

全国中等农业学校教材

电 子 电 路

山西省农业机械化学校主编

农村电气化专业用

农 业 出 版 社

dB 分贝

°K 绝对温度 (开尔文)

°C 摄氏温度

m 毫 (10^{-3})

μ 微 (10^{-6})

n 纳 (10^{-9})

p 皮 (10^{-12})

k 千 (10^3)

M 兆 (10^6)

前 言

本教材系农牧渔业部教育司和全国农机校农村电气化专业教学研究会，按照农牧渔业部1987年制定的全国中等农业机械化学校、农村电气化专业《电子电路》教学大纲要求组织编写的，供招收初中毕业生四年制农村电气化专业学生使用。

在编写过程中，注意到突出中专培养应用性人材的特点，努力达到培养目标与思想性、科学性、启发性、适用性和先进性的统一。力求讲清物理概念，阐明分析问题的思路和方法。以定性分析为主，定量分析为辅。有些公式可作严格的数学推导，指明出处直接引用。

在叙述上，尽量做到重点突出、层次分明、语言通俗易懂、由浅入深、图文并茂。在讲解和举例时，尽可能联系实际和引用实际资料、数据以帮助学生建立必要的数量概念。

教材中有关各章的测试技能部分，是培养应用型人材的必学的基本知识。为了压缩课堂教学内容，该部分均用小字排印，可在实验课中结合实验进行讲解。

考虑到目前专业设备和仪器中还有一定数量的电子管电路，本教材编入一章电子管内容，并适当地增加了一些参考性内容，在章节标题等处均以“*”注明。

由于各校具体条件不同，教学过程中，教师可采取各种教学手段，在保证达到教学大纲要求的前提下，对本教材的内容、顺序等可作适当取舍和调整。

为便于师生参考，书中内容有需要说明之处，均于该页作了下注。

本教材由王梦林主编、潘光碧副主编。参加编写的同志有：广西壮族自治区农业机械化学校高级讲师李道绳（第1、2、3章）；湖南省农业机械化学校高级讲师潘光碧（第4、5、6、11章）；陕西省农业机械化学校高级讲师张镇函（第7、8、9、10章）；广西壮族自治区农业机械化学校讲师吴才鹏（第12、13、14、15章）；山西省农业机械化学校高级讲师王梦林（第16、17、18、19章）。本书最后由王梦林定稿。

本教材由太原工业大学陈衍翊教授主审，参加审定的还有山西省广播电视学校高级工程师王明亮、赵振宇同志和山西省电子工业学校高级讲师张炳魁同志。他们对初稿进行了认真的审阅，并提出许多宝贵意见，对上述同志和给予本教材热忱帮助的其他同志，在此一并致以深切的谢意。

由于编写者水平和教学经验有限，加上编写时间紧迫，书中错漏之处在所难免。恳切希望使用本教材的单位、兄弟学校的师生和其他读者给予批评指正。

编 者

1988年8月

本书常用符号表

一、关于符号表示的说明

1. 本书尽量采用标准的（如 SJ1400—78）和国际通用的符号。

2. 主要符号

凡直流量，变化量的最大值、平均值及有效值，电路的静态参数，均用大写字母表示。例如：U 表示直流电压；R 表示静态电阻。

凡变化量的瞬时值和电路的动态参数，均用小写字母表示。例如：u 表示变化电压的瞬时值；r 表示动态电阻。

3. 辅助符号

（1）下标符号可用大写或小写来表示，大写用来表示：（a）无信号直流值，例如 I_B ；（b）总的最大值，例如 I_{CM} ；（c）总的瞬时值，例如 i_B 。

小写下标用来表示交流分量值或元、器件电极符号：（a）交流量的瞬时值，例如 i_b ；（b）交流量的最大值，例如 I_{bm} ；（c）交流量的有效值，例如 I_b ；（d）基极偏流电阻，例如 R_b 。

（2）侧记号。 Δ 变化量、增量，例如 ΔI 为电流 J 的变化量。

（3）右上角记号。等效，例如 R_L' 为等效负载电阻；净输入量，例如 I_1' 为净输入电流。

（4）简化记号。// 并联，例如 $R_1//R_2$ 为 R_1 与 R_2 并联。

二、基本符号

A 放大倍数的通用符号

a 整流元件的阳极（正极）

A_f 反馈放大电路放大倍数的通用符号

A_u 电压放大倍数的通用符号，放大电路的开环电压放大倍数

A_{uf} 放大电路的闭环电压放大倍数

A_c 共模信号的放大倍数

A_d 差模信号的放大倍数

b 晶体三极管的基极

C 电容、晶体三极管集电极电路有关量下标

C_b 基极隔直（耦合）电容

C_e 发射极旁路电容

C_{be} 基极—集电极电容，集电结电容

- $C_{b'e}$ 基极—发射极电容, 发射结电容
- C_j 结电容
- C_B 势垒电容
- $C_{B'e}$ 发射结势垒电容
- C_D 扩散电容
- $C_{D'e}$ 发射结扩散电容
- C_F 分布电容
- C_i 输入电容
- C_o 输出电容
- C_{ob} 共基输出电容
- C_M 密勒电容, 双回路耦合电容
 - c 晶体三极管的集电极
 - D 二极管、场效应管的漏极
 - d 差模
- E 晶体三极管发射极电路的有关下标
 - e 晶体三极管的发射极
- F 反馈系数, 正向
- F_u 电压反馈系数
 - f 频率, 反馈有关量的下标
- f_L 放大电路的下限频率
- f_H 放大电路的上限频率
- f_β 共射截止频率
- f_α 共基截止频率
- f_T 共射特征频率
- f_m 最高振荡频率
- f_o 载波频率
- f_o 射极电路 R_o 、 C_o 的截止频率
- Δf 失谐量
- G 直流电源电压, 正弦电源电动势的有效值
- G_B 基极电源电压
- G_C 集电极电源电压
- G_D 漏极电源电压
- G_G 栅极电源电压
 - g 电导, 场效应管和电子管的栅极
 - g_m 互导 (跨导)
 - $g_{b'e}$ $r_{b'e}$ 的电导

g_e 发射结的电导
 $g_{b'e}$ 集电结的电导
 $g(t)$ 时变跨导
 g_e 变频跨导
GB 增益带宽积
H h 双口网络的混合参数, 上限 (高频区)
I 直流电流, 交流电流有效值
 I_s 信号源电流
 I_i 输入电流
 I_o 输出电流
 $\dot{I}$ 正弦电流复数量 (相量)
 I_m 正弦电流峰值 (最大值)
 I_{cm} 集电极电流交流分量最大值
 I_{CM} 集电极电流总的最大值
 I_z 稳压管的稳定电流
 I_{CQ} 静态工作电流
 I_{max} 电流最大值
 I_{min} 电流最小值
 I_F 正向电流
 I_R 反向电流
J j 结, 虚数符号
K 绝对温度符号, 电压传输系数
K 开关符号
k 整流元件的阴极 (负极), 电子管的阴极, 耦合系数
 k_{01} 矩形系数
L 负载, 电感
M 互感系数
 m_a 调幅系数
 m_f 调频系数
N 电子型半导体, 匝数比
n 匝数比
 N_F 噪声系数
P 空穴型半导体
P 功率
 P_o 载波功率
 P_L 下边频功率

P_H 上边频功率
 p 瞬时功率
 Q q 电荷, 品质因数, 静态工作点
 Q_L 电感线圈品质因数, 有载品质因数
 Q_C 电容器的品质因数
 Q_0 空载品质因数
 R 电阻, 反向
 R_s 信号源内阻
 R_0 谐振电阻
 R_M 密勒电阻
 r 交流电阻或动态电阻
 r_{be} 晶体三极管的输入电阻
 r_{ce} 晶体三极管的输出电阻
 r_i 电路的输入电阻
 r_o 电路的输出电阻
 S 信号源有关量的下标, 脉动系数, 稳定系数
 s 场效应管的源极、电子管
 T 温度
 t 时间
 T_a 环境温度
 U 直流电压, 交流电压有效值
 U_s 信号源电压
 U_i 输入电压
 U_o 输出电压
 U_o 不带负载 R_L 的输出电压
 U_{opp} 输出峰-峰电压
 $\dot{U}$ 正弦电压复数量 (相量)
 U_{cm} 集电极电压交流分量最大值
 U_{max} 电压最大值
 U_{min} 电压最小值
 U_Z 稳压管稳定电压
 U_{CQ} 静态工作点电压
 u_B 基极电压总瞬时值
 u_b 基极电压交流分量瞬时值
 V 电压单位 (伏), 晶体管
 W 匝数、能量、电位器

X x 电抗, 反馈电路中的信号量

Y y 导纳

Z z 阻抗, 稳压管有关下标

γ 稳压系数, 电导率, 非线性失真系数, 结电容变化系数

η 效率, 耦合系数

θ 角度, 二极管检波电流脉冲通角

μ_r 晶体三极管的内部电压反馈系数

φ 相位差

Ω 调制信号角频率

ω 角频率

ω_0 固有角频率

ω_β 共射截止角频率

ω_T 共射特征角频率

ω_C 载波角频率

ξ 一般失谐

CMRR 共模抑制比

AM 普通调幅制

FM 普通调频制

DSB 抑制载波双边带调制

SSB 单边带调制

VSB 残留单边带调制

AGC 自动增益控制

三、常用器件参数符号

α 共基极交流电流放大系数

$\bar{\alpha}$ 共基极直流电流放大系数

β 共射极交流电流放大系数

$\bar{\beta}$ 共射极直流电流放大系数

η_i 共射极输出端短路小信号输入电阻

η_r 共射极输入端开路小信号反向传输系数

η_o 共射极输入端开路小信号输出导纳

BU_{CEO} 基极开路, c-e 间反向击穿电压

BU_{CBO} 发射极开路, c-d 间击穿电压

BU_{EBO} 集电极开路, e-b 间击穿电压

BU_{CER} b-e间接电阻时, c-e 间击穿电压

BU_{CES} b-e间短接时, c-e 间击穿电压

I_{CBO} 发射极开路, c-b 反向截止电流

I_{CEO} 基极开路; c-e 反向截止 (穿透) 电流
 I_{CM} 集电极最大允许电流
 I_S 二极管反向饱和电流
 I_F 二极管额定整流电流 (正向电流)
 U_{BR} 二极管反向击穿电压
 U_R 二极管反向电压
 U_{RM} 二极管最高反向峰值电压 (允许值)
 P_T 晶体三极管集电极耗散功率
 P_{CM} 集电极最大允许耗散功率 (额定功耗)
 I_{IB} 集成运放输入偏置电流
 I_{IO} 集成运放输入失调电流
 U_{IO} 集成运放输入失调电压
 U_{icm} 最大共模输入电压
 U_{idm} 最大差模输入电压
 S_R 转换速率
 U_P 场效应管夹断电压
 U_T 场效应管开启电压
 BU_{DS} 场效应管漏源极间击穿电压
 I_{DSS} 场效应管漏极饱和电流
 I_{DSM} 最大漏源电流
 g_m 跨导 (互导)
 $r_{bb'}$ 晶体管基区体电阻 (基区扩散电阻)
 r_e 晶体管发射结电阻和发射区体电阻之和
 r_z 稳压管的动态电阻
 f_β 晶体管共射极交流电流放大系数的截止频率
 f_α 晶体管共基极交流电流放大系数的截止频率
 f_T 晶体三极管的特征频率

四、单位和量级

A 安培
 V 伏特
 W 瓦特
 Ω 欧姆
 H 亨利
 F 法拉
 Hz 赫兹
 S 西门子 (A/V), 秒

目 录

第一篇 低频电子电路

第一章 晶体二极管及其整流电路.....	1
第一节 半导体基础知识	1
第二节 晶体二极管	7
第三节 单相整流电路	14
第四节 滤波电路	20
第五节 倍压整流电路	27
第二章 晶体三极管放大电路基础.....	33
第一节 晶体三极管	34
第二节 基本放大电路	46
第三节 基本放大电路的图解分析法	52
第四节 放大电路的微变等效电路分析法	60
第五节 静态工作点的稳定及偏置电路	73
第六节 其它放大电路	79
第三章 多级放大电路.....	96
第一节 概述	96
第二节 阻容耦合多级放大电路的分析与计算	99
第三节 放大电路的频率特性	103
第四章 负反馈放大电路	116
第一节 反馈的基本概念	116
第二节 负反馈放大电路的方框图及放大倍数的一般表达式	117
第三节 四种负反馈类型的分析	119
第四节 负反馈对放大电路性能的影响	128
第五节 放大电路的自激振荡及消除	135
第六节 负反馈放大电路实例	138
第五章 功率放大电路.....	143
第一节 功率放大电路的一般问题	143
第二节 变压器耦合的单管功率放大电路	146
第三节 变压器耦合推挽功率放大电路	150
第四节 无变压器耦合的功率放大电路	157
第五节 功率管的损耗与保护	165
第六章 正弦波振荡电路	170
第一节 振荡电路的工作原理	170
第二节 LC基本振荡电路	174
第三节 振荡频率的稳定	184

*第四节	石英晶体振荡器	186
*第五节	RC振荡电路	190
第六节	自激振荡电路的调整与测试	195
第七章	直流放大电路	200
第一节	概述	200
第二节	直流放大电路的特殊问题	201
第三节	差动放大电路	204
第四节	改进型差动放大电路	206
第五节	差动放大电路的输入、输出接线方式	213
第六节	直流放大电路应用举例	217
第八章	集成运算放大电路	221
第一节	概述	221
第二节	典型集成电路介绍	223
第三节	集成运算放大器的基本接法及其闭环特性	227
第四节	集成运算放大器的典型应用电路	232
第五节	线性集成组件的使用	23 ⁶
第九章	直流稳压电源	244
第一节	概述	244
第二节	硅稳压管稳压电路	244
第三节	串联型稳压电路	246
第四节	带有放大环节的串联型稳压电路	248
第五节	提高稳压电源性能的主要措施	251
第六节	稳压电源的过流保护措施	254
第七节	稳压电源的主要技术指标及测试方法	255
第八节	稳压电源实例	257
*第九节	串联型稳压电路设计举例	263
第十章	场效应管放大电路	270
第一节	结型场效应管	271
第二节	绝缘栅场效应管	274
第三节	场效应管的主要参数及使用注意事项	279
第四节	场效应管放大电路	282
*第十一章	电子管及其电路简介	293
第一节	电子管整流电路	293
第二节	电子管放大电路	297

第二篇 高频电子电路

第十二章	电路元器件的高频特性	313
第一节	电阻器、电感线圈、电容器的高频特性	313
第二节	三极管的高频特性	317
第三节	共射Y参数等效电路	331
第十三章	宽频带放大电路	337
第一节	概述	337

第二节	共射RC耦合宽带放大电路	339
第三节	展宽频带的基本方法	355
第四节	宽带放大电路的调整与测试	361
第十四章	谐振回路	365
第一节	并、串联谐振单回路	366
第二节	双谐振耦合回路	381
第十五章	小信号调谐放大电路	393
第一节	概述	394
第二节	小信号单调谐放大电路	395
第三节	调谐放大电路的稳定性	401
第四节	应用举例	406
第五节	双调谐放大电路	409
第六节	应用举例	416
第七节	调谐放大电路的调试	418
第十六章	调幅与检波	421
第一节	非线性器件的频率变换作用	421
第二节	调幅波	425
第三节	调幅原理及其电路	430
第四节	检波电路概述	433
第五节	小信号平方律检波电路	435
第六节	大信号直线性检波电路	437
第七节	检波电路的元器件选择及其特性的测试	445
第八节	检波电路举例	446
第十七章	变频	452
第一节	概述	452
第二节	变频的工作原理	455
第三节	变频电路的调整	462
*第四节	变频电路的干扰	465
第五节	变频电路的应用举例	468
第十八章	调频与鉴频	471
第一节	调频波	471
第二节	调频原理及其电路	475
第三节	鉴频电路概述	479
第四节	斜率鉴频电路	480
第五节	相位鉴频电路	482
第六节	比例鉴频电路	487
第七节	鉴频电路的调整	492
第八节	鉴频电路应用举例	494
第十九章	识图练习	497
第一节	调幅接收机	498
第二节	调频调幅接收机	507
附录 1	阻容元件的标称值	513

附录 2	国产半导体器件型号命名法.....	514
附录 3	常用国产半导体二极管的主要参数	515
附录 4	常用国产半导体三极管的主要参数	517
附录 5	电子管的基本知识	519
附录 6	拉丁字母、希腊字母读音表.....	520

第一篇 低频电子电路

第一章 晶体二极管及其整流电路

本章首先介绍本征半导体与杂质半导体的导电特点以及 PN 结的形成与特性，然后引出目前常用的普通二极管与稳压二极管，最后介绍利用二极管组成的各种单相整流电路和滤波电路。本章着重了解 PN 结单向导电性的产生、掌握两种二极管的特性与参数、掌握单相桥式整流电路及滤波作用原理。

第一节 半导体基础知识

一、半导体的导电特性 自然界的物质中，按其导电性能可分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体的电阻率很低，约为 10^{-4} — $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ ，如金、银、铜、铝等金属材料；绝缘体的电阻率很高，约在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上，如橡胶、塑料、有机玻璃、陶瓷等；而半导体的电阻率介于两者之间，约在 10^{-3} — $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内，如硅、锗、硒、砷化镓等。

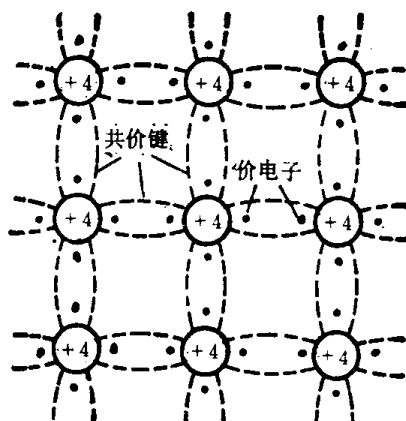
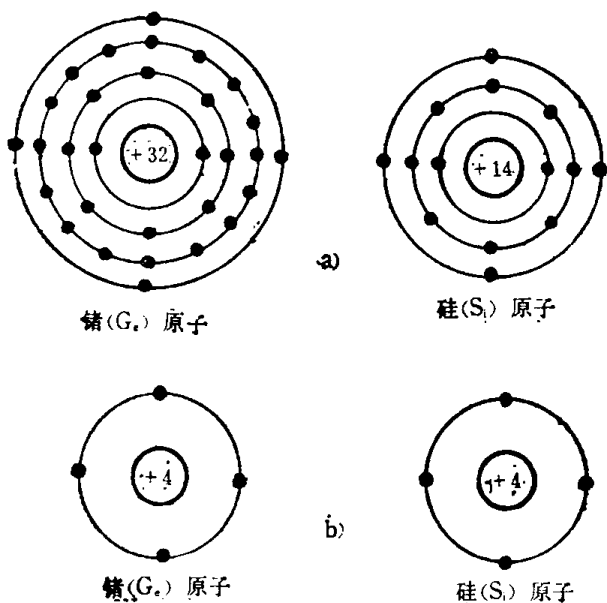
半导体的用途很广，并不是由于它的导电性能介于导体与绝缘体之间，而是由于它具有不同于其它物质的独特的导电性能：①半导体的导电性能对温度和光照的变化非常敏感。当温度增加或光照强度增加时，半导体的导电能力也显著增加。利用这种特性，可以制成各种热敏和光敏元器件，如热敏电阻、光敏电阻、光电管等。②半导体的导电性能对杂质非常敏感。在纯净的半导体中加入微量的杂质，其导电能力就会成百万倍地增加，这是半导体最独特的性质。利用不同的掺杂方法，就可以制造出各种不同性质、不同用途的半导体器件，使半导体在电子技术中得到广泛的应用。

1. 本征半导体 不含任何杂质的纯净半导体称为本征半导体。本征半导体的内部原子结构决定了它具有独特的导电性能。因此必须先了解它的原子结构。

(1) 半导体的原子结构。硅和锗是最常用的半导体，它们的原子结构如图 1—1(a) 所示，两者最外层的电子都是 4 个，所以硅和锗属 4 价元素。外层电子受原子核的束缚力最小，称为价电子。半导体的导电性能取决于价电子的运动状态，因此价电子是我们研究的对象。一般画图时，只画简化模型，如图 1—1(b) 所示。

现在所用的半导体材料都要制成晶体。就是说，这些物质的原子排列由杂乱无章的状态变成排列非常整齐的晶格点阵状态，所以半导体器件也称为晶体管器件。

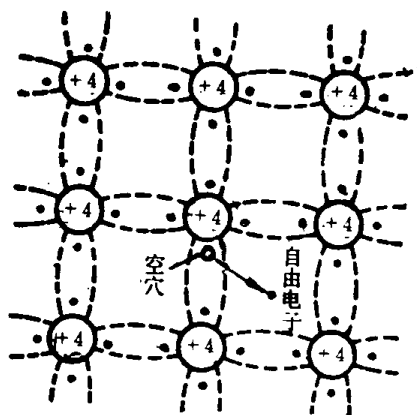
图 1—2 是硅和锗的晶体结构平面示意图。原子之间靠得很近，每个原子的 4 个价电



子不仅受本身原子核的束缚，还分别受到相邻 4 个原子的吸引，形成每相邻两个原子共有一对价电子的情况。这一对价电子中的任一电子，有时绕自身所属的原子核旋转，有时占据在另一原子所属的电子轨道上。这样每个原子的 4 个价电子就分别为相邻的 4 个原子所共有。因此，看起来每个原子的最外层轨道上有 8 个电子（其中 4 个是原子本身的，其余 4 个是相邻原子的），成为相对的稳定状态。原子的这种结构，就叫做共价键结构。

(2) 本征激发。共价键中的电子，受两个原子核引力的约束，如果没有足够的能量是不易脱离公共轨道的。因此，在绝对温度零度（ -273°C ）下，价电子因无外界能量的激发，不能脱离其公共轨道形成自由电子参予导电，故呈绝缘体特性。但在常温下（ 25°C 左右），极少量价电子获得足够的热能，挣脱了共价键的束缚而成为自由电子，在原来位置就留下了一个“空位”，称为空穴，如图 1—3 所示。这种由于热运动使本征半导体内价电子挣脱共价键的束缚变成自由电子的过程，叫做本征激发。由本征激发的自由电子带负电荷，空穴带正电荷，它们总是同时成对产生的，称为电子—空穴对。因此本征半导体中的电子与空穴数目也总是相等的。

本征激发过程中，当正离子①把邻近原子中共价键上的价电子吸引过来填补空穴时，邻近原子中就出现一个新的空穴，这个新的空穴又吸引邻近的价电子来填补，这样依次地填补空穴，形成了与价电子运动



① 失去电子的空穴实际上是不能移动的带正电荷的原子，称为正离子。同样，带有多余电子的原子，称为负离子，负离子也不能位移。

方向相反的空穴运动，称为空穴运动。如图 1—4 所示，电子由 $x_3 \rightarrow x_2 \rightarrow x_1$ ，而空穴则由 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$ 。因此，本征半导体中同时存在着电子运动和空穴运动。半导体中的自由电子和空穴都是运载电流的粒子，统称为载流子。具有两种载流子导电，是半导体区别于导体的一个重要特征。

在无外加电场作用时，所有载流子——电子和空穴都处于不规则的热运动中，不会形成电流。如果在本征半导体两端加上电源 G 时，在外电场作用下，自由电子将趋向于电源的正极，形成电子电流 I_n ，空穴则趋向于电源的负极，形成空穴电流 I_p 。结果，半导体中的总电流为这两种载流子电流之和，即 $I = I_n + I_p$ ，如图 1—5 所示。

在半导体中，一方面因热运动不断产生电子—空穴对，另一方面，自由电子又受空穴的吸引重新结合而消失。这种与热激发相反的过程，叫做“复合”。在一定温度下，本征半导体中，电子—空穴对产生与复合的数目相等，维持一定的载流子浓度，处于动平衡状态。例如，在 $t = 27^\circ\text{C}$ 时，硅的载流子浓度为 1.5×10^{10} 对/ cm^3 ，锗的载流子浓度为 2.5×10^{13} 对/ cm^3 。随着温度的增加，载流子浓度按指数规律增大，因此半导体的导电能力也显著增加。由此可见，温度是影响半导体导电性能很重要的外部因素。

2. 杂质半导体 本征半导体的载流子数量不多，导电能力差，故没有多大的实用价值。若在本征半导体中掺入微量的杂质，就会使导电性能发生显著的变化。根据掺入杂质的性质不同，杂质半导体可分为 N 型（电子型）半导体和 P 型（空穴型）半导体两大类。

(1) N 型半导体。在本征硅（或锗）中掺入少量 5 价元素磷（或砷、锑等），这些磷原子就将取代硅（或锗）原子的位置而成为杂质半导体，如图 1—6 (a) 所示。

由于磷有 5 个价电子，其中有 4 个与相邻的硅（或锗）原子组成共价键，还剩一个价电子。这个剩余的价电子不受共价键的束缚，只受磷原子核的微弱吸引，在常温下通常就能挣脱磷原子的束缚而成为自

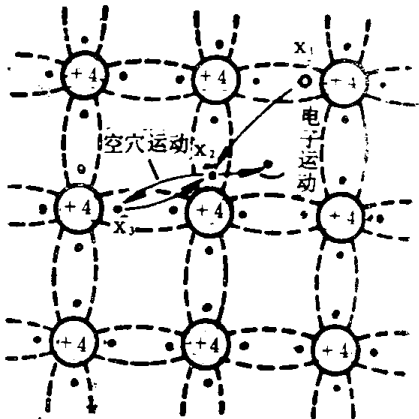


图 1—4 电子和空穴运动

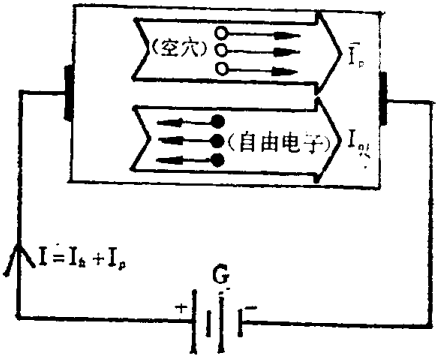
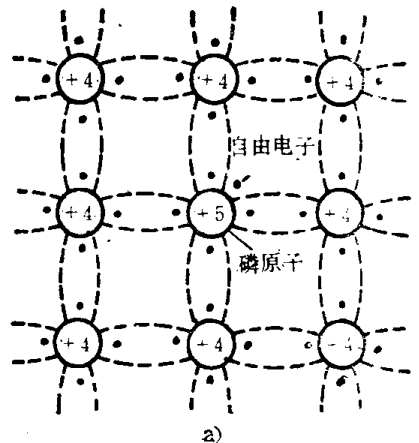


图 1—5 本征半导体导电



电子(多子)

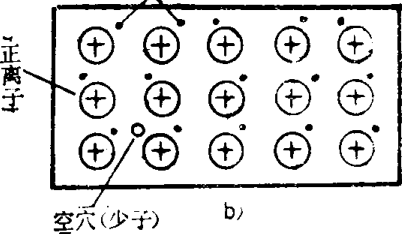


图 1—6 N 型半导体
(a) 结构图 (b) 示意图

由电子。因此在硅（或锗）中，每掺入一个 5 价元素原子（也称为 N 型杂质原子），就有一个自由电子。而失去电子的 N 型杂质原子是一个固定在晶格中的正离子，不能参予导电。这种存在大量的自由电子的半导体，主要依靠电子导电，所以称为电子型半导体，简称为 N 型半导体。例如，掺入杂质浓度为硅原子密度的一亿分之一，则电子载流子浓度为 4.96×10^{14} 个/cm³（硅原子密度为 4.96×10^{22} 个/cm³），大大高于常温下本征激发产生的电子—空穴对载流子浓度。可见，杂质半导体的导电能力远远大于本征半导体的导电能力。

由上分析，在 N 型半导体中，存在着大量的自由电子，但也存在少量由本征激发产生的电子—空穴对。因此 N 型半导体中，电子是多数载流子，简称多子；空穴是少数载流子，简称少子。N 型半导体示意图如图 1—6 (b) 所示，图中⊕表示杂质正离子，每一个正离子旁边有一个自由电子（多子）。图中只有一对表示由本征激发产生的电子—空穴对（少子）。

(2) P 型半导体。在本征半导体硅（或锗）中掺入少量 3 价硼（或镓、铟等），这些 3 价硼原子取代了硅（或锗）原子的位置，它与相邻的 4 价硅（或锗）原子组成共价键时，其中一个键上缺少一个电子而形成一个空穴，在常温下相邻的硅（或锗）价电子被激发时，容易被硼原子吸引来填补它的空穴，使固定在晶格中的硼原子变成带负电荷的负离子，不能参予导电，如图 1—7 (a) 所示。掺入硼杂质而使半导体具有大量的空穴，这种主要靠空穴导电的半导体，称为空穴型半导体，简称 P 型半导体。而 3 价杂质原子称为 P 型杂质原子。

在 P 型半导体中，由于本征激发也产生少量电子—空穴对。因此，P 型半导体中，空穴是多数载流子（多子），电子是少数载流子（少子）。图 1—7 (b) 是 P 型半导体示意图。

综上所述，在本征半导体中掺入少量的杂质以后，可以使半导体的导电能力大大增强。控制掺入杂质的浓度，就可实现预先规定的半导体的导电能力大小，从而获得所需要的 N 型或 P 型半导体，生产出各种型式的半导体器件。

二、PN 结及其单向导电性 如果在 N 型（或 P 型）半导体基片上，采用特定的工艺，掺入一定数量 P 型（或 N 型）杂质原子，使之形成 P 型（或 N 型）区，在 N 区与 P 区的交界面两边，就形成一层很薄的空间电荷区（其厚度约为 $0.5\mu\text{m}$ ），称为 PN 结。PN 结是构成晶体二极管和三极管的基础。掌握 PN 结的特性，对于正确理解各种半导体器件的工作原理和性能是非常重要的。

1. PN 结的形成 前述本征半导体和磷、硼等杂质，原来都是电中性的。当组成 N 型（或 P 型）杂质

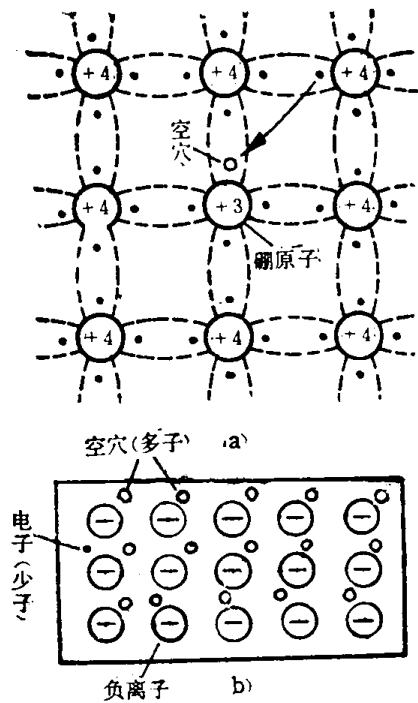


图 1—7 P 型半导体
(a) 结构图 (b) 示意图