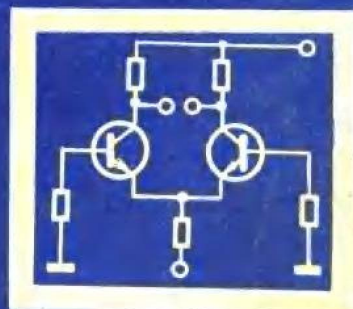


杨耆董 邬国扬 傅丰林 编

电子线路分析基础

DIAN ZI XIAN LU FEN XI JI CHU



西北电讯工程学院出版社

内 容 简 介

本书是西北电讯工程学院信息工程系的电子线路基础课程的教材，由该系电子线路教研室编写。

书中主要内容有晶体二极管与三极管，基本放大器，放大器的频率响应，场效应管放大器，负反馈放大器，功率放大器，集成运算放大器及其应用，直流稳压电源及电子线路的计算机辅助分析等。

本书的最后一章，系统地编写了有关电子线路的计算机分析的内容，列举了多个实例和程序，这将有助于加强对理工科大学生的基本训练，有助于广大科技人员初步学习和掌握这方面的内容。

书中每章均有内容提要及小结，各章后面附有参考文献目录、思考题和习题，习题附有答案。

本书可供大专院校通信、电子技术、电子工程或相近专业作为电子线路分析基础的教材，也可作为电大、夜大和职大学生的参考书，还可供有一定电工知识的工程技术人员作为学习电子线路的参考书。

电子线路分析基础

杨善董 邬国扬 傅丰林 编

西北电讯工程学院出版社出版

西北电讯工程学院印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 25 6/16 字数 641千字
1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷 印数 13,000

统一书号：15322·30

定价：4.30元

序 言

《电子线路分析基础》一书是西北电讯工程学院信息工程系的电子线路基础课程的教材。它的前身《晶体管放大电路》，早在1974年就已出版，曾在全国许多大学、工厂和研究所内部广泛交流，并被国内正式出版的多种同类教材列为主要参考书。现在编者又结合多年来教学实践的经验，根据近年来微电子技术发展情况及动向，针对当前教材普遍存在的内容偏多，篇幅过大的缺点，削枝强干，精选内容，突出重点，重新编写了本教材，并以《电子线路分析基础》为名正式出版。

本书主要研究晶体管与线性集成电路所构成的电子线路的原理、分析和计算。由于集成电路的迅速发展，本书对于半导体器件物理及分立器件电路的设计的讲述尽量删减，侧重讨论在集成电路与分立器件电路中都要用到的基本概念、基本原理、基本分析方法以及基本单元电路和线性集成电路的基本应用。

鉴于计算机科学技术的飞速发展和广泛应用，使电子线路的分析与设计跨进了利用计算机进行自动分析、设计的高级发展阶段。为此，在本教材的第九章中，系统地增编了有关电子线路的计算机辅助分析的内容，列举了多个实例和程序，这将有助于加强对理工科大学生的基本训练，有助于广大科技人员初步学习和掌握这方面的内容。

本书在内容安排上力求贯彻从实际出发，循序渐进，由浅入深，由简入繁，由特殊推广到一般，由感性上升到理性等原则。注意管路结合，由低频到高频，由小信号到大信号，由单级到多级，由基本放大器到反馈放大器，由分立元件到集成电路。注意讲清基本原理，基本概念；并通过例题、习题，使学生逐步掌握分析电子线路的基本方法。

本书前面七章是基本内容，按讲授七十学时编写的，第八、九章各需讲授十学时；每小时讲授内容约五千字。各章中小字排印的部分可作为参考内容。使用本书时，读者应具备物理、电路理论，信号与系统，线性代数和算法语言(BASIC和FORTRAN语言)的基础；读者也可根据个人情况选学本书部分章节。书中每章均有内容提要及小结，并附有参考文献、思考题、习题及答案。学习本书时应注意理论联系实际，将课堂讲授、复习、作业、实验各环节紧密结合起来，才能把知识真正学到手。

参加本书编写的有杨耆董(负责执笔写第一、四、八、九章)，邬国扬(负责写第二、三、六章)，傅丰林(负责写第五、七章)。在编写过程中，董春生、裴昌幸、李福全等同志多次参加讨论，对原稿提出过许多宝贵的意见。

由于我们的水平有限，加之时间仓促，书中必然存在许多缺点和错误，敬请使用本书的师生及其他读者给予批评指正。

编 者

1984年6月

常用符号说明

A	放大倍数或增益的通用符号
\mathbf{A}	关联矩阵
A_g	互导放大倍数
A_i	电流放大倍数
A_{iL}	基本放大器负载 R_L 短路时电流放大倍数
$A_i(s)$	电流转移函数
A_{iLf}	反馈放大器负载 R_L 短路时电流放大倍数
A_{0c}	共模电压放大倍数
A_{0d}	差模电压放大倍数
A_v	互阻放大倍数
A_{v0}	基本放大器负载开路时互阻放大倍数
A_{vof}	反馈放大器负载开路时互阻放大倍数
A_u	电压放大倍数通用符号
A_{uf}	反馈放大器电压放大倍数
A_{uh}	高频电压放大倍数
A_{ul}	低频电压放大倍数
A_{uo}	负载 R_L 开路时电压放大倍数
A_{uof}	反馈放大器负载 R_L 开路时电压放大倍数
A_{um}	中频电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时电压放大倍数
$A_u(s)$	电压转移函数
A_{usf}	反馈放大器考虑信号源内阻时的电压放大倍数
B	晶体管基极；反馈系数通用符号
B_g	互导反馈系数：反馈网络的反馈电流与输出电压之比
B_i	电流反馈系数：反馈网络的反馈电流与输出电流之比
B_v	互阻反馈系数：反馈网络的反馈电压与输出电流之比
B_u	电压反馈系数：反馈网络的反馈电压与输出电压之比
BV_{CBO}	基极开路时集电极-发射极间的反向击穿电压
BV_{CER}	基极-发射极间接电阻 R 时集电极-发射极间的反向击穿电压
BV_{CES}	基极-发射极短路时集电极-发射极间的反向击穿电压
BV_{DS}	漏源间的击穿电压
BV_{EBO}	集电极开路时发射极-基极间的反向击穿电压
C	电容的通用符号
C_D	扩散电容
C_{dL}	漏极-源极间电容
C_e	发射极旁路电容

C_{gd}	栅极-漏极间电容
C_{gs}	栅极-源极间电容
CCCS	电流控制电流源
CCVS	电流控制电压源
CMRR	共模抑制比
C_T	势垒电容
C_μ	混合 π 型等效电路中集电结的等效电容
C_x	混合 π 型等效电路中发射结的等效电容
D	非线性失真系数, 漏极, 二极管
D_f	反馈放大器非线性失真系数
D_n	电子扩散系数
D_p	空穴扩散系数
D_Z	稳压二极管
E	发射极, 电源电压通用符号
F	反馈深度, 重复频率
f	频率通用符号
f_{bw}	通频带
f_{bwf}	有反馈时的通频带
f_h	放大器增益下降 3dB 的上限频率
f_{hf}	反馈放大器增益下降 3dB 的上限频率
f_l	放大器增益下降 3dB 的下限频率
f_{lf}	反馈放大器增益下降 3 dB 的下限频率
f_α	共基接法下晶体管电流放大系数的上限频率
f_β	共射接法下晶体管电流放大系数的上限频率
f_T	晶体管的特征频率, 即共射接法下三极管电流放大系数为 1 时的频率
G	栅极, 固定电导的通用符号
G_m	增益裕度
g_m	跨导
g	微变电导的通用符号
h_{ie}	共射接法下晶体管输入电阻
h_{fe}	共射接法下晶体管电流放大系数
h_{oe}	共射接法下晶体管输出电导
h_{re}	共射接法下晶体管反向电压放大系数
i	电流瞬时值通用符号
I	直流电流, 正弦电流简化符号
i_B	基极电流总瞬时值
i_b	基极电流交流分量瞬时值
I_B	基极直流电流
I_B^-	运算放大器反相端偏置电流

I_B^+	运算放大器同相端偏置电流
I_{BQ}	基极静态电流
i_C	集电极总电流瞬时值
i_c	集电极电流交流分量瞬时值
I_C	集电极直流电流
I_{CBO}	发射极开路时集电极-基极反向饱和电流
I_{CEO}	穿透电流
I_{cm}	集电极正弦电流幅值
I_{CM}	集电极电流额定值
I_{CQ}	集电极静态电流
i_D	漏极总电流瞬时值
i_d	漏极电流交流分量瞬时值
I_D	漏极直流电流
I_{DQ}	漏极静态电流
I_{DSS}	漏极饱和电流
i_E	发射极总电流瞬时值
i_e	发射极电流交流分量瞬时值
I_E	发射极直流电流
I_{EQ}	发射极静态电流
I_i	放大器输入电流通用符号
i_L	负载总电流瞬时值
I_L	负载电流交流分量
I_n	电子电流
I_o	放大器输出电流
I_{OM}	最大允许整流电流
I_{OS}	失调电流
$I_{o,of}$	反馈放大器输出短路时的输出电流
$I_{o,of}$	基本放大器输出短路时的输出电流
I_p	空穴电流
I_R	二极管反向电流
I_S	二极管反向饱和电流
I_Z	稳压管稳定电流
J	电流密度通用符号
J_n	电子漂移电流密度
$J_{n,D}$	电子扩散电流密度
J_p	空穴漂移电流密度
$J_{p,D}$	空穴扩散电流密度
K	绝对温度
L	电感通用符号

n	电子密度通用符号
N	电子型半导体
N_F	噪声系数
n_i	本征激发电子浓度
$n_p(0)$	在 P 区边界处的电子浓度
n_{p0}	在 P 区达到平衡时的电子浓度
p	空穴浓度通用符号
P	空穴型半导体
P	功率通用符号
P_{CM}	集电极最大允许损耗功率
P_{DM}	漏极最大允许损耗功率
P_E	电源供给功率
P_L	负载得到功率
p_i	本征激发空穴密度
p_f	极点
$p_n(0)$	在 N 区边界处的空穴浓度
p_{n0}	在 N 区达到平衡时的空穴浓度
P_o	输出功率通用符号
Q	静态工作点
Q_f	基本割集矩阵
R	固定电阻通用符号
r	微变电阻通用符号
R_b	接到基极的固定电阻, 余类推
r_{be}	共射接法下基射极之间的微变电阻
$r_{b'e}$	发射结的微变电阻
r_{ce}	共射接法下集射极之间的微变电阻
R_i	输入电阻通用符号
R_{ie}	共模输入电阻
R_{id}	差模输入电阻
R_{if}	反馈放大器的输入电阻
R_L	负载电阻
R'_L	R_L 与 R_o 的并联, 等效负载电阻
R_o	输出电阻通用符号
R_{of}	反馈放大器输出电阻
R_s	信号源内阻
R_T	热阻
R_w	电位器
S	场效应管的源极
S_A	电压增益变化灵敏度

S_I	电流调整率
S_R	纹波抑制率
SR	转换速率
T	晶体管, 周期, 温度
T_{IM}	最高允许结温
T_r	变压器
t_r	上升时间
u	电流瞬时值通用符号
U	直流电压, 正弦电压简化符号
U_{BE}	基射极间直流电压
U_{be}	基射极间交流电压
U_{BEQ}	基射极间静态电压
$U_{b'e}$	发射结上交流电压
u_{ce}	集射极间电压交流分量瞬时值
u_{CE}	集射极间电压总瞬时值
U_{CE}	集射极间直流电压
U_{CEQ}	集射极间静态电压
U_{CES}	集射极间临界饱和电压
U_{cem}	集射极间交流电压幅值
u_{ds}	漏源极间电压交流分量瞬时值
u_{DS}	漏源极间总电压瞬时值
U_{DS}	漏源极间直流电压
U_{DSQ}	漏源极间静态电压
u_{gs}	栅源极间电压交流分量瞬时值
u_{GS}	栅源极间总电压瞬时值
U_{GS}	栅源极间直流电压
U_{GSQ}	栅源极间静态电压
u_i	输入电压交流分量瞬时值
u_I	输入总电压瞬时值
U_i	输入电压交流分量
U_o	输出电压通用符号
U_{oo}	负载开路时输出电压
U_{oot}	负载开路时反馈放大器输出电压
U_{OS}	失调电压
U_P	场效应管夹断电压
U_{RM}	二极管最高反向工作电压
U_T	增强型场效应管的开启电压, 温度的电压当量
U_Z	稳压管工作电压
U_-	运算放大器反相端对地电压

U_+	运算放大器同相端对地电压
U_p	PN结的位垒
U_r	二极管门限电压
VCCS	电压控制电流源
VCVS	电压控制电压源
W	基区宽度
Z	阻抗通用符号
Z_i	输入阻抗
Z_o	输出阻抗
ζ	集电极电压利用系数
η	效率通用符号
η_c	集电极效率
η_T	变压器效率
φ	相移; 附加相移
φ_m	相位裕度
τ	时间常数
τ_B	晶体管基区非平衡少子的寿命
σ	电导率通用符号
σ_n	N型半导体电导率
σ_p	P型半导体电导率
μ	迁移率通用符号
μ_n	电子迁移率
μ_p	空穴迁移率
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
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 的之比

目 录

第一章 晶体二极管与三极管	
第一节 半导体的导电性能	
一、什么是半导体	1
二、单个原子中电子的能级	1
三、晶体的共价键结构	2
四、晶体的能带组成	3
五、本征半导体的导电性能	4
六、N型半导体	7
七、P型半导体	8
八、半导体的扩散电流	9
小结	10
第二节 PN结与晶体二极管	
一、PN结势垒的形成	11
二、PN结的单向导电特性	13
三、PN结的击穿	18
四、PN结的电容效应	20
五、晶体二极管	21
第三节 晶体三极管	
一、晶体三极管的结构与符号	26
二、晶体管的四种运用状态	26
三、晶体管的电流流通情况	27
四、晶体管的放大原理	30
五、晶体三极管的特性曲线	32
六、晶体管的主要参数	35
七、晶体管的直流等效电路	37
小结	38
参考文献	40
思考题与习题	40
第二章 基本放大器分析	
第一节 放大器概论	
一、用途和类型	42
二、基本放大器组成	42
三、放大器主要性能指标	44
第二节 放大器基本分析方法	
一、直流、交流通路及其分析	46
二、图解法	47
三、等效电路法	53

第三节 偏置电路及其稳定性	
一、温度对静态工作点的影响	57
二、稳定的偏置电路	57
三、稳定偏置电路稳定性的定量分析	59
四、其它形式的偏置电路	60
第四节 放大器性能分析	
一、共射放大器	61
二、共基放大器	62
三、共集放大器	64
四、三种组态性能比较	65
五、发射极接电阻的共射放大器	68
第五节 多级放大器	
一、级间耦合方式	69
二、多级放大器的基本性能指标	70
三、高输入电阻的晶体管电路	72
本章小结	74
参考文献	75
思考题与习题	75

第三章 放大器的频率响应

第一节 线性失真及其分析方法	
一、线性失真	80
二、分析线性系统响应的一般方法	82
小结	90
第二节 单级放大器的频率响应	
一、三个频率区段的划分	91
二、中频段频率响应	92
三、低频段频率响应	92
四、高频段频率响应	94
五、晶体管高频参数	99
第三节 多级放大器的频率响应	
一、典型的两级共射放大器的频率响应	102
二、多级放大器的幅频特性和相频特性	107
三、多级放大器的通频带	109
第四节 放大器的阶跃响应	
一、单位阶跃电压和阶跃响应	111
二、单级放大器的阶跃响应	111
三、多级放大器的阶跃响应	114
本章小结	116

参考文献	117
思考题与习题	117

第四章 场效应管放大器

第一节 场效应晶体管	
一、结型场效应管的原理与特性曲线	120
二、绝缘栅场效应管的原理与特性曲线	125
三、场效应管的参数和等效电路	128
四、场效应管与晶体管的比较	131
第二节 场效应管放大器	
一、直流偏置电路与静态分析	132
二、场效应管放大器电路的分析与计算	135
本章小结	139
参考文献	140
思考题与习题	140

第五章 负反馈放大器

第一节 负反馈的基本概念	
一、什么是负反馈	143
二、负反馈放大器的基本组态	144
三、反馈的判别	145
第二节 四种组态负反馈放大器的性能分析	
一、电压串联负反馈	146
二、电流并联负反馈	150
三、电压并联负反馈	152
四、电流串联负反馈	154
第三节 负反馈对放大器性能的改善	
一、提高了电压放大倍数的稳定性	157
二、展宽了通频带	158
三、减小了非线性失真	158
四、抑制了内部噪声和干扰	160
第四节 负反馈放大器的方框图分析	
一、电压并联负反馈放大器的分析	161
二、电流串联负反馈放大器的分析	163
三、电压串联负反馈放大器的分析	165
四、电流并联负反馈放大器的分析	167
第五节 典型电路分析	
第六节 反馈放大器的稳定性	
一、自激条件	176
二、反馈放大器的稳定判据	176
三、反馈放大器的稳定裕度	177
四、相位补偿技术	180
第七节 放大器中的寄生反馈	

本章小结	185
参考文献	186
思考题与习题	186

第六章 低频功率放大器

第一节 概述	
一、功率放大器的特征、用途和类型	192
二、大功率低频晶体管的特点	193
三、非线性失真系数	193
第二节 单管甲类变压器耦合功率放大器	
一、电路的组成与特点	194
二、输出回路的图解法分析	195
三、功率和效率计算	195
四、晶体管的选择及甲类功率放大器的缺点	197
第三节 变压器耦合乙类推挽功率放大器	
一、电路组成与工作原理	198
二、性能分析	199
三、非线性失真与工作点选择	202
第四节 无变压器的功率放大器	
一、无输出变压器的推挽放大器	205
二、无变压器的推挽放大器	206
三、复合晶体管的推挽放大器	207
第五节 晶体管的散热与安全工作	
一、热传导的基本概念	209
二、晶体管的热阻	209
三、晶体管击穿现象	210
本章小结	211
参考文献	211
思考题与习题	212

第七章 集成运算放大器

第一节 直流信号的放大	
第二节 差动放大器	
一、差动放大器的基本形式	216
二、改进电路	218
三、差动放大器的几种接法	223
四、差动放大器的传输特性	227
五、差动放大器的失调和温漂	229
六、场效应管差动放大器	233
第三节 集成运算放大器的组成	
一、集成运放的制造特点	235
二、集成运放的制造工艺	236

三、集成运放的基本组成部分	240
四、集成运放 F007 性能分析	252
第四节 集成运算放大器的参数	
一、线性参数和线性模型	255
二、非线性参数	258
三、建立时间 t_s 和过载恢复时间 t_v	261
第五节 集成运算放大器的基本组态	
一、理想集成运算放大器的性能	262
二、分析应用电路的基本依据	262
三、反相放大组态	262
四、同相放大组态	263
五、差动放大组态	264
六、实际集成运放性能分析	265
第六节 集成运算放大器的应用	
一、集成运放使用时应注意的问题	271
二、集成运算放大器应用举例	272
第七节 集成运放性能的扩展	
一、提高输出电压摆幅	284
二、扩大输出电流	285
三、扩展全功率带宽	285
四、减小漂移	285
五、提高输入阻抗	286
六、单电源供电电路	286
七、接口电路	287
第八节 新型集成运放简介	
一、第四代集成运放介绍	287
二、其它类型集成运算放大器	291
本章小结	296
参考文献	296
思考题与习题	297

第八章 直流稳压电源

第一节 概述	
第二节 整流与滤波	
一、半波整流电路	305
二、全波整流电路	307
三、桥式整流电路	307
四、倍压整流电路	308
五、平滑滤波器	309
第三节 稳压管稳压电路	
第四节 串联型晶体管稳压电路	
一、基本的串联型稳压电路	312
二、串联型稳压电路的改进	314
三、稳压电路的过流保护电路	318

四、串联型稳压电路的设计	320
第五节 集成稳压电路	
一、基准电压	323
二、集成稳压电路 W723	328
三、集成稳压电路 5G14	330
第六节 开关型稳压电路	
一、开关型稳压电路的工作原理	333
二、串联开关型稳压电路	333
本章小结	334
参考文献	335
思考题与习题	335

第九章 电子线路的计算机辅助分析

第一节 什么是计算机辅助电路分析	
第二节 网络图论基础	
一、基本定义	338
二、拓扑矩阵	340
三、基尔霍夫电流定律的矩阵表达式	342
四、基尔霍夫电压定律的矩阵表达式	343
五、支路电压向量 u_b 与节点电压向量 u_n 的关系	343
第三节 节点分析法	
一、不包含非独立电源的电路	344
二、含有非独立电源的电路	347
三、非独立电压源转换成非独立电流源	350
第四节 直流分析程序	
一、直流分析程序 DC1	351
二、直流分析程序 DCAN1	361
第五节 线性代数方程组求解程序	
一、高斯(Gauss)消去法	366
二、主元消去法	367
三、主元消去法程序 EP1	368
四、线性代数方程组求解程序 SOLVER	371
第六节 线性网络的交流稳态分析	
一、复数系数的线性代数方程组的解法	374
二、网络中有互感元件时的分析方法	375
三、交流分析程序 AC1	376
本章小结	390
参考文献	390
思考题与习题	390
习题答案	391

第一章 晶体二极管与三极管

本章主要讨论晶体二、三极管的工作原理,特性曲线和主要参数。先介绍晶体的共价键结构与能带图,本征半导体和杂质半导体的导电规律;然后介绍PN结的单向导电原理,结电容效应与结的击穿,引出二极管的伏安特性和主要参数。在二极管的基础上,进一步介绍三极管的工作原理,电流分配和特性参数。本章是研究晶体管电路的基础。

第一节 半导体的导电性能

一、什么是半导体

金属(如铜、铝)因有良好的导电性能,故叫做导体;云母、橡胶等因很难导电而被称做绝缘体。至于半导体,顾名思义,它的导电能力比不上导体,却比绝缘体强。物质的导电性可以用材料的电阻率 ρ 来衡量,电阻率越高,导电性越差。导体的电阻率约在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间,绝缘体的电阻率在 $10^{10} \sim 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围,而常见的两种半导体材料锗和硅的电阻率分别为 $47 \Omega \cdot \text{cm}$ 和 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,介于导体与绝缘体之间。导体和半导体的导电性不但有数量上的差异,而且还有性质上的区别。

(1) 金属的电阻率随温度升高而增大(具有正温度系数),而半导体的电阻率却随温度升高而下降(具有负温度系数)。

(2) 半导体的电阻率受温度的影响比金属大得多。温度每升高 10°C ,半导体的电阻率下降50%以上,而金属的电阻率只增加5%左右。

(3) 在纯净的半导体材料硅中掺入百万分之一的砷,就能使其导电能力增强百万倍,而在金属中掺入少量杂质,对其电阻率影响甚微。

(4) 光的照射能大大增强某些半导体的导电能力,而对金属的电阻率却几乎不产生影响。

为什么不同物质的导电性会有这样悬殊的差别呢?这就需要研究各种物质的原子结构和原子间的结合方式。我们先从单个原子的结构说起。

二、单个原子中电子的能级

世上一切物质都是由中性的原子所组成的。原子是由带正电的原子核和分层围绕原子核旋转的带负电的电子所组成。原子中电子的运动状态由四个量子数,即主量子数 n 、副量子数 l 、磁量子数 m 、自旋磁量子数 m_s 确定,电子分层情况取决于主量子数和副量子数。主量子数 n 决定了电子所在壳层,副量子数 l 决定了同一壳层内电子所在的分层。 n 的取值是正整数1、2、3、4,与其相对应的电子壳层分别为K、L、M、N层。 l 的取值是0、1、2、3,与其相对应的是s、p、d、f各分层。根据量子力学理论,电子所具有的能量不可能连续地变化,在各个电子壳层和分层上运动的电子具有不同的特定的能量值,这些特定的能量数值就叫能级。图1-1是半导体硅原子的结构图与能级图。靠近原子核的电子具有的能量低,远离原子核的电子具有的能量高。原子处于正常状态时,每个电子趋向于占据最低能量的能

级，所以离核最近的壳层，一般首先被填满。在硅原子中，第一、第二电子壳层是填满的，它们与原子核结合比较牢固，称为内层电子。而第三壳层是未填满的，这些电子距离原子核较远，原子核对它们的束缚力最小，这些电子称为价电子，它们所处的能级叫价级。里层电子从外界获得足够的能量可以跃迁到较高的能级

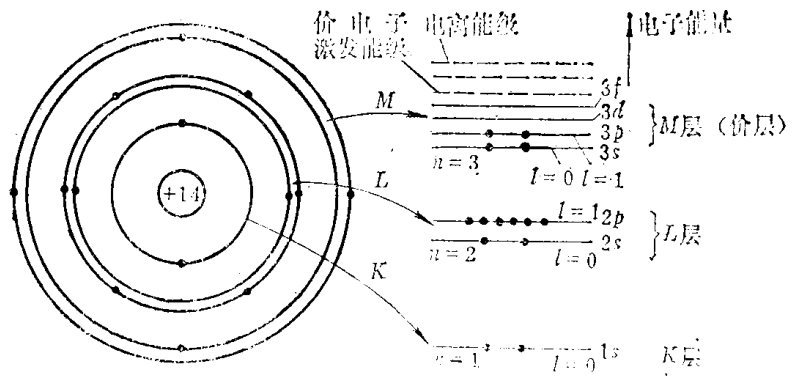


图 1-1 单个硅原子的结构与能级图

上去，这叫做激发。价电子经激发后，可以跃迁到价级以上的空能级中去，这些空能级叫做激发能级。能级图的最上方是电离能级，具有这一能量值的电子处于可以自由运动的游离状态。受激发而处于高能级的电子，在一定条件下，可以放出能量，重新回到低能级。

三、晶体的共价键结构

用来制造晶体管的原材料是由大量密集的锗或硅原子组成的，这些材料是很纯净的，纯度可高达99.999999%以上，这种纯净的半导体就叫本征半导体。在整个材料内部，原子排列十分规则的材料称为单晶体。图1-2(a)画出了硅(或锗)单晶的立体结构，图中每个小球代表一个硅原子，每个原子都与四个最靠近它的原子相邻接，四个相邻原子正好处在一个正四面体的四个顶点上，这样的晶体结构叫金刚石结构。在晶体结构中，由于大量原子紧挨在一起，每一原子的价电子在原子核与相邻原子核的共同作用下，已不再分属于各个原子，而成为晶体中各原子所共有，这种情况称为价电子的共有化运动。在硅晶体中，由于共有化运动，两个相邻的硅原子各拿出一个价电子和它相邻的一个原子共用。也就是说，两个相邻原子共用一对价电子，这对价电子中的任何一个不仅围绕着自身的原子核运动，而且也出现在相邻原子的外层轨道上。它既受到本身原子核的吸引，又受到相邻原子核的吸引，从而把两个邻接的原子牢固地束缚在一起。

这对价电子(价键电子)组成共价键，使两相邻原子形成共价结合。图(b)是硅晶体结构的共价键示意图。每个硅原子和相邻的四个硅原子构成四个共价键，包含四对共有价电子。应当注意，每个共价键中的电子仅为两原子共有，它们被束缚在这两个原子附近，不能在晶体中自由运动，因此是束缚电子。

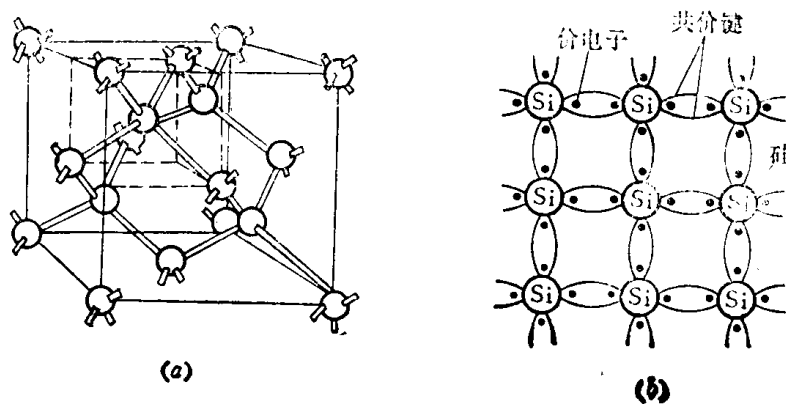


图 1-2 硅单晶的结构与共价键示意图
(a) 硅单晶结构图, (b) 硅晶体的共价键示意图

正是这个原因，在 $0K$ 附近，半导体成了不导电的绝缘体。但是价键电子的这种受束缚状态并不是永恒不变的，只要从外界供给价键电子以足够的能量，它就能挣脱共价键的束缚而到晶体中去，成为导电的自由电子，这种情况叫激发。发生在本征半导体中的激发

现象就叫本征激发。使价键电子冲破束缚所需要的起码能量称为电子的激活能 E_g 。不同物质，其激活能也不同。在室温下，锗的 E_g 约为 0.72eV 。(eV 是电子伏特， 1eV 相当于 $1.60 \times 10^{-19}\text{J}$)，硅的 E_g 约为 1.1eV 。

价键电子冲破束缚的能量又是从哪里得来的呢？加温、光照都能使价键电子得到能量。在 $T > 0\text{K}$ 时，晶体中的原子在它们的初始位置附近来回地振动，这种热振动给电子提供一定能量，使一部分价键电子从束缚状态变为自由状态，成为能导电的电子。

价键电子受激发后，将在原来位置上留下一个空位，我们把这个缺少价电子的空位叫做空穴。空穴是带正电的，因为在价电子受激发以前，硅原子核所带正电量刚好和电子所带负电量相消，表现出电中性，现在跑掉一个带负电的电子，所以有净正电荷出现。我们把这个正电荷看成是空穴所有的，其电量为 $+q$ ，数值上刚好与电子所带电量相同，但符号相反。

理论和实践都证明了^[6]空穴在半导体中可以看作自由的正电荷，在外电场的作用下，它能够沿电场方向移动，产生漂移电流。

图 1-3 说明空穴的移动过程。设最初在 A 处有一空穴，那么它附近的价键电子就有了活动余地，可以过来填补这个空位子。如果 B 处的价键电子跑过来填补 A 处的空位，这样 A 处的空穴消失了，但在 B 处又出现了一个新的空位，可以看成是空穴由 A 移到 B。同样，由于 B 处出现了空位，从 C 处跑来一个价键电子来填补 B 处的空位，这样，空穴又从 B 处移动到 C 处。这种情况正象剧场里一位观众正在观赏精彩剧目时，忽然发现前排有个空位，为了近睹为快，就移到前面空位中一样，后排的观众也相应自动地递补上去，这时人往前移，而空位逐渐向后移。

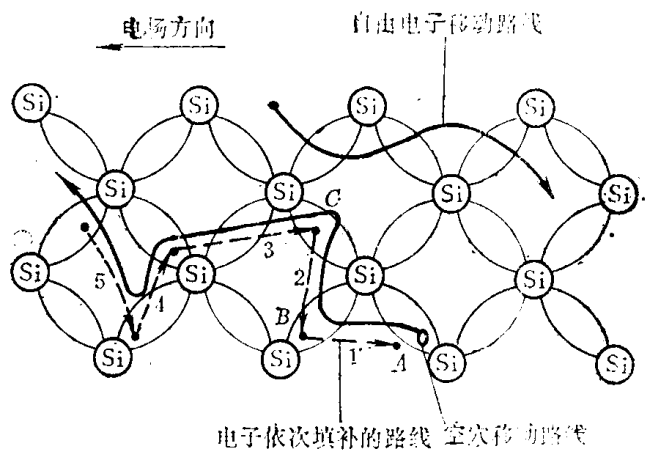


图 1-3 空穴在电场作用下的移动过程

由于空穴是带正电的，空穴的移动就是正电荷的运动，会形成电流。电流的方向就是空穴移动的方向，所以空穴也是一种载流子。有无空穴，这是半导体与金属的最大差别之一。

四、晶体的能带组成

前面我们已经讨论过单个原子的能级图，该情况适合于气体中的原子（它们相距很远，彼此互不影响）。对于半导体晶体结构来说，情况有所不同，大量的原子密集在一个狭小的空间中(如硅晶体，每立方微米中约有 500 亿个原子)。这时原子间有显著的相互影响，特别是处在最外层的价电子受到邻近原子的影响最大。由于价电子的共有化运动，使每个电子的能量状态有所改变。根据泡利不相容原理，在任一电子系统中，不

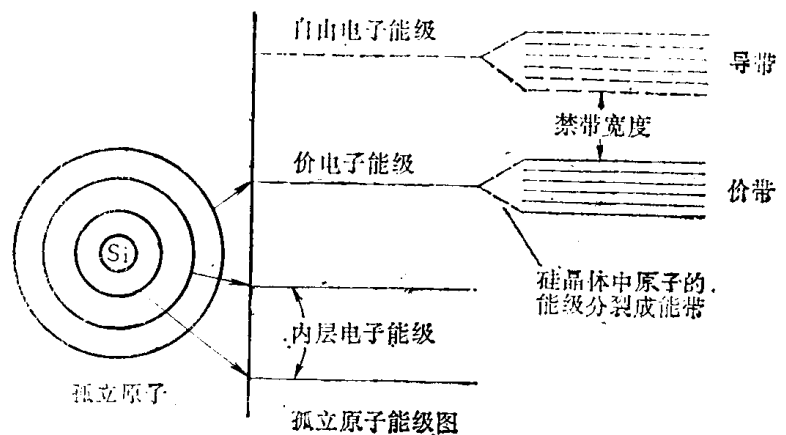


图 1-4 晶体的能带

可能有两个电子具有同一组量子数，即不可能有两个电子其 n, l, m, m_s 都相同。每一条能级上最多只能容纳两个电子，而这两个电子的自旋方向必定是相反的。我们取出一立方微米的硅晶体来研究。在这一微小空间中就存在着 500 亿个硅原子，这使原来单个硅原子的每一能级都展开(或分裂)成 500 亿条数值各不相同，取值不连续的能级。这些能级之间的间隔极其微小，由这些能级组成一条宽度不超过几个电子伏特的能带，如图 1-4 所示。

晶体中各原子的价电子所占据的能带叫价带，如果价带中所有能级都已填满了电子，这能带就叫满带。激发能级也同样要分裂成激发能带。如果激发能带中没有电子占据，则称为空带。因为价电子在获得足够能量后将跃入空带而参与导电过程，所以空带也叫导带。当满带与导带不衔接或未交叉迭合在一起时，它们之间有一不存在能级的禁区，叫做禁带。

各种物质其能带构成情况不同。金属的能带结构有两种情况，一种是导带与满带互相交叉迭(如钙)，因而没有禁带如图 1-5(a) 所示；一种是价带未填满(如铜)，如图 (b) 所示。绝缘体具有较宽的禁带，一般在 10eV 以上，如图(c) 所示。半导体的能带结构与绝缘体相似，如图(d) 所示，但禁带宽度 E_g 小得多，如锗的禁带宽度约为 0.72eV(与温度有关)，硅的禁

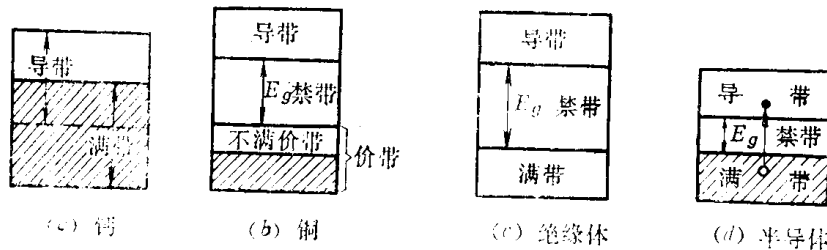


图 1-5 导体、绝缘体和半导体的能带结构

带宽度约为 1.1eV。

现在可以解释导体、半导体、绝缘体在导电性能上的差异了。金属能带结构中由于没有禁带，因此在很低温度时其原子几乎全部离子化了。在金属中存在数量惊人的自由电子(约为 10^{23} 个/cm³ 数量级)，所以导电性很好。温度升高时，原子的热运动加剧，会减小电子在电场作用下的平均定向速度，因此导电性能变差，电阻率加大。绝缘体的禁带宽度很大，因此不论在低温或常温下，热激发产生的载流子都很少，基本不导电。半导体的禁带宽度比绝缘体小得多，因此，它比绝缘体导电性好，但其载流子数目远小于金属，因此导电性又不如金属。当温度升高时，在半导体中，因激发而产生的载流子数目会急剧增加，同时由于原子热振动加剧，也会降低载流子在电场作用下的平均定向速度。前者使导电性增强，后者使导电性减弱，但前者起着主要作用，因此在温度升高时半导体的电阻率下降了。

五、本征半导体的导电性能

(1) 半导体中载流子的热平衡值——本征密度。半导体的导电性与载流子的密度大小有直接的关系，因此，首先要知道载流子密度有多大。在本征激发过程中，电子和空穴是成对产生的。温度一定，单位时间内产生出来的电子空穴对的数目(载流子的产生率)就是一个常数。那么，随着时间的推移，载流子的数目会不会无限制地增加呢？不会的。因为伴随激发现象还有一个相反的过程存在，就是当自由电子与空穴相遇时，电子可以放出多余的能量(发光或辐射电磁波)再返回空的价键中去，这一过程称为复合。复合时，电子、空穴成对

地消失。单位时间内复合掉的电子、空穴对的数目叫复合率，复合率正比于半导体中电子和空穴密度的乘积。半导体中载流子的密度越高，电子与空穴复合的几率越大。这样，在温度一定时，一方面热激发有使载流子密度不断增加的趋势，另一方面，随着电子、空穴密度的增加，复合率也要增大。然而产生率却始终不变，所以最后必将达到一个动态平衡，即

$$\text{复合率} = \text{产生率}$$

这时半导体中载流子的密度不再随时间改变，其载流子密度（或浓度）叫做本征半导体在该温度下载流子密度的热平衡值，或简称本征密度。电子、空穴密度的热平衡值分别用 n_i 和 p_i 来表示。根据半导体理论分析

$$n_i = p_i = AT^{3/2}e^{-qE_{g0}/2kT} \quad (1-1)$$

式中 k 为波茨曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

E_{g0} 是绝对温度零度时的禁带宽度（如硅为 1.21eV ，锗为 0.785eV ）；

q 为电子所带电量（绝对值）， $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ ；

T 是绝对温度；

A 是由材料决定的常数，锗的 A 为 $3.88 \times 10^{16} \text{个/cm}^3$ ，硅的 A 为 $1.76 \times 10^{16} \text{个/cm}^3$ 。

根据式(1-1)算出硅在 27°C (300K) 时的本征密度为 $1.5 \times 10^{10} \text{个/cm}^3$ ，而锗在 27°C 时的本征密度为 $2.3 \times 10^{13} \text{个/cm}^3$ ，约比硅大 1500 倍。这是因为锗的 E_{g0} 比硅的 E_{g0} 小得多，而 E_{g0} 在式(1-1)中是处在指数因子的位置。从式(1-1)还可看出，温度增加时， n_i 近似按指数规律上升。粗略估计，温度每升高 10°C ， n_i (或 p_i) 增加一倍。

(2) 载流子的迁移率。下面分析半导体中载流子的运动情况。如果无外加电场，电子和空穴将在半导体内部作无规则的热运动，如图1-6(a)所示。大量载流子的热运动，在各个方向上机会均等，形成的电流互相抵消，因而净电流为零。如果有外加电场 E (方向指向右)，则空穴在半导体中除了作热运动外，还有一个平均定向速度 \bar{v} ，其方向与电场方向一致。我们引入平均定向速度的概念，是因为空穴在运动过程中速度是不断地在改变着的，空穴会不时地与原子相碰撞，碰撞时会减少空穴的速度，或改变其运动方向，以后又再加速，再碰撞。电子的情况与空穴相同。

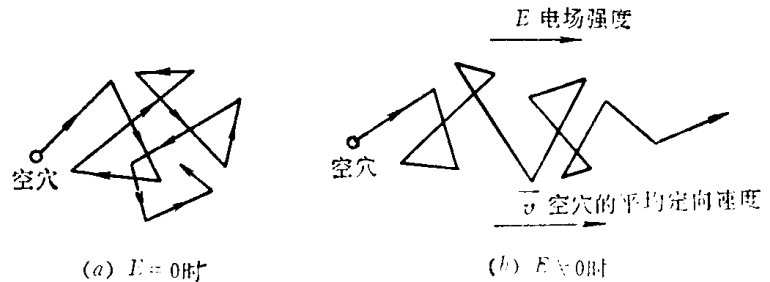


图 1-6 空穴在半导体中的运动

实验证明，半导体载流子的平均定向速度正比于外加电场强度 E 。用 \bar{v}_n 表示电子的平均定向速度； \bar{v}_p 表示空穴的平均定向速度； μ_n 表示单位电场强度下电子的平均定向速度，叫电子的迁移率； μ_p 表示单位电场强度下空穴的平均定向速度，叫空穴的迁移率。根据定义，有下列关系式：

$$\mu_n = \frac{\bar{v}_n}{E} \quad (1-2)$$

$$\mu_p = \frac{\bar{v}_p}{E} \quad (1-3)$$

表 1-1 列出了硅和锗在 300K 时的迁移率^[4]。