路	285	自我检测题	333
7.2.4 锯齿波发生电路	286	思考题与习题	334
本章小结	288	附录 部分自我检测题及习题答案	339
自我检测题	289	参考文献	346
思考题与习题	291		
第8章 直流稳压电源	298		
8.1 直流稳压电源的组成 及各部分的作用	298		

第 1 章 半导体基础知识与半导体器件的工作原理

本章讨论的主要问题

①本征半导体、N 型半导体、P 型半导体的共价键结构及其空穴和自由电子两种载流子产生的过程。

②PN 结的形成及其单向导电性。

③半导体二极管的单向导电性及简单二极管电路的工作原理。

④双极型晶体管（简称晶体管）的基本结构，在发射结正向电压、集电结反向电压作用下，晶体管内部载流子的运动规律、外部电流分配关系及其截止、放大、饱和三种工作状态的特性。

⑤结型场效应晶体管和绝缘栅型场效应晶体管的基本结构，在合适外部电压作用下，其内部载流子的运动规律。

⑥二极管、晶体管、场效应晶体管的一些主要参数。

本章的重点与难点

①二极管的单向导电性。

②晶体管的微观导电机构（内部载流子的运动规律）、晶体管在截止、放大、饱和三种工作状态下的特性。

③结型场效应晶体管和绝缘栅型场效应晶体管的微观导电机构（内部载流子的运动规律）及其在夹断区、恒流区、可变电阻区三种工作状态下的特性。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

自然界中的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，它们极易挣脱原子核的束缚成为自由电子，在外电场作用下，这些自由电子产生定向运动（称为漂移运动）形成电流，故金属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、塑料等）的最外层电子受原子核的束缚力很强，它们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。半导体材料的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紧紧束缚，因此，半导体的导电特性介于两者之间。

半导体是制造电子器件的主要材料。半导体获得广泛应用的主要原因，不在于它的导电特性介于导体和绝缘体之间，而在于它具有如下几个性能：

(1) 热敏性

导电性能受温度影响很大，利用这一特性可将半导体制成热敏电子元件。

(2) 光敏性

导电性能受光照射强度的影响很大，利用这一特性可将半导体制成光敏电子元件。

(3) 掺杂性

通过掺入微量其他元素物质，可以非常显著地提高其导电性能，例如，在纯净的半导体中掺入百万分之一的其他微量的物质（五价的磷或三价的硼）可使其导电性能增强一百万倍；不仅如此，更为重要的是，在纯净的半导体中，通过掺入不同价元素的微量物质（如五价的磷或三价的硼），可改变其导电的类型，正是这一特性，才使得现代半导体电子器件的制造成为可能。

1.1.2 本征半导体的共价键结构

纯净的、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。电子技术中，常用的半导体材料是硅（Si）和锗（Ge），它们都是四价元素，原子最外层轨道上有四个电子，称为价电子。由于硅（Si）和锗（Ge）材料导电性能只与价电子有关（内层电子被原子核束缚很紧，不参与导电），在讨论其导电机构时，采用如图 1-1 所示的简化原子结构模型。由于原子整体呈电中性，故图 1-1 中带 +4 的圆圈部分表示带四个电子电荷量的正离子（也有文献上将这一正离子称之为惯性核或原子实）。

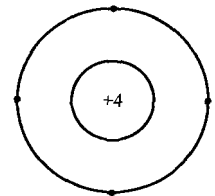


图 1-1 硅和锗的简化原子结构模型

由原子理论可知，原子外层为八个价电子最稳定，因此，当把硅或锗材料制成单晶体（本征半导体）时，硅或锗晶体中每个原子都要从相邻的四个原子获得另外的四个价电子，以达到稳定状态，这样就使得相邻两个原子有一对价电子成为共有电子，这些共有电子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。因此，本征半导体中，每个原子都和相邻的四个原子用共价键的形式互相紧密结合起来，其共价键结构平面示意图如图 1-2 所示。

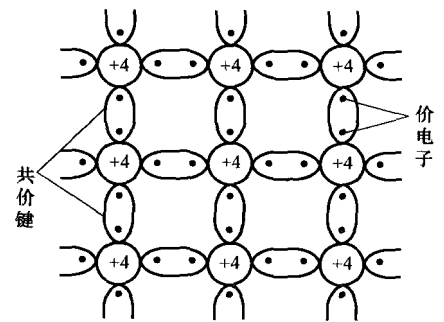


图 1-2 本征半导体共价键结构平面示意图

1.1.3 本征半导体热激发

本征半导体中共价键具有很强的结合力，共价键中的电子称为束缚电子。在热力学温度 $T=0K$ 和无外界其他因素作用时，价电子全部牢牢地束缚在共价键中，此时，本征半导体相当于绝缘体。

在室温下，只有极少数价电子从热运动中获得足够大的能量才能挣脱共价键的束缚而成为自由电子。在没有外电场作用时，自由电子在半导体中做无规则的运动，半导体中不会出现“电子”电流。

某原子的一个价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，该原子因失去一个价电子而带一个正的电子电荷量，并在原来共价键中留下了一个空位，这个空位称为“空穴”；为了分析方便，通常将一个正的电子电荷量看做是空穴所具有。本征半导体中这种由于热运动使自由电子与空穴成对“产生”的物理现象称为“热激发”（也称本征激发），如图1-3所示。空穴的出现是半导体导电机构与导体导电机构显著不同的一个重要特征。

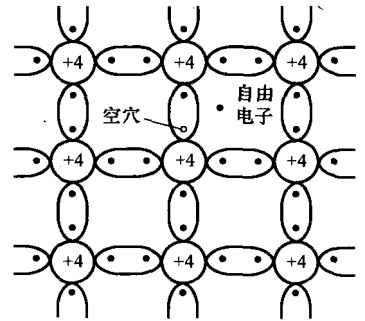


图1-3 本征半导体中的空穴和自由电子

由原子能带理论可知，某一共价键中的束缚电子“跳到”另一出现“空穴”的相邻共价键中（成为另一共价键中的束缚电子）填补其空穴所需的能量，要比该共价键中的束缚电子“跳出”共价键束缚而成为自由电子所需的能量小得多，因此，在室温下，某一共价键中的束缚电子填补相邻共价键中的空穴的过程很容易发生。这种甲共价键中的空穴被乙共价键中的束缚电子填补的结果，使得甲共价键中的空穴“消失”，而空穴却出现在乙共价键中。因此，空穴在两个相邻共价键中的移动，实质上是束缚电子在两个相邻共价键中相反方向移动的结果。需要注意的是，束缚电子在两个相邻共价键中的移动与自由电子的移动是两种不同的“电子运动”过程。为了避免分析这两种不同的“电子运动”过程时发生混淆，通常将束缚电子在相邻共价键中填补空穴的移动过程用“空穴”在相邻共价键中反方向的移动过程来代替。在没有外电场作用时，空穴在半导体中做无规则运动，半导体中不会出现“空穴”电流。

综上所述，半导体中存在两种运载电荷的粒子，即带负电的自由电子和带正电的空穴，它们统称为载流子。

本征半导体中，本征激发使自由电子与空穴总是同时成对“产生”，因此，两种载流子的浓度总是相等的。用 n_i 和 p_i 分别表示自由电子和空穴的浓度，即有 $n_i = p_i$ ，下标 i 表示本征半导体。在室温下，本征半导体中因“热激发”产生的两种载流子的浓度是很低的，因而其导电性能很差。

室温下，只有少量共价中束缚电子在热运动中获得足够能量挣脱共价的束缚成为自由电子，从而产生少量自由电子-空穴对；另一方面，自由电子在热运动过程中必然会与原子碰撞而发生能量的转移，从而使自身不具有自由电子所应具备的能量而被“空穴”俘获又重新成为共价键中的束缚电子，因而使自由电子与空穴成对消失，这种现象称为自由电子与空穴的“复合”。显然，在一定温度下，两种载流子的产生过程和复合过程是相对平衡的，即自由电子-空穴对产生与复合的数目相等，因而，载流子的浓度也是一定的。

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。由半导体理论可知，本征半导体中载流子的浓度为

$$n_i = p_i = K_1 T^{3/2} e^{-E_G/(2kT)} \quad (1-1)$$

式中， n_i 、 p_i 分别为自由电子和空穴的浓度 (cm^{-3})； K_1 为与半导体材料有关的常量； T 为热力学温度 (K)； k 为玻尔兹曼常数 ($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)； E_G 为禁带宽度（即热力学温度零度时，挣脱共价束缚所需要的最小能量），单位为 eV（电子伏）。对锗来说， $E_G =$

0.68eV；对硅来说， $E_G = 1.1\text{eV}$ 。

对于硅材料，大约温度每升高 8°C ，本征载流子浓度 n_i 增加一倍；对于锗材料，大约温度每升高 12°C ， n_i 增加一倍。利用半导体这一热敏特性可制成热敏器件（如热敏电阻）。此外，半导体载流子浓度还对光照强度比较敏感，可制成光敏器件。

在半导体中加有外电场（外电压）时，自由电子与空穴在外电场（外电压）作用下都能够产生定向运动，自由电子逆电场方向运动，空穴顺电场方向运动（注意实际上是价电子在共价键之间逆电场方向运动的结果），对外部呈现出一定的电流。显然，半导体中的电流是由自由电子和空穴两种载流子形成的电流之和。

1.1.4 杂质半导体

通过扩散制造工艺，在本征半导体中掺入微量（例如百万分之几）其他元素的物质（称之为“杂质”）所得到的半导体称为“杂质半导体”。通过掺杂方式不仅可使杂质半导体导电性能大大加强，而且根据掺入杂质价电子的不同，可获得电子型（简称N型，“Negative”第一个字母）和空穴型（简称P型，“Positive”第一个字母）两种杂质半导体。杂质半导体是制造半导体器件的基本材料。

1. N型半导体

在本征硅（或锗）半导体（由于硅和锗都是四价元素，两者的简化原子模型相同，下面以硅为例）中，掺入微量五价元素杂质，如磷，则微量磷杂质的掺入并不改变本征硅半导体中原子的晶格排列，只不过使得原来晶格中的某些硅原子被磷原子所取代。由于磷原子的最外层有五个价电子，磷原子其中的四个价电子与四个相邻硅原子组成四个完整共价键时，还多余一个价电子，如图1-4所示。这个多余的价电子不受共价键的束缚，只受磷原子核的束缚，而磷原子核对这个多余价电子的束缚力较弱。在常温下，每个磷原子多余的一个价电子都能从热运动中获得足够能量而挣脱磷原子核（而不是共价键）的束缚成为自由电子。与此同时，由于磷原子失去一个电子则自身变为一个带正电的不能移动（共价键很强的结合力决定的）的磷离子，也称杂质离子，显然，磷离子不参与导电。由于每掺入一个磷原子就能够在半导体中提供一个自由电子，故称磷原子称为施主原子（或称磷为施主杂质）。其平面共价键结构示意图如图1-4所示。

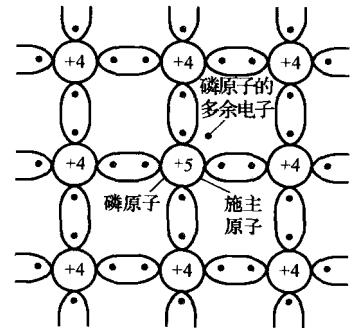


图1-4 N型半导体平面共价键结构示意图

另一方面，由于热激发，这种杂质半导体还会产生极少量的自由电子-空穴对，但其数量远远少于掺入磷原子所获得的自由电子数目。故这种半导体中自由电子浓度远远大于空穴的浓度，即 $n_n \gg p_n$ （下标n表示N型半导体），所以，自由电子称为多数载流子（简称多子），空穴称为少数载流子（简称少子）。这种半导体称为电子型半导体，简称为N型半导体。

2. P型半导体

通过扩散制造工艺，在本征硅（或锗）半导体中掺入微量的三价元素杂质，如硼，则微量硼杂质的掺入并不改变本征硅半导体中原子的晶格排列，只不过使得原来晶格中的某些

硅原子被硼原子所取代。由于硼原子的最外层有三个价电子，每个硼原子在与三个相邻的硅原子组成三个完整共价键时，剩下一个相邻的硅原子的共价键由于缺少一个价电子而不完整，其中留下一价电子的空位，如图 1-5 所示。这里应注意，由于硼原子为电中性，该价电子空位为电中性，因此，该价电子空位不是空穴。其平面共价键结构示意图如图 1-5 所示。但是，当另外两个硅原子组成的完整共价键中某一价电子由于热运动获得足够的能量（常温下都能获得）而填补上述硼原子产生的价电子空位时，则硼原子获得一个电子而变成一个不能移动（共键价结合力决定的）的负离子。与此同时，必然在相邻两硅原子原来完整共价中留下了一个空位，这一空位才称之为空穴。（需要注意的是，两个硅原子完整共价键中失去价电子留下的空位与硼原子不完整共价键中留下的空位不一样，前者带正电，后者不带电）。在电场作用下，相邻硅原子共价键中的束缚电子很容易逆着电场方向定向移动填补空穴形成电流，为了区别于自由电子移动形成的电流，将束缚电子在共价键之间定向移动形成的电子电流用反向移动的空穴电流来代替，因此，空穴也是载流子。每掺入一个硼原子，硼原子就可以从硅原子接收一个价电子，从而在半导体中产生一个空穴，故硼原子称为受主原子（或称硼为受主杂质）。

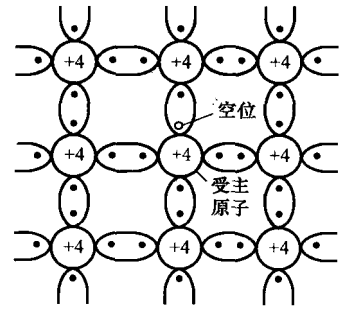


图 1-5 P 型半导体平面共价键结构示意图

另一方面，由于热激发，半导体还会产生极少量的自由电子-空穴对，但其数量远远少于掺入硼原子所获得的空穴数目。因此，这种半导体中空穴浓度远远大于自由电子的浓度，即 $p_p \gg n_p$ （下标 p 表示 P 型半导体），所以，空穴称为多数载流子（简称多子），自由电子称为少数载流子（简称少子），这种半导体称为空穴型半导体，简称为 P 型半导体。

1.1.5 P 型和 N 型半导体导电机构模型的表示方法

综上所述，P 型和 N 型半导体的导电机构模型分别表示为图 1-6 和图 1-7。图中，带“-”号的圆圈表示不能移动的负离子，带“+”号的圆圈表示不能移动的正离子，小圆圈表示空穴，小黑点表示自由电子。

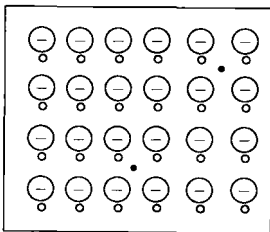


图 1-6 P 型半导体的导电机构模型

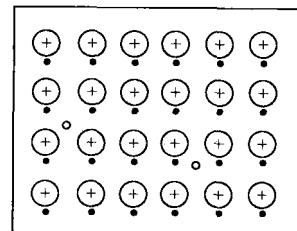


图 1-7 N 型半导体的导电机构模型

1.1.6 半导体中的电流

了解了半导体中的载流子产生过程之后，再来讨论它在电场作用下形成的电流。

1. 漂移电流

在电场作用下，半导体中的载流子做定向漂移运动形成的电流，称为漂移电流。它类似于金属导体中的传导电流。

半导体中有两种载流子：电子和空穴。当半导体外加电场时，电子逆电场方向做定向运动，对外部电路回路形成电子电流 I_n ，而空穴顺电场方向做定向运动，对外部电路回路形成空穴电流 I_p 。虽然它们运动的方向相反，但是电子带负电，其电流方向与电子运动方向相反，所以 I_n 和 I_p 的方向是一致的，均为空穴流动的方向。因此，半导体中的总电流为两者之和，即

$$I = I_n + I_p \quad (1-2)$$

漂移电流的大小将由半导体中载流子浓度、迁移速度及外加电场的强度等因素决定。

2. 扩散电流

从热力学的观点看，物质总是从浓度高处向浓度低处进行扩散运动，直至浓度平衡。对于物体中的载流子也是如此。在半导体中，当载流子的浓度分布不均匀时，载流子也会从浓度高处向浓度低处做扩散运动，从而形成扩散电流，直至载流子浓度达到平衡为止。

半导体中某处的扩散电流主要取决于该处载流子的浓度梯度，浓度梯度越大，扩散电流越大，而与该处的浓度值大小无关。如半导体中载流子的浓度分布曲线如图 1-8 所示，则其扩散电流正比于浓度分布线上某点处的斜率 $dn(x)/dx$ ($dp(x)/dx$)。

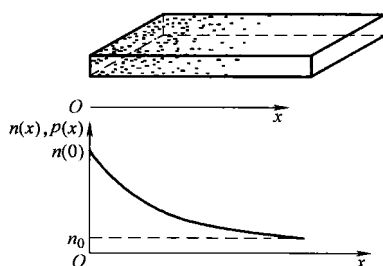


图 1-8 半导体中载流子的浓度分布

综上所述可知：

- 1) 本征半导体在常温下，热激发产生极少量的电子-空穴对，故导电性能很差。
- 2) 在本征半导体中掺入微量的五价元素物质（如磷）可获得 N 型半导体。N 型半导体中，每个磷原子提供一个自由电子，故称其为施主原子，磷原子提供一个自由电子的同时其自身变成不能移动正离子（不参与导电，该正离子不是载流子）。另一方面，本征激发产生少量自由电子-空穴对。N 型半导体中，自由电子为多子，空穴为少子。
- 3) 在本征半导体中掺入微量的三价元素物质（如硼）可获得 P 型半导体。P 型半导体中，每个硼原子接受相邻两个硅原子完整共价键中一个价电子，故称其为受主原子，硼原子在接受相邻两个硅原子完整共价键中一个价电子时，其自身变成不能移动负离子（不参与导电，该负离子不是载流子），与此同时，原相邻两个硅原子完整共价键中由于缺少一价电子而产生一个空穴。另一方面，本征激发产生少量自由电子-空穴对。P 型半导体中，空穴为多子，自由电子为少子。
- 4) 半导体中有两种载流子，即自由电子和空穴。在外电场作用下，半导体对外显示的电流是电子电流和空穴电流之和。空穴在共价键之间定向移动形成空穴电流，实质上是价电子在共价键之间逆着电场方向移动的结果。

总之，本征半导体通过掺杂，可以大大改变半导体内载流子的浓度，并使一种载流子多，而另一种载流子少。对于多子，根据实际需要，可通过掺杂控制其浓度，且多子浓度总是大大于少子浓度，因而温度变化对多子浓度的影响微乎其微；另一方面，由于少子由本征