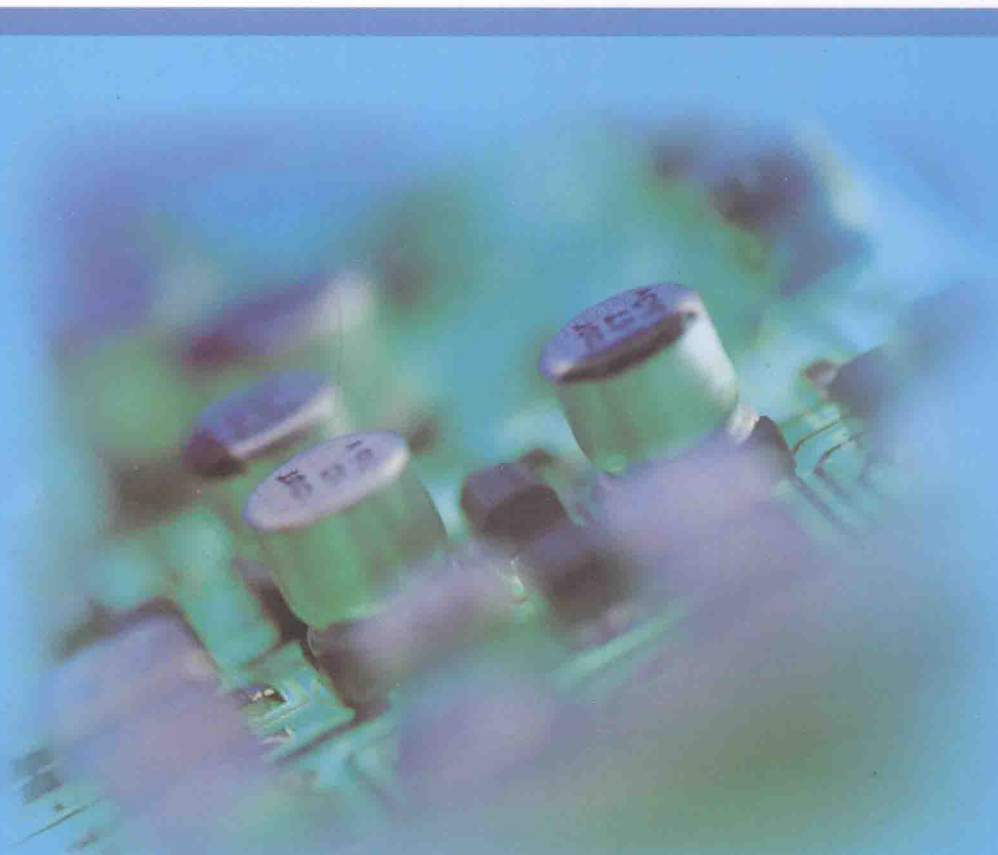




普通高等教育“十一五”规划教材

模拟电子 技术基础

房国志 主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

模拟电子技术基础

房国志 沈永滨 孙 慧 于春雨
崔 阳 张 旭 刘正梅 王宏昊 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共分8章,主要内容为:半导体基础知识;半导体二极管;特殊二极管;双极型晶体管;场效应晶体管;单结晶体管和晶闸管;基本放大电路;放大电路的频率响应;集成运算放大电路;放大电路中的反馈;信号的运算和处理;波形的发生;电子信息系统中常用电路,如预处理放大电路、信号转换电路、功率放大电路、集成功率放大电路和锁相环及其在信号转换电路中的应用等¹。书中习题典型,每章有小结,并提供了MULTISIM仿真实验指导。

本书可作为高等学校测控工程及仪器、电气工程、自动化、电子信息工程、通信工程、生物医学工程、电子科学与技术等有关专业本专科的“电子线路基础”或“电子技术基础”课程的教材和教学参考书,也可作为广大工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/房国志等编著. —北京:国防工业出版社,2012.1 重印
ISBN 978-7-118-05186-5

I. 模... II. 房... III. 模拟电路—电子技术
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 071624 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 478 千字

2012 年 1 月第 5 次印刷 印数 13001—15000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

模拟电子技术基础是电子信息类、电气类、机电类专业必修的技术基础课,也是非电类专业电子技术课程的主要教学内容。随着电子信息技术高速发展,模拟电路所涵盖的内容越来越多,再加之教育面向的转变,即“精英”教育向“大众化”教育的转变和理工科类专业的教学向“工程化”的回归,于是对模拟电子技术课程的教学和教材提出了新的要求,本书就是为了适应这种形势的需要而编写的。编者分析了若干国内外重点大学教材,结合多年来的教学体会及在本校所编讲义的基础上,力求在本书编写中体现出以下的思路和特色。

1. 由于该门课程的概念多,知识点多,面向的对象又是初学者,加之所涉及的基本理论、基础知识和基本方法对本科生的培养起着重要的作用;而且课程的内容体系与其他相关的专业课程之间保持着紧密的衔接和交融,因此,在基本概念的讲述上不能压缩篇幅。另外,过多的数学分析推导既占用了大量的教学学时,还可能分散学生的注意力甚至掩盖物理概念。在这方面,本书借鉴国外教材的写法:文字阐述详尽,公式简明易记,减少数学推导,不仅易教更易读、易学。因此,本书力求做到增加可读性,减少学生阅读和学习的困难。

2. 在加强基本概念的基础上,最大限度地删除了对半导体器件(晶体二极管、双极型晶体管 and 场效应晶体管)内部物理过程的数学分析,把注意力放在器件的模型、参数和伏安特性上面。本书始终以“讲透基本原理,打好电路基础,面向集成电路”为宗旨,在章节次序的安排上尽量符合由浅入深,由个别到一般的认识规律。以“先器件后电路”的方法,注重知识链的发生和发展过程,使内容更加系统化。放大电路的分析也按照先基础电路、后实用变形电路来编排。

3. 模拟电子技术基础是学生第一次接触到的一门工程型、技术型、实用型而非理论型的课程,它与先修课程“电路分析基础”有很大的差别。模拟电子电路是具有一定功能的实用电路,学生在学习电子电路课程时,由于受习惯思维的影响,首先碰到的疑点和难点是不理解电子电路课程的工程性特点,因此,本书注意强调电路结构和元件取值的合理性。电路的计算则用工程近似方法:抓住主要参量来进行工程估算,使之既不失设计计算的正确性和可靠性,又能使分析和设计计算简单化。

4. 加强宏观思维,化零为整。比如,组成集成运放的单元电路分散在不同章节中,学生缺乏整体概念,搞不清各个局部之间的联系,会张冠李戴。我们将这个顺序颠倒过来,先总体介绍一个集成运放,再剖析集成运放组成不同功能的电路,然后,把各个电路展开,分析它们的共性与个性,在学生头脑中先建立整体印象,再分头去研究各个电路,以培养学生的宏观思维能力和对集成运放的运用能力。

5. 随着半导体技术的发展,模拟集成电路领域里的新器件、新技术不断涌现,面对 21 世纪新的人才培养要求,基础课程的教学应该与科技发展同步。教材除了在第三章对通用模拟集成电路最重要的品种集成运算放大器重点分析外,在第八章对电子信息系统中常用的电路和技术也作了适当的介绍,以增加学习兴趣,开拓视野和思路,适应现代科技对人才的需求。

6. 为了把 EDA 技术引入“模拟电子技术基础”课程的教学中,尽早使学生对当代电子电路的设计及制作有一定程度的了解,初步学习和掌握 EDA 技术的使用软件,并通过 EDA 软件的仿真技术,提高学生理论与实践相结合的能力。编者认为,在课程的教学过程中适时引入 Multisim 对电路的仿真,指导学生初步学习和掌握 EDA 技术的使用软件,通过 EDA 软件的仿真技术,可以大大提高学生理论与实践相结合的能力,从而解决传统教学中课堂与实验室、理论与实践严重脱节的问题。

本书的原讲义已供编者所在学校本科学生试用,反映很好,在使用过程中,同行教师对讲义提出了大量的修改意见,这些意见对本书的编写帮助很大。本书第一章和附录由沈永滨编写,第二章由孙慧编写,第三章由房国志编写,第四章由于春雨编写,第五章由崔阳编写,第六章由张旭编写,第七章由刘正梅编写,第八章由王宏昊共同编写,全书由房国志定稿。哈尔滨工业大学蔡惟铮教授审阅了全稿。在本书的编写过程中,编者从书末所列参考文献中吸取了宝贵的成果和资料,在此谨向各参考文献的著译者表示感谢。还要感谢国防工业出版社对本书出版所给予的支持和帮助。编者深知,模拟电子电路范围广,新知识多,尽管在编写过程中做了很大努力,但由于水平和视野的限制,书中一定有不少错误和不妥之处,希望读者给予批评指正。

编者

2007 年 3 月

目 录

第一章 常用半导体器件	1
1.1 半导体基本知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 PN结及其特性	4
1.2 半导体二极管	7
1.2.1 半导体二极管的结构和类型	7
1.2.2 半导体二极管的伏安特性	8
1.2.3 半导体二极管的主要参数	9
1.2.4 半导体二极管的模型(等效电路)	9
1.3 特殊二极管	13
1.3.1 稳压二极管	13
1.3.2 变容二极管	15
1.3.3 发光二极管	15
1.3.4 光电二极管	16
1.3.5 激光二极管	16
1.4 双极型晶体管	17
1.4.1 晶体管的结构及类型	17
1.4.2 晶体管的电流放大作用	18
1.4.3 晶体管的共射特性曲线	21
1.4.4 晶体管的主要参数	22
1.4.5 温度对晶体管特性及参数的影响	25
1.4.6 光电三极管	25
1.5 场效应晶体管	27
1.5.1 绝缘栅场效应管	27
1.5.2 结型场效应管	32
1.5.3 场效应管的主要参数	35
1.5.4 场效应管与晶体管的比较	37
1.6 单结晶体管和晶闸管	38
1.6.1 单结晶体管	38
1.6.2 晶闸管	40

本章小结	42
习题	43
第二章 基本放大电路	48
2.1 放大电路的组成及其主要性能指标	48
2.1.1 放大的概念	48
2.1.2 放大电路的组成及各元件的作用	49
2.1.3 放大电路的工作原理及波形分析	50
2.1.4 放大电路的主要性能指标	51
2.2 基本共射放大电路分析	54
2.2.1 静态分析	54
2.2.2 动态分析	56
2.2.3 放大电路静态工作点的稳定	61
2.3 晶体管单管放大电路的三种基本接法	64
2.3.1 直接耦合式共射放大电路	64
2.3.2 直接耦合式共集放大电路	65
2.3.3 直接耦合式共基放大电路	66
2.3.4 三种接法的比较	67
2.4 场效应管放大电路	67
2.4.1 场效应管放大电路的特点	67
2.4.2 场效应管放大电路的静态分析	68
2.4.3 场效应管放大电路的动态分析	69
2.5 放大电路的频率响应	72
2.5.1 频率响应概述	72
2.5.2 一阶 RC 电路的频率响应	73
2.5.3 晶体管的高频等效模型	76
2.5.4 场效应管的高频等效模型	76
2.5.5 单管放大电路的频率响应	77
2.5.6 多级放大电路的频率特性	80
本章小结	81
习题	82
第三章 集成运算放大电路	88
3.1 集成运算放大电路概述	88
3.1.1 集成运放的发展概况	88
3.1.2 集成运放的种类及特点	89
3.1.3 集成运放电路的结构分析	91
3.1.4 集成运放的电压传输特性	94
3.2 集成运放中的输入级单元电路	95
3.2.1 基本差动放大电路	95

3.2.2	具有恒流源差分放大电路	107
3.2.3	差分放大电路的失调和温漂	109
3.3	集成运放中的中间级单元电路	112
3.3.1	复合管的组成	112
3.3.2	复合管共射放大电路	114
3.3.3	复合管共集放大电路	114
3.4	集成运放中的输出级单元电路	115
3.4.1	功率放大电路的特点、指标和分类	116
3.4.2	直接耦合互补输出级	117
3.4.3	OCL 电路的输出功率及效率	122
3.5	集成运放中的电流源电路	123
3.5.1	基本电流源电路	124
3.5.2	其他型电流源电路	126
3.5.3	以电流源为有源负载的放大电路	127
3.6	集成运放的主要性能指标	129
	本章小结	132
	习题	133
第四章	放大电路中的反馈	138
4.1	反馈的基本概念及判断方法	138
4.1.1	反馈的基本概念	138
4.1.2	反馈的类型和判断	139
4.1.3	负反馈放大电路的四种基本组态	142
4.2	负反馈放大电路的方框图及一般表达式	143
4.2.1	负反馈放大电路的方框图表示法	143
4.2.2	负反馈放大电路的一般表达式	145
4.3	负反馈放大电路的分析计算	146
4.3.1	深度负反馈的实质	146
4.3.2	深度负反馈放大电路的分析计算	146
4.3.3	负反馈放大电路的基本放大电路	151
4.4	负反馈对放大电路性能的影响	153
4.4.1	稳定放大倍数	153
4.4.2	减小非线性失真和抑制干扰及噪声	153
4.4.3	展宽通频带	155
4.4.4	改变输入电阻和输出电阻	156
4.4.5	放大电路中引入负反馈的一般原则	159
4.5	负反馈放大电路的稳定性	160
4.5.1	负反馈放大电路自激振荡产生的原因和条件	160
4.5.2	负反馈放大电路稳定性的判断	161

4.5.3 负反馈放大电路自激振荡的消除方法	163
本章小结	166
习题	167
第五章 信号的运算与处理	170
5.1 概述	170
5.1.1 电子信息系统的组成	170
5.1.2 理想运放的两个工作区	171
5.2 基本运算电路	173
5.2.1 比例运算电路	173
5.2.2 加减运算电路	177
5.2.3 积分运算电路和微分运算电路	181
5.2.4 对数运算电路和指数运算电路	185
5.2.5 利用对数和指数运算电路实现的乘法运算电路和除法运算电路	188
5.3 有源滤波电路	189
5.3.1 滤波电路的基础知识	189
5.3.2 低通滤波器	192
5.3.3 其他滤波电路	197
5.3.4 开关电容滤波器	202
5.3.5 状态变量型有源滤波器	203
本章小结	207
习题	209
第六章 波形的发生	213
6.1 正弦波振荡电路	213
6.1.1 概述	213
6.1.2 RC 正弦波振荡电路	215
6.1.3 LC 正弦波振荡电路	218
6.1.4 石英晶体正弦波振荡电路	227
6.2 电压比较器	229
6.2.1 概述	229
6.2.2 单限比较器	230
6.2.3 滞回比较器	231
6.2.4 窗口比较器	234
6.2.5 集成电压比较器	235
6.3 非正弦波发生电路	236
6.3.1 矩形波发生电路	236
6.3.2 三角波发生电路	239
6.3.3 锯齿波发生电路	241
本章小结	242

习题	243
第七章 直流电源	248
7.1 直流电源的组成及各部分的作用	248
7.2 整流电路	249
7.2.1 整流电路的基本参数	249
7.2.2 单相半波整流电路	250
7.2.3 单相桥式整流电路	252
7.3 滤波电路	255
7.3.1 电容滤波电路	255
7.3.2 其他形式的滤波电路	257
7.3.3 倍压整流电路	258
7.4 稳压二极管稳压电路	259
7.5 串联型稳压电路	262
7.5.1 串联型稳压电路的工作原理	262
7.5.2 稳压电路的保护电路	264
7.5.3 集成稳压电路	265
7.6 开关型稳压电路	266
7.6.1 串联开关型稳压电路	267
7.6.2 并联开关型稳压电路	270
本章小结	271
习题	272
第八章 电子信息系统中常用放大电路	276
8.1 预处理放大电路	276
8.1.1 仪表用放大器	276
8.1.2 电荷放大器	278
8.1.3 隔离放大器	279
8.1.4 放大电路中的干扰和噪声及其抑制措施	281
8.2 信号转换电路	282
8.2.1 电压—电流转换电路	282
8.2.2 精密整流电路	283
8.2.3 电压—频率转换电路	285
8.3 功率放大电路	289
8.3.1 变压器耦合功率放大电路	289
8.3.2 无输出变压器的功率放大电路	289
8.3.3 无输出电容的功率放大电路	290
8.3.4 桥式推挽功率放大电路	290
8.3.5 输出电压与输出电流的扩展电路	291
8.4 集成功率放大电路	292

8.4.1 集成功率放大电路分析	292
8.4.2 集成功率放大电路的主要性能指标	294
8.4.3 集成功率放大电路的应用	295
8.5 锁相环及其在信号转换电路中的应用	297
8.5.1 锁相环的组成和工作原理	297
8.5.2 锁相环用于调制和解调电路	301
8.5.3 锁相环用于频率合成电路	303
本章小结	305
习题	306
附录 A 晶体管的 h 参数等效模型	308
附录 B Multisim 2001 简介	311
B.1 Multisim 的工具栏	312
B.2 电路原理图的输入	312
B.3 Multisim 中的仪器	315
B.4 电路仿真的分析工具	317
B.5 元器件的模型库	317
附录 C 模拟电子技术基础符号说明	319

第一章 常用半导体器件

引言 电子技术是研究电子器件及其应用电路的科学技术。半导体器件是构成现代电子电路的基本元件，因其体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛应用。电子器件在经历了第一代电子管，第二代半导体器件，第三代集成电路后，现已进入大规模、超大规模时代。半导体二极管、三极管是最基本的电子元器件，也是集成电路的最小组成单元。

本章首先讲述半导体的基本知识和半导体器件的核心——PN 结的形成及特性，重点讨论半导体二极管、三极管（双极型晶体管 BJT）、场效应管（单极型晶体管 FET）的物理结构、工作原理、伏安特性、主要参数及二极管等效电路，并对稳压二极管、变容二极管、发光二极管、光电二极管、光电三极管、单结晶体管和晶闸管等器件的特性与应用也作了简要介绍。

1.1 半导体基本知识

1.1.1 本征半导体

1. 半导体材料

按导电能力的不同，物质分为导体、半导体和绝缘体。金、银、铜、铝等金属材料都是良导体，电阻率在 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间；云母、塑料、陶瓷、橡胶等绝缘物质的电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上；半导体的电阻率一般在 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。常用的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等。

半导体具有一些特殊的性质，当半导体受到光照和热辐射时，或在纯净的半导体中掺入微量特定元素（称为杂质）后，它的导电能力明显提高。即半导体具有光敏特性、热敏特性和掺杂特性。一些半导体材料还具有压敏特性、气敏特性等。利用半导体的这些特性可以制造出具有不同性能的半导体器件。

2. 本征半导体的晶体结构

化学成分纯净的半导体称为**本征半导体**，有多晶体和单晶体之分，一般制造半导体器件使用的是半导体单晶体。

硅和锗都是四价元素，外层都有四个价电子，其原子结构可用简化模型表示，如图 1.1.1(a)所示。在本征硅（锗）的晶体中，硅（锗）原子按一定规律整齐排列，每个原子都与周围四个原子等距离，形成空间点阵，如图 1.1.1(b)所示。

由于原子间的距离很近，价电子不仅受到所属原子核的作用，还受到相邻原子核的吸引，原来属于某一原子的一个价电子为相邻的两个原子所共有，使价电子以共用电子

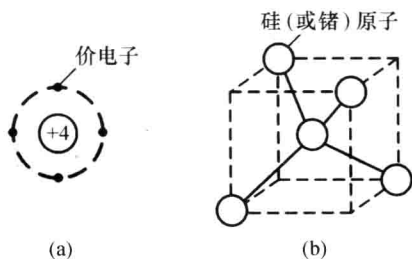


图 1.1.1 硅和锗原子结构简化模型及晶体中原子的空间排列

(a) 硅和锗原子结构简化模型；(b) 晶体中原子的空间排列。

对的方式达到外层电子数为 8 的稳定结构。晶体的这种结构称为**共价键结构**，图 1.1.2 为其平面示意图。

3. 本征半导体中的两种载流子

在热力学温度零度（0K）且无外界激发能量时，半导体中没有自由电子。当温度升高或受到光的照射时，价电子获得激活能（硅的激活能 $E_g = 1.1\text{eV}$ ，锗的激活能 $E_g = 0.68\text{eV}$ ）而挣脱原子核的束缚成为**自由电子**。这种现象称为**本征激发**（也称**热激发**）。自由电子产生的同时，在其原来的共价键中出现一个空位，称为**空穴**。原子因失掉一个价电子而带一个电子电荷量的正电，或者说空穴带正电。自由电子和空穴是成对出现的，称为**电子空穴对**。自由电子在运动过程中如果与空穴相遇就会填补空穴，使两者的正、负电性同时消失，这种现象称为**复合**。本征激发与复合的过程如图 1.1.3 所示。

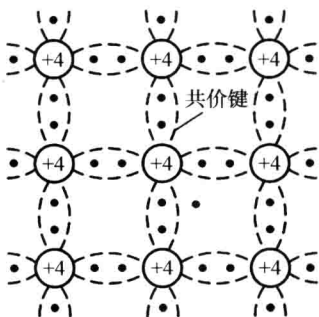


图 1.1.2 共价键结构平面示意图

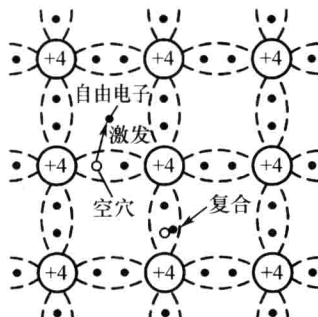


图 1.1.3 本征激发与复合的过程

自由电子是带负电荷并能参与导电的粒子。在外加电场作用下，自由电子产生逆着电场方向的运动。同时，半导体中还会出现相邻原子的价电子填补空穴的运动，但这不同于自由电子在晶格中的运动，而虚拟为带正电荷的空穴顺着电场方向的运动。这样，把空穴看做是带正电荷的导电粒子。把参与导电的粒子称为**载流子**。因此本征半导体中就存在两种载流子：带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。由于两者成对出现，电荷量相等，极性相反，所以本征半导体呈电中性。在外电场作用下，半导体中的电流是两种载流子向相反方向运动产生的电流之和。

在本征半导体中，本征激发与复合是不断进行的，在一定的温度下达到**动态平衡**，即单位时间内载流子的产生与复合数量相等。此时，半导体中自由电子和空穴的浓度将

保持一定数值。载流子的浓度与温度有关，温度升高，本征激发增强，载流子的产生与复合达到新的动态平衡，载流子的浓度稳定在较高数值。

理论分析表明，在常温下，即 $T=300\text{K}$ 时，硅材料的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ (n_i —自由电子浓度、 p_i —空穴浓度)，锗材料的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 2.38 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ 。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量特定杂质元素，它的导电性能就会发生显著变化；控制掺入杂质元素的浓度，就可控制它的导电性能。掺入微量杂质后，半导体的晶体结构不变，在晶体点阵的某些位置上，半导体原子被杂质原子所取代。掺入杂质的半导体称为**杂质半导体**。按掺入杂质元素的不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入五价杂质元素（如磷），可形成 **N 型半导体**，也称**电子型半导体**。N 型半导体内部结构示意图如图 1.1.4 所示。杂质原子的五个价电子中只有四个能与相邻的四个半导体原子中的价电子形成共价键，多余的一个价电子由于无共价键束缚，在常温下因本征激发就可成为自由电子。有多少个杂质原子，就产生多少个自由电子。同时，N 型半导体中还有本征激发产生的电子空穴对。由于掺杂浓度一般大于本征激发载流子浓度六个数量级，所以 N 型半导体中，自由电子的浓度大于空穴的浓度，故称自由电子为多数载流子，简称多子，空穴为少数载流子，简称少子。

由于五价杂质原子可以提供自由电子，故称之为**施主原子**。N 型半导体中的正电荷量（由施主离子和本征激发的空穴所带）与负电荷量（由施主原子提供的和本征激发产生的自由电子所带）相等，故 N 型半导体呈电中性。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质元素（如硼），可形成 **P 型半导体**，也称**空穴型半导体**。P 型半导体内部结构示意图如图 1.1.5 所示。由于杂质原子只有三个价电子，它与周围晶体原子组成共价键时，因缺少一个电子而在共价键中产生一个空位（空位呈电中性）。相邻共价键上的电子由于热运动，就有可能填补这个空位，使杂质原子成为不能移动的负离子，同时，在相邻共价键中产生一个空穴。因而，P 型半导体呈电中性，且空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子。因杂质原子中形成共价键时形成的空位吸收电子，故称之为**受主原子**。

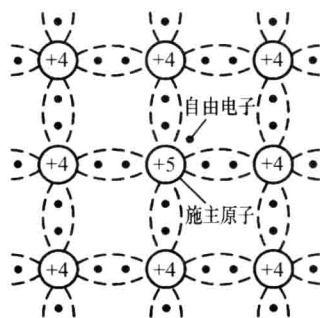


图 1.1.4 N 型半导体

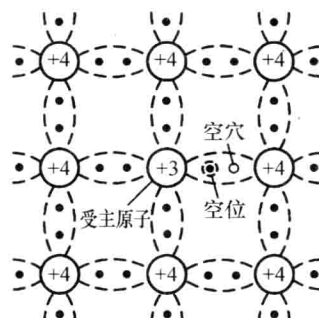


图 1.1.5 P 型半导体

本征半导体掺入杂质后，多数载流子的浓度增加，从而使多子与少子复合的机会增多。可以认为，多子的浓度约等于所掺杂质原子的浓度。例如，本征硅的原子浓度约为 $4.96 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ ，掺入百万分之一的磷原子，若每个施主原子能产生一个自由电子，则 N 型半导体中的自由电子浓度约为 $4.96 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。而在室温条件下，本征激发产生的自由电子和空穴的浓度只有 $1.43 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。可见，即使在半导体中掺入微量杂质，载流子的浓度也会显著增加，从而使导电能力大大提高。

五价杂质原子失去电子后成为不能移动的正离子，称为**施主离子**。三价杂质原子吸收电子后成为不能移动的负离子，称为**受主离子**。杂质原子的符号如图 1.1.6 所示。

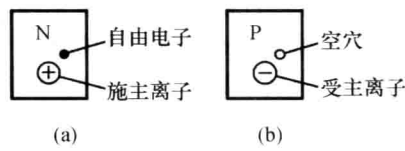


图 1.1.6 杂质原子符号
(a) 五价杂质原子；(b) 三价杂质原子。

1.1.3 PN 结及其特性

1. PN 结的形成

在一块 P 型（或 N 型）半导体中，用杂质补偿的方法将其中的一部分转换为 N 型（或 P 型），则两种半导体交界处极薄的区域就形成了 PN 结，如图 1.1.7(b)所示。

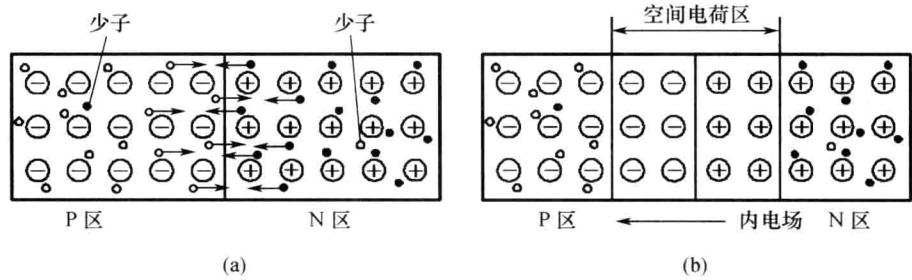


图 1.1.7 PN 结的形成
(a) 多数载流子的扩散；(b) 平衡状态下的 PN 结。

由于两种半导体中自由电子和空穴的浓度不相同，P 区的多子空穴的浓度大大高于 N 区少子空穴的浓度，而 N 区的多子自由电子的浓度大大高于 P 区的少子自由电子的浓度。由于存在载流子的浓度差，载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域运动，这种运动称为**扩散运动**。因此，P 区的多子空穴向 N 区扩散，N 区的多子自由电子向 P 区扩散。由于扩散到 N 区的空穴与自由电子复合，而扩散到 P 区的自由电子与空穴复合，所以在交界面附近，P 区出现不能移动的负离子（受主离子）区，N 区出现不能移动的正离子（施主离子）区，称为**空间电荷区**。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，所以空间电荷区又叫**耗尽层**。空间电荷区中的正负离子形成从 N 区指向 P 区的电场，这个电场是由载流子扩散运动形成，而不是外加

的，故称为内电场。

内电场的出现对多数载流子的扩散产生阻碍作用，好像一个壁垒，因而又将空间电荷区称为**阻挡层**和**势垒区**。另一方面，半导体中还存在少数载流子，内电场将使少数载流子产生与扩散运动方向相反的**漂移运动**，即 P 区的少子自由电子向 N 区漂移，N 区的少子空穴向 P 区漂移。扩散运动使空间电荷区变宽，内电场增强，内电场的增强又阻碍扩散而对漂移运动有利，使空间电荷区变窄。最终，扩散电流等于漂移电流，两种运动达到动态平衡，空间电荷区具有一定的宽度，PN 结形成。PN 结内，正、负电荷的电量相等。因此，当 P 区与 N 区杂质浓度相等时，负离子区与正离子区的宽度也相等，称为**对称结**；而两边杂质浓度不同时，浓度高一侧的离子区宽度低于浓度低的一侧，称为**不对称 PN 结**。两种 PN 结的外部特性是相同的。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结的两端外加电压，将破坏原来的平衡状态，扩散电流不再等于漂移电流，PN 结将有电流流过。当外加电压极性不同时，其导电能力有显著差异，即呈现出单向导电性。

1) PN 结加正向电压时的导电情况

若外加电压使 P 区的电位高于 N 区，称所加电压为正向电压。此时，PN 结为**正向偏置**状态，简称**正偏**，如图 1.1.8 所示。

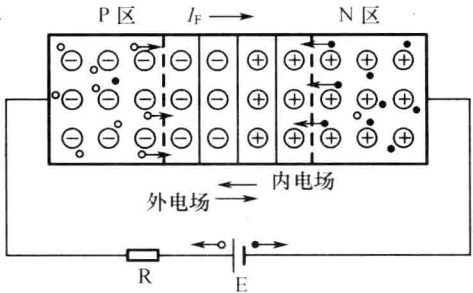


图 1.1.8 PN 结加正向电压时导通

因为 PN 结内几乎没有载流子，其电阻比 P 区和 N 区大得多，所以除了在限流电阻 R 上的电压降，外加电压将在 PN 结上产生外电场，外电场的方向与内电场相反。外电场将 P 区和 N 区的多数载流子推向空间电荷区，使其变窄，则内电场强度削弱，从而破坏了扩散与漂移的动态平衡，多子的扩散运动增强，少子的漂移运动减弱。P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的自由电子向 P 区扩散，由于电源的作用，扩散运动连续进行，形成较大的从 P 区流向 N 区的正向电流 I_F ，PN 结呈低阻，称之为**导通**。PN 结导通时的结压降只有零点几伏，因而应在它所在的回路中串联一个限流电阻，以防止 PN 结因正向电流过大而损坏。由少数载流子形成的漂移电流的方向与扩散电流相反，和正向电流相比较，其值很小，可忽略不计。

2) PN 结加反向电压时的导电情况

若外加电压使 P 区的电位低于 N 区，称所加电压为反向电压。此时，PN 结为**反向偏置**状态，简称**反偏**，如图 1.1.9 所示。

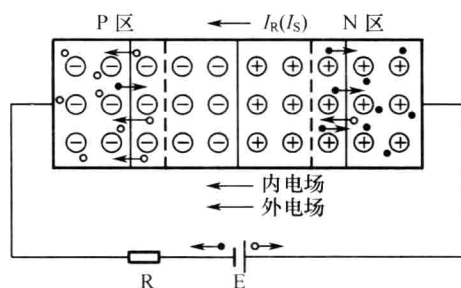


图 1.1.9 PN 结加反向电压时截止

外加的反向电压在 PN 结上产生外电场，方向与内电场相同。在外电场作用下，P 区的空穴和 N 区的自由电子将远离 PN 结，使空间电荷区变宽，内电场增强，阻止多子的扩散运动，而加剧少子的漂移运动。在电源作用下，形成从 N 区流向 P 区连续的反向电流 I_R 。由于少子的数目极少，即使所有的少子都参与漂移运动，反向电流也非常小，所以 PN 结呈高阻，称之为**截止**。反向电流基本上不随外加电压增大而增加，这一电流叫**反向饱和电流**，记作 I_S 。反向电流是由本征激发产生的少数载流子形成，因而受温度的影响很大。

由理论分析可知，PN 结所加端电压 u 与流过它的电流 i 的关系

$$i = I_S(e^{u/U_T} - 1) \quad (1.1.1)$$

式中， I_S 为反向饱和电流， $U_T = kT/q$ ，叫做**温度电压当量**，其中， k 为玻耳兹曼常数， T 为热力学温度， q 为电子的电量。常温下，即 $T=300\text{K}$ 时， $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

3. PN 结的电容效应

PN 结除了具有单向导电性外，还有电容效应。

1) 势垒电容

PN 结内缺少导电的载流子，导电率很低，相当于介质；两侧的 P 区和 N 区的导电率相对比较高，相当于金属板；而 PN 结内不能移动的正、负离子相当于存储的电荷。当 PN 结外加反向电压变化时，空间电荷区的宽度随之变化，即存储的电荷量随外加电压增多或减少，这种现象与电容器的充、放电过程相同，可用**势垒电容** C_B 来等效。当 PN 结加反向电压时， C_B 明显随电压的变化而变化，利用这一特性可制成变容二极管。

2) 扩散电容

当 PN 结未加电压时，载流子的扩散运动和漂移运动达到动态平衡，此时的少数载流子称为**平衡少子**。当 PN 结处于正向偏置时，从 P 区扩散到 N 区的空穴和从 N 区扩散到 P 区的自由电子均称为**非平衡少子**。PN 结正偏时，为了形成扩散电流，扩散到对方的非平衡少子必须有浓度差，在结的边缘处浓度大，离结远的地方浓度小。当正向电压增大时，非平衡少子增加，载流子的积累增多，浓度梯度增大，反之则积累减少。积累在 P 区的电子与 N 区的空穴随外加电压而变化的情况，用**扩散电容** C_D 来等效。

PN 结的结电容 C_j 为势垒电容和扩散电容之和，即

$$C_j = C_B + C_D \quad (1.1.2)$$