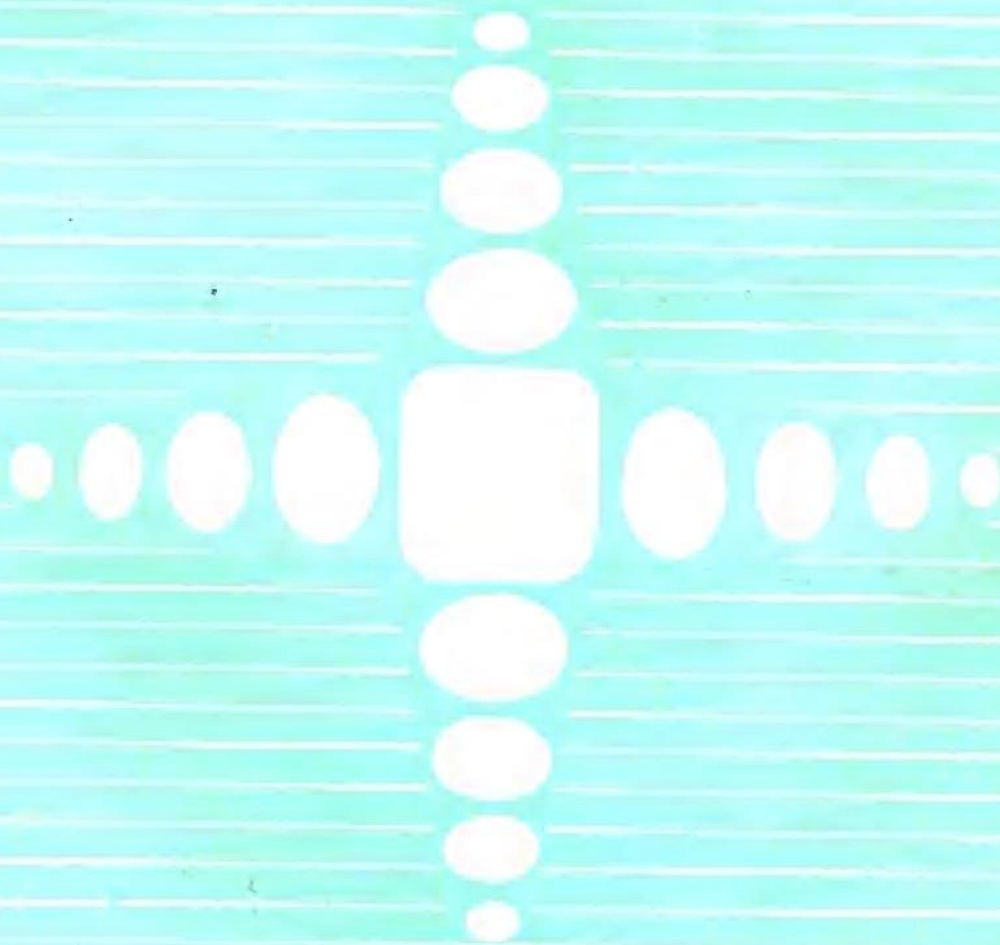


模拟电子电路

秦允阁 胡秀美 曾庆虹 编



华南工学院出版社

内 容 提 要

本书是参照1986年2月中南、西南、西北地区《电子线路》教学研究会制定的《电子线路》教学基本要求编写的。内容有：半导体器件的工作原理、基本放大电路及其分析方法、放大器的频率特性与多级放大器、负反馈放大器、功率放大器、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源等。每章附有一定数量的复习思考题和习题。

本书可作为工科高等院校无线电技术、自动化、电力和计算机类各专业相应课程的自学用书、或教学参考书，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

模拟电子电路

秦允阁 胡秀美 曾庆虹 编
责任编辑：黄贯光 林炳清

*

华南工学院出版社出版

(广州 五山)

广东省新华书店发行

广东省翁源县印刷厂印刷

*

787×1092 16开本 印张：24.625 字数：546千字

1986年12月第1版 1986年12月第1次印刷

印数1——4000

统一书号：15410·021 定价：5.40元

前 言

本书是根据1986年2月中南、西南、西北地区《电子线路》教学研究会制定的《电子线路》基本要求和参照“电子技术”专业类《电子线路》(模拟部分)自学考试大纲以及自动化和电力类各专业的相应课程《模拟电子技术》的教学基本要求编写的。出版前曾在本院无线电系的本科班、夜大和函授班试用。这次改编主要做了下列几方面的工作:(1)考虑到本书是一本技术基础课教材,接触面十分广泛,因此从本课程的教学任务出发,在保证打好基础的前提下精选了内容,如精简了器件内部的物理过程,放大器的频率特性分析等,在篇幅上有了较大的压缩;(2)由于近年来集成电路的飞速发展,因此在内容选材上贯穿“分立为集成服务”的思想,而且在集成电路的原理及应用方面加以充实和扩展;(3)考虑到便于自学,在文字叙述上力求通俗易懂和注意循序渐进,着重讲清楚物理概念,避免繁琐的数学推导。各章附有小结、复习思考题和习题供复习时参考;(4)考虑到本课程的系统性和多层次办学的需要,在编排上把基本内容排大字版,选学内容排小字版,以供各层次、各专业按教学需要选用。

本书第一、二章由曾庆虹同志编写,第三、四、五章由胡秀美同志编写,第六、七章由秦允阁同志编写,江厚祥和张练同志负责绘图,全书由秦允阁同志校对,最后由黄贯光教授审定。在编写过程中华南工学院无线电系领导和模拟电子电路教研组全体同志给予积极支持和鼓励,我们在此表示衷心感谢。

编 者

1986年6月于华南工学院

本书常用符号表

A	放大器增益(或放大倍数)
a	整流元件的阳极(正极)
A_f	反馈放大器的增益
A_i	放大器的电流增益
A_{IO}	放大器的短路电流增益(内电流增益)
A_{IS}	考虑信号源内阻、放大器带负载时的电流增益(外电流增益)
A_V	放大器的电压增益
A_{VO}	放大器空载时的电压增益(内电压增益)
A_{VS}	考虑信号源内阻、放大器带负载时的电压增益(外电压增益)
B	晶体管基极
C	晶体管集电极、电容
C_E	发射极旁路电容
$C_{bc}(C_{\mu})$	基极——集电极间电容
$C_{be}(C_{\pi})$	基极——发射极间电容
C_i	输入电容
C_o	输出电容
C_L	负载电容
CMRR	直接耦合放大器的共模抑制比
D	二极管、扩散系数、非线性失真系数
D_Z	稳压二极管
d	场效应管的漏极
E	直流电源电压、能量、晶体管发射极
E_C	集电极电源电压
E_E	发射极电源电压
E_G	栅极电源电压
e	电子电荷量, 自然对数的底
ϵ	电场强度
F	反馈系数
f	频率
f_L	放大器的下限频率
f_H	放大器的上限频率
f_{α}	半导体三极管共基极截止频率
f_{β}	半导体三极管共发射极截止频率
f_T	特征频率
Δf	频带宽度
G	电导
g	微变电导、场效应管的栅极

g_m	双口有源器件的互导(跨导)
h	双口网络的混合参数
I	$i^{(1)}$ 电流(泛指)
I_s	信号电流
I_i	输入电流
I_o	输出电流
J	电流密度
K	绝对温度的单位
L	负载、电感、自感系数
N	电子型半导体, 绕组圈数
n	电子浓度、绕组匝数比
N_F	噪声系数
P	空穴半导体, 功率
p	空穴浓度
P_C	集电极耗散功率
P_E	电源供给功率
P_o	放大器输出功率
Q	q 电荷、品质因数、静态工作点
R	r 电阻(直流和交流电阻)
R_B, R_C, R_E	晶体管的基极、集电极、发射极电阻
R_G, R_D	场效应管的栅极、漏极电阻
R_S	信号源内阻
R_L	负载电阻
$R_P(R_W)$	电位器(可调电阻)
R_f	反馈电阻
r_{be}	晶体管的输入电阻
r_{ce}	晶体管的输出电阻
r_i	放大器的输入电阻
r_o	放大器的输出电阻
S	面积、开关、稳压系数

[1] I, i 两符号附上大、小写下标, 可以表示各种不同的电流值, 以晶体管的集电极电流为例, 表示如下:

I_C	集电极静态电流
i_c	集电极电流交流分量
i_C	集电极总电流
I_e	集电极电流交流分量有效值
I_{em}	集电极电流交流分量最大值
ΔI	集电极电流变化量

s	场效应管的源极、复频率变量、稳压系数
T	温度(绝对温度以K为单位,摄氏温度以 $^{\circ}\text{C}$ 表示)、双口有源器件 ^[1]
T_R	变压器
t	时间
V	$v^{[2]}$ 电压(泛指)
V_s	信号源电压
V_i	输入电压
V_o	输出电压
V_R	比较电压
V_{Yef}	参考电压(基准电压)
V_Y	二极管或三极管的门限电压
V_T	场效应管的开启电压、温度的电压当量
V_p	场效应管的夹断电压
X	x 电抗、反馈电路中的信号量
Y	y 导纳
Z	z 阻抗
α	晶体管共基极接法的电流放大系数
β	晶体管共射极接法的电流放大系数
η	效率
θ	整流元件的导电角
μ_r	晶体管的内部电压反馈系数
σ	电导率
τ	时间常数
φ	相角
Ω	电阻的单位(欧姆)
ω	角频率

[1] 双口有源器件指晶体管、场效应管等。

[2] V 、 v 的各种不同表示方法与I、 i 脚注同。

目 录

第一章 半导体二极管和三极管

§ 1·1 半导体的导电特性	(1)
1·1·1 本征半导体的导电特性	(1)
1·1·2 杂质半导体	(4)
§ 1·2 半导体二极管 (PN 结) 及其特性	(5)
1·2·1 PN 结	(5)
1·2·2 二极管	(9)
§ 1·3 半导体三极管	(17)
1·3·1 三极管结构简介	(17)
1·3·2 三极管的工作原理	(19)
1·3·3 三极管的特性曲线	(25)
1·3·4 三极管的主要参数	(28)
本章小结、复习思考题、习题	(35)

第二章 放大电路基础

§ 2·1 放大器的基本工作原理及其主要技术指标	(40)
2·1·1 放大器的工作原理	(40)
2·1·2 放大器的主要技术指标	(44)
§ 2·2 放大器的基本分析方法	(51)
2·2·1 图解分析法	(51)
2·2·2 等效电路分析法	(57)
§ 2·3 偏置电路及工作点的稳定	(75)
2·3·1 工作点的选择和温度影响	(75)
2·3·2 分压式电流负反馈偏置电路	(78)
2·3·3 其它工作点稳定电路	(84)
§ 2·4 高输入阻抗的晶体管放大电路	(85)
2·4·1 复合管	(85)
2·4·2 提高放大器输入阻抗的措施	(87)
§ 2·5 场效应晶体管及其放大器	(91)
2·5·1 结型场效应管	(91)
2·5·2 绝缘栅场效应管	(96)
2·5·3 场效应管的微变参数和等效电路	(100)
2·5·4 场效应管的直流参数	(103)
2·5·5 场效应管放大器	(106)
本章小结、复习思考题、习题	(112)

第三章 频率特性与多级放大器

§ 3·1 频率特性的基本概念	(121)
3·1·1 为什么要研究放大器的频率特性	(121)
3·1·2 关于频率失真	(121)
3·1·3 频率特性的表示法	(122)
§ 3·2 单级放大器的频率特性	(124)
3·2·1 半导体三极管的频率参数	(124)
3·2·2 三极管的混合 π 型等效电路	(125)
3·2·3 单级放大器的频率特性	(127)
3·2·4 共发射极放大器高频段的输入阻抗与输出阻抗	(134)
3·2·5 发射极旁路电容对低频特性的影响	(135)
§ 3·3 单级放大器的阶跃响应	(138)
3·3·1 阶跃电压	(138)
3·3·2 单级放大器的阶跃响应	(138)
§ 3·4 RC 耦合多级放大器	(141)
3·4·1 多级放大器的组成	(141)
3·4·2 多级放大器的耦合方式	(142)
3·4·3 RC 耦合多级放大器的电压放大倍数	(143)
3·4·4 多级放大器的频率特性	(145)
3·4·5 多级放大器的阶跃响应	(149)
§ 3·5 展宽放大器通频带的方法	(149)
3·5·1 电抗元件补偿法	(150)
3·5·2 组合电路法	(154)
3·5·3 负反馈法	(162)
本章小结、复习思考题、习题	(162)

第四章 负反馈放大器

§ 4·1 反馈放大电路的基本概念	(168)
4·1·1 什么是反馈?	(168)
4·1·2 反馈放大器的分类	(169)
§ 4·2 负反馈放大器的方块图及放大倍数的一般表达式	(173)
4·2·1 负反馈放大器的方块图	(173)
4·2·2 负反馈放大器放大倍数的一般表达式	(174)
§ 4·3 负反馈放大器放大倍数的近似计算	(176)
4·3·1 电压串联负反馈	(176)
4·3·2 电流串联负反馈	(179)
4·3·3 电压并联负反馈	(181)
4·3·4 电流并联负反馈	(182)
§ 4·4 负反馈对放大器输入电阻和输出电阻的影响	(185)

4.4.1	负反馈对输入电阻的影响	(185)
4.4.2	负反馈对输出电阻的影响	(187)
§4.5	负反馈对放大器其它性能的影响	(190)
4.5.1	负反馈稳定放大器的放大倍数	(190)
4.5.2	负反馈展宽放大器的通频带	(191)
4.5.3	负反馈减小了放大器非线性失真和内部噪声的影响	(196)
§4.6	负反馈放大器的分析方法	(197)
4.6.1	划分反馈放大器的原理和方法	(198)
4.6.2	分析计算举例	(202)
§4.7	负反馈放大器的自激及消除	(209)
4.7.1	产生自激振荡的原因及条件	(210)
4.7.2	反馈放大器的稳定判据	(211)
4.7.3	消除反馈放大器自激的方法	(212)
§4.8	负反馈放大器实例	(218)
本章小结、复习思考题、习题		(221)

第五章 功率放大器

§5.1	功率放大器的特点	(228)
5.1.1	功率放大器在整机中的地位和作用	(228)
5.1.2	功率放大器与电压放大器的区别	(229)
5.1.3	放大器工作状态的分类	(229)
5.1.4	乙类和甲乙类功率放大器的效率	(230)
§5.2	双电源互补对称电路	(230)
5.2.1	电路组成	(230)
5.2.2	分析计算	(230)
5.2.3	工作在甲乙类的互补对称电路	(234)
5.2.4	复合互补对称电路	(235)
§5.3	单电源互补对称电路	(236)
5.3.1	电路组成	(236)
5.3.2	分析计算	(237)
5.3.3	实用互补对称电路	(238)
5.3.4	互补对称功率放大器的设计举例	(240)
§5.4	变压器耦合功率放大器	(243)
5.4.1	变压器耦合单边功率放大器	(243)
5.4.2	变压器耦合推挽功率放大器	(246)
本章小结、复习思考题、习题		(252)

第六章 集成运算放大器

§6.1	概 述	(257)
6.1.1	集成运算放大器的基本概念和发展概况	(257)

6·1·2	集成运算放大器应用举例	(259)
6·1·3	理想运算放大器的条件	(261)
6·1·4	集成电路内元器件的特点	(261)
§6·2	运算放大器的级间耦合方式与零点漂移	(262)
6·2·1	级间耦合方式	(262)
6·2·2	零点漂移	(264)
6·2·3	计算举例	(266)
§6·3	差动式放大电路	(268)
6·3·1	差动放大电路的工作原理	(268)
6·3·2	典型差动放大电路分析	(269)
6·3·3	其他形式的差动放大电路	(273)
6·3·4	具有恒流源的差动放大电路	(277)
6·3·5	计算举例	(278)
§6·4	线性集成电路的基本电路	(281)
6·4·1	恒流源电路	(281)
6·4·2	恒压电路	(286)
§6·5	典型线性集成电路介绍	(287)
6·5·1	BG301 线性集成电路	(287)
6·5·2	5G24 线性集成电路	(293)
§6·6	集成运算放大器的线性应用	(298)
6·6·1	反相比例运算放大器	(298)
6·6·2	积分运算放大器——积分器	(299)
6·6·3	微分运算放大器——微分器	(300)
6·6·4	对数运算放大器	(300)
6·6·5	电压跟随器	(301)
6·6·6	减法运算放大器——减法器	(303)
6·6·7	线性整流器	(303)
6·6·8	有源滤波器	(304)
§6·7	集成运算放大器的非线性应用	(311)
6·7·1	比较器	(311)
6·7·2	方波产生器	(312)
6·7·3	三角波产生器	(315)
6·7·4	锯齿波产生器	(316)
§6·8	运算放大器的主要参数及其测量方法	(317)
6·8·1	参数的简易测量法	(318)
6·8·2	采用辅助放大器的测试方法	(322)
§6·9	集成运算放大器使用时应注意的一些实际问题	(325)
6·9·1	集成运算放大器的粗测	(325)
6·9·2	零点调整	(325)
6·9·3	保护措施	(327)
6·9·4	自激振荡的消除	(329)

本章小结、复习思考题、习题	(334)
附录6-1 几种常用的集成运放简介	(339)

第七章 直流稳压电源

§7·1 单相桥式整流电路	(343)
7·1·1 工作原理	(343)
7·1·2 负载电阻 R_L 上的直流电压 V_L 和直流电流 I_L 的计算	(344)
7·1·3 整流元件参数的计算	(344)
7·1·4 变压器容量的计算	(344)
§7·2 滤波电路	(345)
7·2·1 电容滤波电路	(346)
7·2·2 其它滤波电路	(348)
§7·3 并联型稳压电路	(350)
7·3·1 硅稳压管的特性及其主要参数	(350)
7·3·2 硅稳压管稳压电路分析	(352)
7·3·3 硅稳压管稳压电路设计举例	(354)
§7·4 串联型晶体管稳压电路	(355)
7·4·1 串联型稳压电路的基本原理	(355)
7·4·2 典型的串联型稳压电路	(356)
7·4·3 串联型稳压电路各环节的分析	(357)
7·4·4 典型串联型稳压电路计算举例	(360)
7·4·5 提高串联型稳压电路性能的措施	(361)
7·4·6 串联型稳压电路的保护措施	(364)
§7·5 集成化稳压电源	(366)
7·5·1 集成稳压电源5G14介绍	(366)
7·5·2 高精度稳压电源	(372)
7·5·3 高精度参考电压源	(373)
本章小结、复习思考题、习题	(374)
参 考 文 献	(379)

第一章 半导体二极管和三极管

内 容 提 要

在种类繁多的半导体器件中，最基本、最常用的是半导体二极管和三极管，本章主要介绍它们的工作原理、特性和参数，以便在实际中能合理地选择和正确地使用。由于这两种半导体器件的基本结构都是PN结，因此，掌握其工作原理，实际上也是为今后学习其它类型的半导体器件（核心部分也是PN结）打下基础。

§ 1.1 半导体的导电特性

顾名思义，半导体器件是由半导体材料制成的。因此，在研究半导体器件之前，有必要了解半导体的一些物理性质。

1.1.1 本征半导体的导电特性

物质按其原子结构可分为晶体和非晶体两大类。从它们的导电性能来看，可分为导体、绝缘体和半导体，如图1-1-1所示。其中 σ 表示物质的导电率。

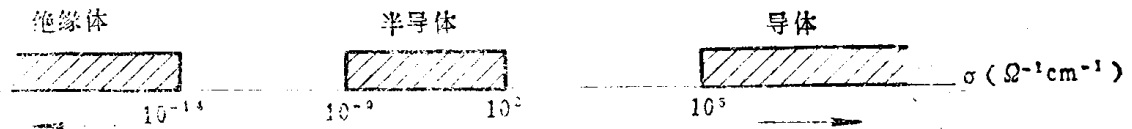


图1-1-1 物质的分类

众所周知，金属是良好的导体，陶瓷、橡胶等属于绝缘体，而常用的半导体有锗（Ge）和硅（Si）等。应当指出，半导体所以得到广泛的应用，并不是因为它的导电能力介于导体与绝缘体之间，而主要是由于它具有下列的一些特殊性能。

（1） 在外界光和热的激发下，半导体的特性会发生显著的变化，利用这种效应可制成光敏元件和热敏元件。

（2） 在纯半导体中掺入微量的杂质，可改变和控制半导体的导电率，这是半导体最突出的性质，也是我们能够用半导体材料制造各种半导体器件的基本依据。

不含杂质的半导体称为本征半导体，理想的硅、锗单晶都属于本征半导体，它们具有同样的晶体结构，下面我们以硅为例来说明半导体的特性。

硅（Si）原子有14个电子，它的原子结构如图1-1-2（a）所示。最外层的电子因受原子核的束缚力较弱，在外界影响下可参与导电，称为价电子。价电子决定了元素的化学性质与导电性质，因此价电子是我们研究的对象。硅有四个价电子，故称为四价元素。而内层电子受原子核的吸引力较大，又受到外层电子的“屏蔽”作用因此不能参与导电，它们与原子核一起组成惯性核。为了讨论的方便，硅原子可用图1-1-2（b）的简化模型表示。

在一般情况下，电子按一定规律在各自的轨道上不停地绕核运动。

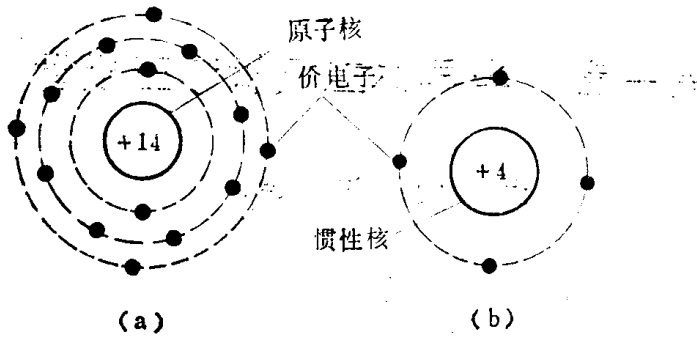


图1-1-2 硅原子结构模型
(a) 硅原子模型 (b) 简化模型

硅原子组成晶体后，原子之间靠得很近，每个原子的价电子不仅受自身原子核的束缚，还受相邻原子的影响，产生了运动轨道的交叠。这样，原来分属于每个原子的价电子可以转移到相邻的价电子轨道上，而为整个晶体所共有，这一特征，称为电子的共有化运动。共有化运动使晶体中的原子紧紧地连结成一个整体，这种情况可以形象地用共价键来表示。

图1-1-3绘出了硅单晶共价键结构的平面示意图。

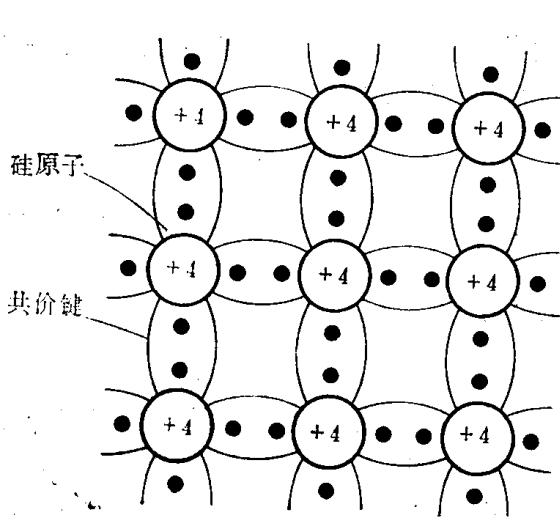


图1-1-3 硅单晶的共价键结构

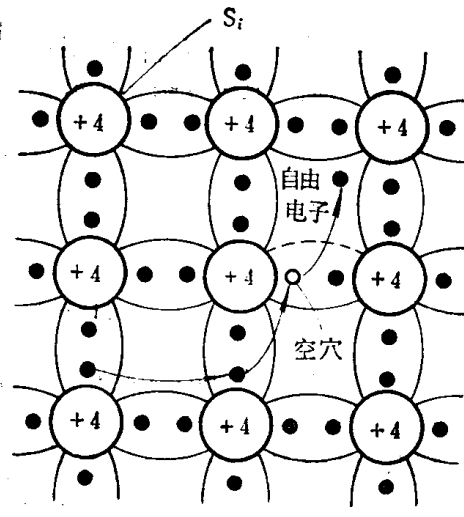


图1-1-4 本征激发

共价键结构的特点是它们的外层价电子所受的束缚力不象绝缘体里的那样紧，在一定温度下，由于热运动，其中少数电子可能挣脱束缚而成为自由电子，理论证明，在室温(300K)时，硅晶体中的价电子必须获得大于禁带宽度^[1] $E_G = 1.1 \text{ eV}$ (对于锗, $E_G = 0.72 \text{ eV}$) 的能量，才能摆脱共价键的束缚。在价电子变为自由电子的同时，原来共价键处留下一个空位，称为空穴。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。在本征半导体中，价电子由束缚电子变为自由电子的过程，称为“本征激发”，如图1-1-4所示。当空穴出现以后，

[1] 禁带宽度是指“导带”和“价带”之间的能量区域。实际上它表示为价电子由束缚电子变为自由电子(即从价带进入导带)必须获得的最起码能量。请参阅《低频电子线路》上册, P 4~6, 北方交通大学电信系编, 人民铁道出版社, 1978年,

附近的价电子很容易跳过来填充这个空穴，在原来自己所处的共价键处，又留下了新的空穴，这样依次填充下去，便形成了空穴的移动（见图 1-1-4）。由此可见，价电子依次填充空穴的运动与带正电荷的粒子作反向运动的效果相同。因此我们可以把空穴看作带正电的粒子，它所带的电量与电子所带的电量正好相等，但符号相反，在外电场的作用下，它可以自由地在晶体中定向运动，而形成空穴电流。

综上所述，我们可以总结以下三点：

(1) 本征半导体中的价电子被激发成为自由电子后，与此同时出现了空穴。这两种粒子都能在电场作用下产生定向运动而形成电流，因此半导体中有自由电子和空穴两种导电粒子。由于自由电子和空穴能载运电流，故常称为载流子。载流子数目的多少是衡量半导体导电能力的标志。

(2) 空穴是半导体所特有的一种粒子，它是人们根据共价键中出现空位的特性而虚拟出来的。空穴的运动，实际上是束缚电子由一处位置填补到另一处空穴位置的移动形成的，也就是说，空穴的移动始终是束缚电子在共价键内的移动，它和已挣脱共价键束缚的自由电子是完全不同的。

(3) 在本征激发中，受激产生一个自由电子，必然随着产生一个空穴，自由电子和空穴总是成对出现的，这是本征半导体的一个重要特征。

设单位体积的自由电子数（称电子浓度）为 n ，单位体积的空穴数（称空穴浓度）为 p ，则有

$$n_i = p_i \quad (1-1-1)$$

下标 i ——本征半导体

在本征半导体中，一方面会由于本征激发不断产生电子空穴对；另一方面自由电子在运动中会遇到空穴，空穴中缺少的负电荷可能被自由电子所填入，从而恢复一个共价键，消失一电子空穴时。前一过程称为“产生”，后一过程称为“复合”。在一定的温度下，载流电子的产生与复合机会相等，达到动态平衡，这时的载流子浓度维持一定的数值，称为热平衡值。

根据理论分析和实验证明，热平衡时载流子浓度 n_i （或 p_i ）由下式决定：

$$n_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_{G0}}{2kT}} \quad (1-1-2)$$

式中： A_0 ——与半导体的材料有关的常数；

E_{G0} ——0 K时的禁带宽度；

T ——绝对温度（以K表示）；

k ——玻尔兹曼常数（ $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ V/K}$ ）；

硅： $A_0 = 3.87 \times 10^{16}$ ， $E_{G0} = 1.21 \text{ V}$

锗： $A_0 = 1.76 \times 10^{16}$ ， $E_{G0} = 0.785 \text{ eV}$

在室温（300K）时，由（1-1-2）式可算得： $n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ 。由（1-1-2）式还可看出，在半导体材料确定后， n_i 只与温度有关，随着温度的升高，载流子浓度近似地按指数规律迅速增大。在使用温度范围内（常温附近），温度每升高 8°C ，硅的 n_i 增加一倍，温度每升高 12°C 锗的 n_i 增加一倍。由此可见，温度是影响半导体性能的一个重要因素。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中的载流子浓度，和单位体积中原子的数量相比，是非常微小的，例如硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ，原子密度为 $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ ，即 10^{12} 个硅原子中才有一个原子产生一个自由电子，而在各种导体中，自由电子的浓度高达 $10^{22} \sim 10^{23} / \text{cm}^3$ 。可见，本征半导体的导电能力是很差的，而且参与导电的自由电子和空穴的浓度总是相同的，难以实现人们需要的放大、控制作用。所以本征半导体本身并不能直接为人们所利用，但是当在半导体中掺入少量的“杂质”，就可使其导电特性得到很大改善。例如在本征硅中掺入百万之一的磷杂质，它的导电率将由 $5 \times 10^{-8} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 提高到 $2.5 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ，即提高了五十万倍。掺杂后的半导体，称为杂质半导体。按所掺入的杂质不同性质，可分为N型半导体和P型半导体两类。

一、N型半导体

在本征硅中掺入少量的五价元素，例如磷，（即所谓杂质），将会产生大量的自由电子。

由于杂质原子数比硅原子数少得多，因此整个晶体结构不变，只在某些位置上硅原子被磷原子取代。磷原子外层有五个价电子，其中四个与硅原子组成共价键，多出的一个价电子仅受磷原子的吸引，不受共价键的束缚，它只要获得大于磷原子的电离能 ($E_{iD} = 0.044 \text{eV}$)，就能摆脱束缚而成为自由电子，如图1-1-5所示。因此，在掺磷的硅晶体中，自由电子的数量大为增加。这种半导体主要靠自由电子导电，称为电子型半导体，简称N型（Negative）半导体。

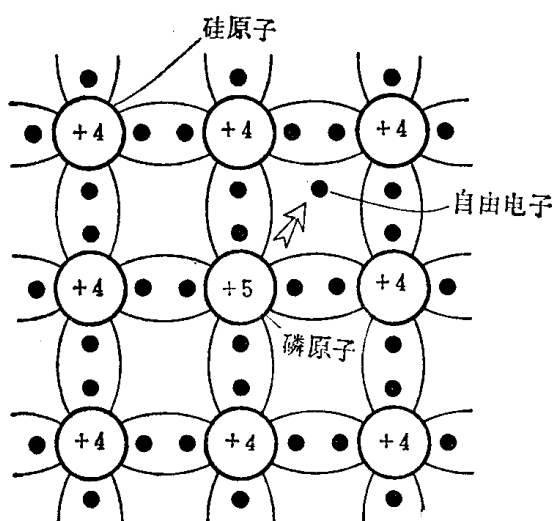


图1-1-5 硅中掺磷形成N型半导体

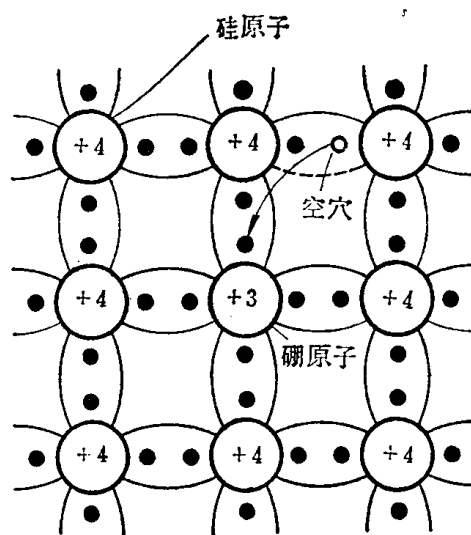


图1-1-6 硅中掺硼形成P型半导体

由于磷原子在硅晶体中能给出多余的电子，故称为施主杂质。磷原子在失去电子后成为不能移动的正离子，但在产生自由电子的同时，磷原子并不产生空穴，这是与本征激发不同的。

在N型半导体中虽然同样也有由本征激发产生的电子空穴对，但数量很少，而施主杂质

提供的多余电子在室温下几乎全部激发为自由电子。同时，由于出现了大量自由电子，增加了与空穴复合的机会，因此，在 N 型半导体中自由电子数远大于空穴数，故称自由电子为多数载流子（简称多子），而空穴为少数载流子（简称少子）。

二、 P 型半导体

在本征硅中掺入少量的三价元素，例如硼，将会产生大量的空穴。硼原子与硅原子组成的共价键结构如图1-1-6所示。由于硼只有三个价电子，当它与相邻的四个硅原子组成共价键时，必然缺少一个价电子，形成一个空位，相邻硅原子的价电子很容易来填充这个空位，从而产生一个空穴。由于硼原子的电离能（ $E_{iA}=0.045\text{eV}$ ）很小，所以在室温下，几乎全部硼原子的空位都被填充，产生与硼原子数量相等的空穴。

硅晶体掺硼后产生大量的空穴，这种杂质半导体主要靠空穴导电，故称空穴型半导体，简称 P 型（Positive）半导体。

硼原子能接受一个电子，故称受主杂质。硼原子在接受电子后，成为不能移动的负离子，同时在硅晶体中产生了空穴。但产生空穴的同时，并不伴随着产生自由电子，只是由于本征激发产生为数甚少的电子空穴对，使得在 P 型半导体中也有自由电子。由于空穴的数量远大于自由电子数，因此，在 P 型半导体中空穴为多数载流子，而自由电子为少数载流子。

应该指出的是，在杂质半导体中虽然有多子与少子之分，但是单位体积的正负电荷量是相等的，因此，整个半导体仍然呈电中性。

在半导体器件的生产实践中，经常给半导体既掺入施主杂质又掺入受主杂质。例如在施主杂质浓度较低的 N 型半导体中，掺入浓度更高的受主杂质，则空穴占多数， N 型半导体转化为 P 型半导体，如果再次掺入浓度更高的施主杂质，则自由电子再占多数， P 型又转为 N 型，这叫杂质的补偿作用。制造平面晶体管和集成电路所广泛采用的多次扩散（多次掺入不同杂质）的工艺，就是利用了杂质的补偿原理。

§ 1·2 半导体二极管(PN 结)及其特性

1·2·1 PN 结

一、 PN 结的形成

PN 结是利用半导体工艺（如掺杂）使晶体内部实现 P 型和 N 型两种半导体的“接触”而形成的。

在“接触”以前， P 型和 N 型半导体呈现电中性。在不计本征激发时，导电的载流子必然与带电的离子成对地出现。

“接触”以后，“接触”交界面两边的载流子明显地存在着浓度差异， P 区的多子——空穴，必然向空穴浓度很少的 N 区扩散；同样， N 区的多子——电子，也必然向电子浓度很小的 P 区扩散，如图1-2-1(a)所示。扩散到对方的载流子成为少子，最终被对方的多子所复合。“接触”交界面两边的载流子向对方扩散后，在交界面两侧很窄的区域内，将留下不能移动的正负离子（通常称为空间电荷）， P 区一侧留下受主负离子， N 区一侧留下施主正离子，形成了空间电荷区，这就是我们所说的 PN 结。

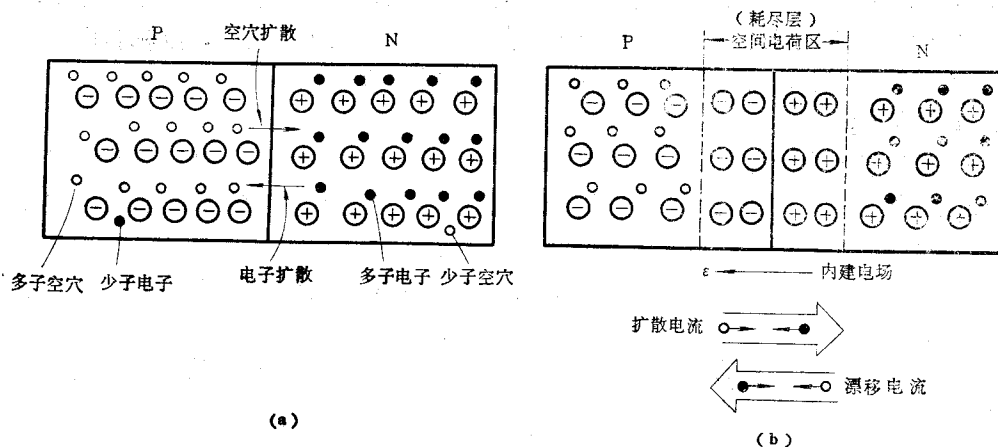


图1-2-1 PN结的形成

(a) 载流子的扩散;

(b) 平衡状态下的PN结

由于出现空间电荷，就会相应地形成电场，其方向是由N区（正离子）指向P区（负离子）。这个电场是由界面附近载流子的扩散与复合产生的，不是外加的，因此称其为内建电场。显而易见，内建电场的方向与两区域的多子扩散运动方向相反，因而阻碍了扩散的继续进行。然而，内建电场的出现却是有助于两区域的少子向相反的方向运动（电子逆电场方向运动，空穴顺电场方向运动），我们把载流子的这种运动称为漂移运动。

可见，由于P型和N型两种半导体的“接触”，在交界处便发生两种对立的运动趋向：一方面是多子靠浓度差产生扩散运动并形成空间电荷区；另一方面是少子在内建电场作用下作漂移运动。随着扩散的不断进行，在交界处显露出的正负离子逐渐增多，空间电荷区不断展宽，内建电场越来越强，到最后，扩散运动与漂移运动相互抵消，PN结处于动态平衡状态。这时内建电场达到一定的值，交界面两边的电荷量不再变化。由此也可看出，不加外电场时PN结是没有电流通过的。这是因为在P区空穴向N区扩散，产生空穴扩散电流的同时，必有一个数量相同的空穴漂移电流由N区流向P区，两者数值相等，方向相反，由空穴产生的净电流等于零。同理，电子的扩散电流也必然被电子的漂移电流所抵消〔见图1-2-1(b)〕。

空间电荷区又称为耗尽层，因为在这个区域内，多子已扩散到对方并很快被复合掉，或者说消耗尽了，只有极少量由本征激发产生的电子空穴对，因而电阻率很高。

内建电场在PN结中产生的电位差，称接触电位 V_{ϕ} （见图1-2-2），它主要决定于半导体的材料和掺杂浓度，硅的 $V_{\phi}=0.7V$ 左右，锗的 $V_{\phi}=0.2V$ 左右。N区的电位比P区高，对于P区的空穴向N区扩散（或N区的电子向P区扩散）起阻挡作用，好象壁垒一样，所以，常把该电位差称作“电位壁垒”，简称“位垒”。

空间电荷区又称阻挡层（阻挡载流子的扩散）。阻挡层以外的区域，是电中性区，没有电位差。

在半导体器件中，实际所用的PN结，其P区和N区所掺的杂质往往相差很悬殊。例如，使P区的受主杂质浓度 N_A 远大于N区的施主杂质浓度 N_D ，由此形成的PN结称为 P^+N