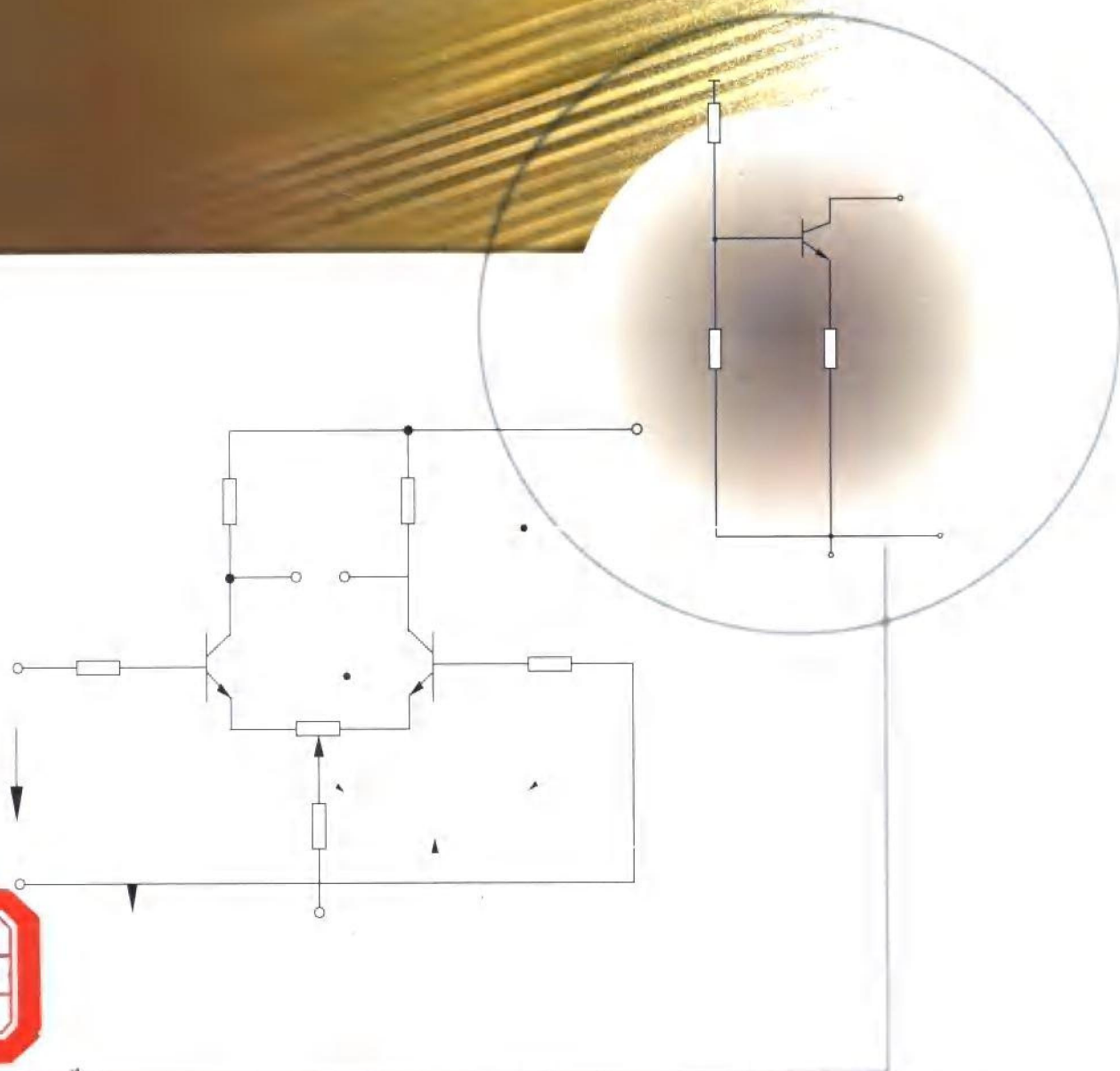


模拟电子技术

主编 宋学君 邬鸿彦



科学出版社

模 拟 电 子 技 术

主 编 宋学君 邬鸿彦

科 学 出 版 社

1 9 9 9

内 容 简 介

本书是参照各类大专院校电子技术大纲的要求编写的。全书共分 8 章, 内容包括半导体器件的特性、放大电路基础、集成运算放大器、反馈放大器、运算电路、信号发生器、功率放大器、直流电源。

本书由浅入深, 加强基本概念, 精选内容, 合理地控制教材的深度和广度, 章末有小结和习题, 适合作大专院校、职业技术学院、成人教育及业余培训等的教材, 也可供电子类、计算机及其他类专业的学生自学和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/宋学君, 邬鸿彦主编. -北京: 科学出版社, 1999.8
ISBN 7-03-007399-1

I. 模… II. ①宋… ②邬… III. 模拟电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 16784 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

源海印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1999 年 8 月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—4 000 字数: 298 000

定价: 21.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈北燕〉)

《模拟电子技术》编辑委员会

主 编：宋学君 邬鸿彦

副主编：刘波粒 陈 健

编 委：(以姓氏笔画排序)

石庆祥 刘波粒 邬鸿彦 孙二林

张 劼 张书法 张德印 宋学君

陈 健 吴 剑 李茂竹

前 言

电子技术迅猛发展，由分立元件发展到集成电路、中小规模集成电路、大规模集成电路和超大规模集成电路。为了使基础课教学适应这一发展的需要，让学生在较少的课时内学到更多的知识，我们组织了从事多年教学工作的教师编写了本书，适用于 72 学时的教学计划。

全书内容包括半导体器件、放大电路基础、集成运算放大器、反馈放大器、信号运算电路、信号发生器、功率放大器、直流电源。

内容由浅入深，对模拟电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法作了详尽的阐述，在保证学科系统性和理论性的前提下，既注意精选内容，又力图反映科学技术的发展水平和满足后续课程的需要。为了加强对课堂知识的理解，列举了若干电路实例，并配有一定数量的例题、思考题和习题。

本书编写人员如下：第一章，张劼；第二章，张书法、张德印；第三章，宋学君；第四章，刘波粒；第五章，陈健；第六章，吴剑、李茂竹；第七章，石庆祥；第八章，孙二林。宋学君负责组织和全书的统稿，邬鸿彦教授负责组织该书的编写和审稿。

由于编者水平有限，对书中错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

1999 年 4 月

本书符号说明

1. 电流和电压

I 、 i	电流通用符号
U 、 u	电压通用符号
I_B 、 U_B	大写字母、大写下标, 表示直流量
I_b 、 U_b	大写字母、小写下标, 表示交流有效值
i_b 、 u_b	小写字母、小写下标, 表示交流瞬时值
i_B 、 u_B	小写字母、大写下标, 表示含有直流的瞬时总值
$\dot{I}_b$ 、 $\dot{U}_b$	复数量
ΔI_B 、 ΔU_B	直流变化量
Δi_B 、 Δu_B	瞬时值变化量
$I_{B(AV)}$	基极电流的平均值
I_f 、 U_f	反馈电流电压
I_i 、 U_i	交流输入电流电压
I_o 、 U_o	交流输出电流电压
I_Q 、 U_Q	电流电压静态值
I_+ 、 U_+	集成运放同相输入电流电压
I_- 、 U_-	集成运放反相输入电流电压
U_{ic}	共模输入电压
U_{id}	差模输入电压
U_S	信号源电压
V_{CC}	三极管集电极电源电压
V_{BB}	三极管基极电源电压
V_{EE}	三极管发射极电源电压
V_{DD}	场效应管漏极电源电压
V_{SS}	场效应管源极电源电压

2. 电阻、电容、电感、器件符号

R	电路的电阻或等效电阻
r	器件内部的等效电阻
R_i	电路的输入电阻
R_{if}	有反馈电路的输入电阻

R_L	电路的负载电阻
R_o	电路的输出电阻
R_{of}	有反馈电路的输出电阻
R_S	信号源内阻
C	电容通用符号
L	电感通用符号
D	二极管通用符号
D_Z	稳压管通用符号
T	三极管或场效应管通用符号

3. 放大倍数

A	放大倍数通用符号
A_f	反馈放大器的放大倍数
A_u	电压放大倍数
A_{us}	源电压放大倍数
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
A_{uh}	高频电压放大倍数
A_{ul}	低频电压放大倍数
A_{um}	中频电压放大倍数

4. 频率

f	频率通用符号
ω	角频率通用符号
f_H	上限频率
f_L	下限频率
f_o	回路固有频率、中心频率、振荡频率
BW	通频带

5. 功率

P	功率通用符
p	瞬时功率
P_o	输出功率
P_T	晶体管消耗的功率
P_E	电源提供的功率

6. 器件参数符号

(1) 二极管参数符号

I_F	二极管正向电流
I_R	二极管反向电流
I_{DM}	二极管最大工作电流
I_D	二极管的工作电流
$I_{R(sat)}$	二极管的反向饱和电流
V_{RWM}	二极管的反向工作峰值电压
$U_{(BR)}$	二极管的击穿电压
U_Z	稳压二极管的稳定电压
I_Z	稳压二极管的稳定电流
r_z	稳压二极管的动态电阻

(2) 三极管、场效应管

I_{CBO}	发射极开路时 c-b 间的反向电流
I_{CEO}	基极开路时 c-e 间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时 c-b 间的击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时 c-e 间的击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时 e-b 间的击穿电压
$U_{(BR)DS}$	漏源间的击穿电压
$U_{GS(off)}$	场效应管的栅源夹断电压

$U_{GS(th)}$	场效应管的开启电压
r_{be}	晶体管 b-e 间的等效电阻
r_{ce}	晶体管 c-e 间的等效电阻
r_{ds}	场效应管 d-s 间的等效电阻
C_b	势垒电容
C_d	扩散电容
C_j	结电容
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	场效应管漏极最大允许耗散功率
f_β	共射极接法晶体管电流放大倍数的上限频率
f_T	共射极接法晶体管电流放大倍数的特征频率
f_α	共基极接法晶体管电流放大倍数的上限频率
f_M	晶体管的最高工作频率
α	共基极交流电流放大倍数
$\bar{\alpha}$	共基极接法晶体管直流电流放大倍数
β	共射极接法晶体管交流电流放大倍数
$\bar{\beta}$	共射极接法晶体管直流电流放大倍数
g_m	场效应管的低频跨导

目 录

前 言

本书符号说明

第一章 半导体二极管和三极管	(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 本征半导体的导电特性	(2)
1.1.3 杂质半导体的导电特性	(3)
1.2 PN 结的导电特性	(5)
1.2.1 PN 结的形成	(5)
1.2.2 PN 结的单向导电性	(6)
1.2.3 PN 结的击穿特性	(8)
1.2.4 PN 结的电容效应	(9)
1.3 半导体二极管	(10)
1.3.1 二极管的基本结构	(10)
1.3.2 二极管的伏安特性	(11)
1.3.3 二极管的主要参数	(12)
1.3.4 稳压二极管	(13)
1.4 双极性晶体管	(14)
1.4.1 晶体管的结构、符号和特点	(14)
1.4.2 晶体管内部的电流分配关系和放大原理	(15)
1.4.3 晶体管共射极电路的特性曲线	(17)
1.4.4 晶体管的主要参数	(19)
1.5 场效应管	(22)
1.5.1 结型场效应管	(23)
1.5.2 绝缘栅型场效应管	(25)
1.5.3 场效应管的主要参数及使用注意事项	(28)
1.5.4 场效应管与晶体比较	(31)
本章小结	(31)
思考题和习题	(31)
第二章 放大电路基础	(34)
2.1 放大电路的性能指标与放大电路的组成原则	(34)
2.1.1 放大的概念	(34)
2.1.2 放大器的性能指标	(35)

2.1.3	共射极放大器的基本结构与工作原理	(36)
2.1.4	放大电路的组成原则	(38)
2.2	共射极放大器的图解分析法	(39)
2.2.1	静态分析	(39)
2.2.2	动态分析	(41)
2.3	静态工作点的稳定	(45)
2.3.1	温度变化对静态工作点的影响	(45)
2.3.2	偏置电路	(46)
2.4	放大电路的微变等效电路分析法	(48)
2.4.1	微变等效电路法	(48)
2.4.2	动态性能指标的计算	(50)
2.4.3	带射极电阻的共射极放大器	(51)
2.5	晶体管单管放大器的三种基本接法	(53)
2.5.1	共集电极放大器	(53)
2.5.2	共基极放大电路	(56)
2.5.3	放大器三种基本组态的比较	(57)
2.6	场效应管放大器	(58)
2.6.1	场效应管放大器的偏置电路	(58)
2.6.2	用微变等效电路法分析共源放大器	(60)
2.7	放大器的频率特性	(61)
2.7.1	放大器频率特性的概念	(61)
2.7.2	单管共射放大器的频率特性	(64)
2.8	多级放大器	(65)
2.8.1	多级放大器的级间耦合方式	(66)
2.8.2	多级放大器的分析方法	(67)
	本章小结	(70)
	思考题与习题	(70)
第三章	集成运算放大器	(76)
3.1	集成电路的特点	(76)
3.2	直接耦合放大器的特点	(77)
3.3	差动放大电路	(78)
3.3.1	典型的差动放大器	(78)
3.3.2	恒流源差动放大器	(83)
3.4	集成运算放大器的基本单元电路	(84)
3.4.1	差动输入级	(85)
3.4.2	恒流源偏置电路	(86)
3.4.3	有源负载放大器	(88)
3.4.4	输出级	(90)
3.5	集成运算放大器的典型电路分析、主要参数	(91)

3.5.1 集成运放典型电路分析	(91)
3.5.2 主要技术指标	(94)
本章小结	(96)
思考题与习题	(96)
第四章 反馈放大器	(99)
4.1 反馈的基本概念及类型	(99)
4.1.1 反馈的基本概念	(99)
4.1.2 反馈的基本类型	(102)
4.2 交流负反馈放大电路的一般表示式	(104)
4.2.1 交流负反馈放大电路的方框图	(104)
4.2.2 反馈的一般表达式	(105)
4.2.3 方框图中各个量的含义及量纲	(106)
4.3 负反馈对放大器性能的影响	(107)
4.3.1 负反馈提高了放大倍数的稳定度	(107)
4.3.2 负反馈展宽了放大电路的通频带	(108)
4.3.3 负反馈减小了非线性失真和噪声	(109)
4.3.4 负反馈改变放大电路的输入、输出电阻	(110)
4.4 负反馈放大电路的分析方法	(114)
4.4.1 深度负反馈闭环增益的估算	(114)
4.4.2 方框图计算法	(117)
4.5 负反馈放大电路的自激	(122)
4.5.1 产生自激振荡的条件	(122)
4.5.2 负反馈放大器稳定工作的条件	(124)
4.5.3 反馈放大器的校正方法	(125)
本章小结	(126)
思考题与习题	(127)
第五章 运算电路	(130)
5.1 理想运算放大器的模型及分析方法	(130)
5.2 运算放大器的三种输入方式	(132)
5.2.1 反相输入比例电路	(132)
5.2.2 同相输入放大器	(135)
5.2.3 差动输入比例电路	(136)
5.3 基本运算电路	(138)
5.3.1 加法电路	(138)
5.3.2 加减法电路	(140)
5.3.3 积分电路和微分电路	(142)
本章小结	(146)
思考题与习题	(146)
第六章 波形发生器	(153)

6.1 正弦波振荡器的自激振荡条件	(153)
6.2 RC 正弦波振荡器	(154)
6.3 LC 正弦波振荡器	(157)
6.3.1 LC 并联谐振回路的选频特性	(157)
6.3.2 变压器反馈式 LC 振荡器	(159)
6.3.3 三端式 LC 正弦波振荡器	(159)
6.4 比较器	(162)
6.4.1 单限比较器	(162)
6.4.2 迟滞比较器	(163)
6.5 矩形波发生器	(165)
6.6 三角波和锯齿波发生器	(166)
6.6.1 三角波发生器	(166)
6.6.2 锯齿波发生器	(167)
本章小结	(169)
思考题与习题	(170)
第七章 功率放大器	(172)
7.1 功率放大器的性能特点	(172)
7.2 OCL 互补对称功率放大器	(173)
7.3 OTL 互补对称功率放大器	(176)
7.4 集成功率放大器	(178)
本章小结	(180)
思考题与习题	(180)
第八章 直流电源	(182)
8.1 直流电源的组成	(182)
8.2 整流电路	(183)
8.2.1 单相半波整流电路	(183)
8.2.2 单相桥式全波整流电路	(184)
8.3 滤波电路	(186)
8.4 串联型晶体管稳压电路	(189)
8.5 集成稳压电路	(193)
8.5.1 集成稳压电路概述	(193)
8.5.2 三端式固定输出电压集成稳压器的应用	(197)
本章小结	(198)
思考题与习题	(198)
参考文献	(201)

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是电子线路的重要组成部分,PN结是各种半导体器件的基础。本章首先介绍半导体和PN结的特性,然后介绍半导体二极管、三极管和场效应管的结构、工作原理、特性及参数,并分析和讨论由它们组成的几个简单的应用电路。

对半导体器件,重点掌握它的外部特性和参数,达到正确选择和使用这些器件的目的。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

世界上的物质种类繁多,就其导电性而言可分为三大类:导体、绝缘体和半导体。铜、银、铝等金属材料很容易导电,称之为导体,导体具有良好的导电性能,电阻率很低,在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 到 $10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$ 之间。陶瓷、塑料、橡胶、玻璃等物体在通常情况下很难导电,这类材料称之为绝缘体。绝缘体的导电能力很差,电阻率很高,在 $10^8\Omega\cdot\text{m}$ 到 $10^{16}\Omega\cdot\text{m}$ 之间。除导体和绝缘体之外,自然界中还存在着另一类物质,它们的导电性能介于导体和绝缘体之间,既不像导体那样容易导电,也不像绝缘体那样难以导电。我们称这类物质为半导体。半导体的导电特性介于导体和绝缘体之间,电阻率在 $10^{-5}\Omega\cdot\text{m}$ 到 $10^7\Omega\cdot\text{m}$ 之间。

半导体材料之所以备受人们的关注,并且得到广泛的应用,不是源于它们的电阻率在数值上与导体和绝缘体的区别,而是在于它们具有独特的区别于导体和绝缘体的物理特性。首先,半导体的电阻率具有热敏性,随温度的升高而明显地降低(负温度系数)。一般金属的电阻率随温度的升高而增加,例如铜,温度每升高 1°C ,电阻率增加 0.4% ,而半导体材料则相反,以锗为例,当温度从 20°C 升高到 32°C 时,其电阻率下降一半左右。利用半导体的这种特性,我们很容易制成热敏电阻或其他对温度敏感的传感器。其二,半导体的电阻率具有光敏性,即光照可改变半导体的导电特性,光照越强,电阻率越低。这是半导体区别于导体和绝缘体的另一特性。例如硫化镉薄膜电阻,无光照时,电阻为几十兆欧姆,当光照时,其电阻仅为几万欧姆。各种光敏元件,如光敏电阻、光导管等,就是利用半导体的这一特征制成的。其三,半导体的电阻率受杂质的影响很大,它的这种杂质性与导体和绝缘体截然不同。在金属导体中掺入少量杂质后,其电阻率虽有增加但变化不大。而半导体却不同,在纯净的半导体晶体中掺入极微量的杂质,就能使其导电性能大幅度地改变。如在纯硅中加入百万分之一的硼,其电阻率从 $2\times 10^3\Omega\cdot\text{m}$ 下降到 $4\times 10^{-3}\Omega\cdot\text{m}$ 。不仅如此,选择不同类型的杂质,还可以改变半导体的导电类型。人们正是利用半导体的这一特征,通过各种工艺手段,控制半导体中杂质的性质和数量,从而制成了各种不同性质和种类的半导体器件。

1.1.2 本征半导体的导电特性

本征半导体是指非常纯净的单晶体。单晶体内部的原子整齐地按一定规则排列着。原子之间的距离相等,约为 $2.35 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 。通常把这种非常纯净的且原子排列整齐的半导体,称为本征半导体。

近代电子器件中用的最多的半导体材料是锗和硅。它们均为四价元素,具有相同的晶体结构。我们以硅 Si 为例来讨论本征半导体所具有的导电特性。如图 1.1.1(a)所示,硅原子的原子序号为 14,由原子核和 14 个外层电子组成中性原子。它的最外层轨道上有四个价电子。硅 Si 原子的物理、化学性质主要由这四个价电子决定。在实际问题中,为了突出价电子的作用和便于讨论,我们通常把原子核和内层电子看做一个整体,称为惯性核。它的静电量为 4 个电子电量。于是我们可以得到硅原子的简化模型如图 1.1.1(c)所示。

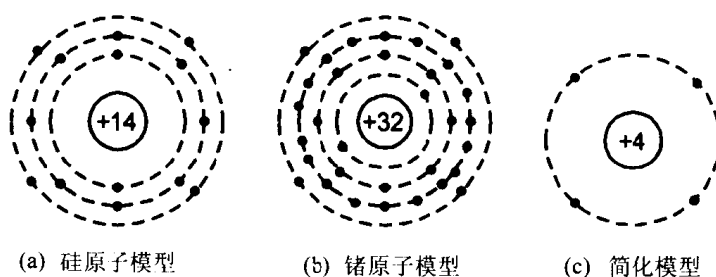


图 1.1.1 硅、锗原子结构

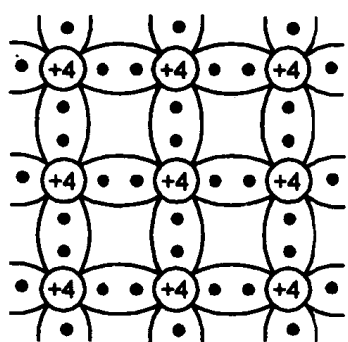


图 1.1.2 硅单晶的共价键结构

当硅制成单晶后,其晶体结构如图 1.1.2 所示,每个原子周围的价电子同相邻原子的价电子形成共价键结构,即两个相邻原子共用一对价电子,这对电子中的任何一个电子,不仅受到自身原子的束缚,同时又受到相邻原子的束缚。由原子理论可知,当原子的最外层电子数为 8 个时,其结构成为比较稳定的状态。此时外层电子受原子核的束缚较大,不易参与导电。硅和锗是依靠共价键结构以电子共用的形式才达到最外层是八个电子的结构,所以它们的束缚电子受到的束缚力并不像绝缘体那么大。在室温下,由于热运动,其中少数束缚电子可能获得较大的能量,当其能量大于束缚电子的电离能时(硅: $E_G = 1.1\text{eV}$; 锗: $E_G = 0.72\text{eV}$),束缚电子

就有可能挣脱原子核的束缚而成为自由电子。束缚电子变为自由电子的同时在束缚电子原来的共价键位置处留下一个空位,如图 1.1.3 所示。空位的出现是半导体区别于导体的一个重要的特征。当共价键中出现空位时,相邻原子的束缚电子就比较容易离开它所在的共价键,填充到这个空位中来,而原来束缚电子所在的位置又出现了新的空位,这个空位又可能被相邻原子的束缚电子所填充,再次出现空位。束缚电子这样依次填充下去便形成了空位的流动。空位的流动实际上是共价键结构中束缚电子的移动,空位的流动

方向与束缚电子的流动方向相反,为了区别自由电子(简称电子)和束缚电子导电,我们抽象出来“空穴”这种载流子,把空穴看成带正电的载流子,电量与电子相同,让空穴导电代表束缚电子导电。因此,通常我们认为在外电场作用下,空穴可以在晶体中定向移动,只是自由度比自由电子小。

从前面分析可见,本征半导体中存在着两种不同的载流子:电子和空穴,而且它们的数量相等称为电子-空穴对。在外电场的作用下,电子和空穴以相反的方向,各自作有规则的定向运动而形成电流。这是本征半导体区别于金属导体的一个重要特征。

在本征半导体中,受激产生一个自由电子,必然相伴产生一个空穴,电子和空穴是成对出现的,这种现象称为本征激发,另外,自由电子在运动中,可能会遇到空穴,并和空穴重新结合而消灭,这种与激发相反的过程叫复合。在一定的环境温度下,激发和复合的过程同时都在进行着,但电子-空穴对的数目保持相对的稳定,这种状态称为动态平衡,即载流子的浓度为定值。

理论证明本征半导体的载流子浓度为

$$n_i = p_i = AT^{3/2}e^{-\frac{E_G}{2kT}} \quad (1.1.1)$$

其中, T 为热力学温标, E_G 为电离能, k 为玻尔兹曼常量, A 与半导体材料有关为常数。

在室温下,Si的载流子浓度为 10^{10}cm^{-3} ,Ge的载流子浓度为 10^{13}cm^{-3} ,与原子浓度 10^{22}cm^{-3} 相比,载流子浓度太小,所以导电能力太弱,实际中用的是杂质半导体。另外在半导体的材料确定以后,载流子的浓度和环境温度有关,随着温度的升高,载流子的浓度近似按指数的规律增大。例如,在室温下温度每升高 8°C ,硅的载流子浓度增加一倍;温度每升高 12°C ,锗的载流子浓度增加一倍。半导体导电能力与温度的密切关系的原因就在于此。

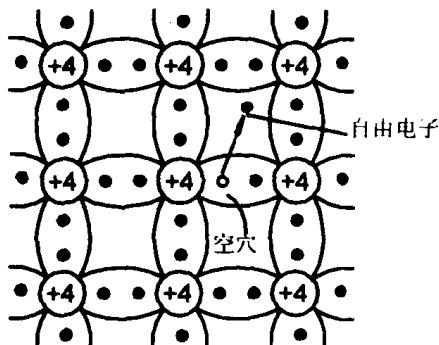


图 1.1.3 本征半导体
电子-空穴对的形成

1.1.3 杂质半导体的导电特性

本征半导体的导电能力很弱,实际用途并不大。但是,如果在本征半导体中有选择地掺入微量的杂质,就会使半导体的导电性能发生显著的变化。这些微量杂质不但可以改变半导体中载流子的浓度,而且还可以改变半导体的导电类型,从而实现人为控制半导体的种类和电阻率的目的。

掺杂后的半导体称为杂质半导体,杂质半导体按掺杂的种类不同,可分为N型(电子型)半导体和P型(空穴型)半导体两种。

1. N型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素磷(或砷、锑等)原子后就会取代Si晶体中某些位置上的硅原子,如图1.1.4所示。由于磷原子的数量甚微,整个Si晶体的结构基本不

变。磷原子最外层电子轨道上有五个价电子,其中四个和周围的硅原子结合构成共价键结构,尚有一个价电子是多余的,这个多余的价电子仅受磷原子核的束缚(电离能仅为 $E_G = 0.044\text{eV}$),在室温下这个价电子受热激发所获得的能量足以使它摆脱磷原子核的束缚而成为一个自由电子,几乎每一个磷原子都能提供一个这样的自由电子,失去价电子的磷本身成为一个带正电的不能移动的正离子不参与导电。所以磷原子仅提供一种载流子电子,故磷(或砷、锑等)称为施主杂质。掺入施主杂质的半导体中,自由电子的数量远大于空穴的数量,这类杂质的半导体称为电子型半导体,或 N(Negative 的字头)型半导体。

在 N 型半导体中,也同样存在着本征激发的现象,有电子-空穴对的产生,但比起掺杂而产生的电子来说数量很少,传递电流的主要载流子是电子,故电子称为多数载流子(简称“多子”),空穴相应地称为少数载流子(简称“少子”)。而且由于电子的增多,空穴遇到电子而被复合的概率增大,杂质半导体中空穴的浓度远小于同温度下本征半导体中空穴的浓度。

理论证明,杂质半导体中的载流子浓度为

$$np = n_i^2 \quad (1.1.2)$$

设施主杂质的浓度为 N_D ,在 N 型半导体中多子电子的浓度 n_n 几乎由掺杂浓度决定: $n_n \approx N_D$;少子载流子空穴浓度 p_n 由半导体材料、温度、掺杂浓度确定: $p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$ 。由此可知,多子越多少子越少。

2. P 型半导体

如果在硅单晶中掺入微量的三价元素,如硼(或镓、铝等),由于硼的价电子只有三个,当它和周围的硅原子相结合形成共价键时,因缺少一个电子而出现了空位,如图 1.1.5 所示。由于结构的不稳定,硼原子很容易从相邻硅原子的共价键中夺取一个束缚电子而形成稳定结构,硼原子接受一个电子变成带负电的不能移动的负离子不参与导电,同时硅原子的共价键中失去束缚电子便出现了一个新的空位(这就是空穴)。在常温下几乎每一个硼原子均接受硅晶体中的束缚电子而产生空穴,从而提供了与杂质硼原子相等的空穴。所以,硼原子接受电子称为受主杂质。受主杂质仅产生空穴一种载流子,参与导电的电子是本征激发时空穴-电子对所产生的。这种掺杂三价元素的半导体中,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子,所以称为空穴型半导体,或 P(Positive 的字头)型半导体。

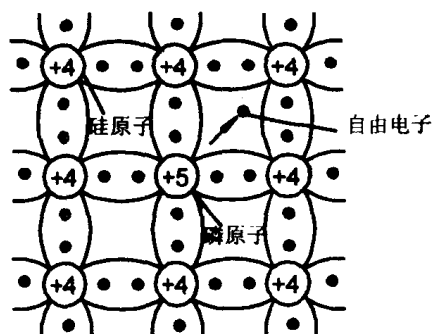


图 1.1.4 N 型半导体

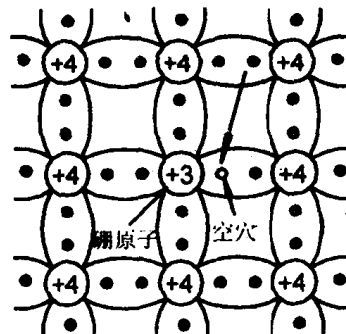


图 1.1.5 P 型半导体

设受主杂质的浓度为 N_A , 在 P 型半导体中多子空穴的浓度 p_p 几乎由掺杂浓度决定: $p_p \approx N_A$; 少子电子浓度 n_p 由半导体材料、温度、掺杂浓度确定: $n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A}$ 。

在杂质半导体中, 参与导电的有两种载流子, 主要是多数载流子导电, 由于杂质原子在室温下全部电离所以多数载流子的浓度与温度基本无关, 近似等于杂质的浓度。尽管杂质含量甚微, 但对半导体的导电能力影响极大。掺入百万分之一的杂质, 载流子的浓度将增加 100 万倍。而少子的数量极少, 但受温度的影响却很大, 其数量随温度的升高而增多。

实际的半导体材料中, 尽管纯度很高, 但难免有杂质的存在, 而且还经常需要在同一块半导体中同时掺入施主杂质和受主杂质。施主杂质和受主杂质对半导体导电性能的影响可以互相抵消, 称为杂质补偿。在一块半导体中, 如果受主杂质占优势, 半导体为 P 型半导体; 如果施主杂质占优势, 半导体为 N 型半导体。

1.2 PN 结的导电特性

在一块半导体的两边, 掺以不同的杂质, 一边形成 N 型半导体, 一边形成 P 型半导体。在两种不同类型半导体的交界面处就会形成一个具有特殊物理特性的导电薄层, 称为 PN 结。PN 结是构成二极管、三极管、可控硅、固体组件等各种类型半导体器件的基础。

1.2.1 PN 结的形成

PN 结是 P 型半导体和 N 型半导体相“接触”而形成的。由于 P 型半导体中存在着多子空穴和少子电子, 而 N 型半导体则相反, 多数载流子是电子, 少数载流子是空穴, 它们均为电中性。如图 1.2.1 所示。当 P 型半导体和 N 型半导体相互“接触”后, 由于两类半导体中多子电子和空穴浓度差的存在, 在它们的交界面附近便出现了电子和空穴的扩散运动。N 区界面附近的多子电子将向 P 区扩散, 并与 P 区的空穴复合, N 区界面附近剩下了不能移动的施主正离子, 形成一个很薄的正电荷层。同样, P 区界面的多子空穴将向 N 区扩散并与 N 区的电子复合, 在 P 区界面附近剩下不能移动的受主负离子, 形成一个带负电的薄电荷层。于是在两种半导体交界面附近便形成了一个空间电荷区, 这就是

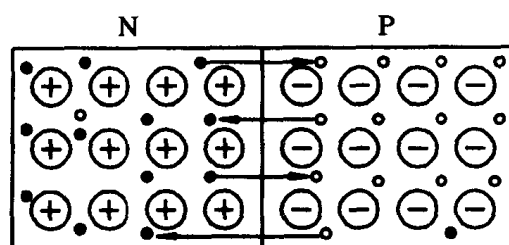


图 1.2.1 载流子的扩散运动

PN 结。

在 PN 结所形成的空间电荷区内,只有不能移动的正负离子,载流子几乎全部扩散到对方并被复合掉了,或者说载流子被消耗尽了。因此,空间电荷区又称为耗尽层。在耗尽层内一边(P 区)带负电荷,另一边(N 区)带正电荷。在 PN 结形成的同时,耗尽层内便出现了一个内电场 E_i ,内电场的方向由 N 区指向 P 区。如图 1.2.2 所示。多子的扩散形成空间电荷区并产生内电场,内电场的存在对结内空穴和电子的扩散运动起到了阻碍的作用,载流子要继续进行扩散运动,就必须付出一定的能量,克服内电场的阻力才能扩散过去。因此空间电荷区又叫势垒区或阻挡区。

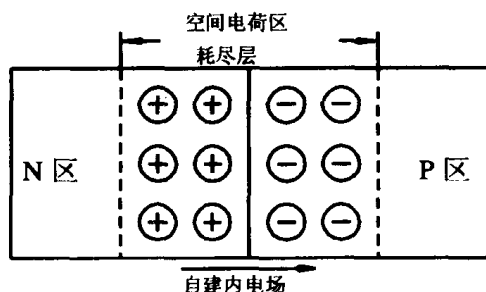


图 1.2.2 PN 结的形成

这一空间电荷区的出现,使 PN 结两边多子的扩散运动不可能无限制地永远进行下去。随着 PN 结的形成和内部电场 E_i 的产生,使结内及其附近的少子在内电场 E_i 作用下形成了与扩散方向相反的逆运动。我们把少子的这种运动称为漂移运动。扩散和漂移是 PN 结中相互逆向的载流子运动。在扩散开始时,多子扩散占主要优势,PN 结加速形成。随着扩散的进行,PN 结空间电荷区的不断加宽,内电场 E_i 也随之增强。由电场 E_i 所引起的少子漂移运动也随之加强。当两种作用相等时,扩散运动和漂移运动出现了一种动态平衡状态。在 P、N 半导体交界面附近便形成了一个稳定的空间电荷分布区。PN 结一般都很薄,约为 $0.5\mu\text{m}$ 左右。

1.2.2 PN 结的单向导电性

在讨论了 PN 结的形成后,我们来研究一下在外电场作用下的一个重要特性——单向导电性。下面分 PN 结加正向电压和 PN 结加反向电压两种情况来讨论这一特性。

1. PN 结外加正向电压

如图 1.2.3 所示,电源的正极接 P 区,电源的负极接 N 区,这种接法为 PN 结加正向电压或正向偏压。由于 PN 结的势垒作用,使 PN 结成为高阻区,其电阻比 P 区和 N 区的电阻高的多,外加电压几乎全部降落在 PN 结上。在 PN 结上建立起了一个与内部电场 E_i 方向相反的外电场 E_F 。使空间电荷区电场减弱,在外电场作用下,P 区和 N 区的多数载流子空穴和电子被推向 PN 结,把结内正负离子中和一部分,使空间电荷区变窄。原来的平衡状态被破坏,多数载流子的扩散运动大于漂移运动。在外电场的作用下,P 区多数载流子空穴通过 PN 结扩散到 N 区,N 区的电子向 P 区扩散形成电流 I_F 。