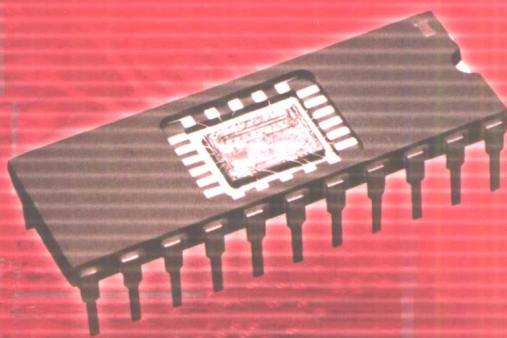


21 世纪

高等学校电子信息类系列教材

模拟电子技术基础

■ 孙肖子 张企民 编著



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

★ 21 世纪高等学校电子信息类系列教材

模拟电子技术基础

孙肖子 张企民 编著

西安电子科技大学出版社

2001

内 容 简 介

本书共分九章,主要内容为:半导体二极管及基本电路;双极型晶体管及基本电路;场效应管及基本电路;集成运算放大器电路;频率响应;反馈;模拟集成电路系统;现代模拟集成电路技术;功率电路及系统等。书中习题丰富,每章末有小结,并提供了以 Pspice 9.2 和 Electronic Workbench 为主要平台的虚拟实验练习。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程、生物医学工程、测控工程及仪器、自动化、电气工程、电子科学与技术等有关专业本、专科生“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/孙肖子等编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2001.1

21 世纪高等学校电子信息类系列教材

ISBN 7-5606-0981-3

I. 模... II. 孙... III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 85785 号

责任编辑 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828

邮 编 710071

http: //www. xduph. com

E-mail: xdupfxb@pub. xaonline. com

经 销 新华书店

印 刷 西安长青印刷厂

版 次 2001 年 1 月第 1 版

2001 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 21.25

字 数 499 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 22.00 元

ISBN 7-5606-0981-3/TN·0171

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前言

教材改革是教育改革的重要内容,重编电工电子系列课程教材要为实现下述目标而付出不懈的努力:

从电子信息学科发展的态势出发,适应“学科突出集成”和“学科互相渗透”的大趋势,突出“发展学术优势”和“强化工程实践”两条主线,站在知识、能力和素质三维空间中构建电工电子系列课程体系和优化教学内容,增强学生的自主学习、创新意识和工程实践能力。

“模拟电子技术基础”是一门重要的电子信息类专业技术基础平台课程,虽然数字化是当今技术转移的重点,但基本器件和基本电路仍是电子技术的基础,它们在电子设备中也具有不可替代的作用。

模拟集成电路的设计在近年来有了长足的进步。计算机仿真工具和模型库的不断完善,模拟电路硬件描述语言的出现,为模拟电路的自动化设计开辟了新的道路。作者在编写本书时作了如下考虑:基础更扎实些,思路更开阔些,分析方法更简洁些、先进些,设计性和综合性更加强些,启发性和创新性更突出些。与作者过去所编的教材相比较,本书有如下不同点:

- 器件与电路的结合更为紧密。
- 将集成运算放大器电路的内容提前,便于后续各章更多地涉及集成电路的内容,以加强集成电路在全书中的比重。
- 引入了计算机仿真与虚拟实验。
- 强调晶体管和场效应管特性最本质的表述——电流方程,突出跨导 g_m 的概念,并将晶体管和场效应管放大器参数表达式统一起来。
- 在“频率响应”一章中,着重加强频率失真和频率响应的概念,减少了波特图画法的内容和一些繁杂的计算和公式,扩展了改善频率响应的思路和方法。
- 在“反馈”一章中,将深反馈条件下分立元件和集成电路的分析方法统一起来。
- 在“模拟集成电路系统”一章中扩展了“有源滤波器”的内容,因为作者认为滤波器是最重要的一类模拟电路。将非理想运放带来的误差分析放到附录中供学生参考,而专门增加了“集成运算放大器选择指南”一节,从工程实际出发,引导学生正确选择和使用集成运算放大器芯片。
- 在“现代模拟集成电路技术”一章中,简要介绍了电流模法、开关电流电路、电流反馈式运放、跨导放大器和模拟可编程器件及开发软件平台等内容,以进一步拓宽学生的视野和想象力。
- 在“功率电路及系统”一章中,加强了开关稳压电源和能隙基准的原理和特点。
- 在附录中,介绍了集成电路工艺、波特图和非理想运放误差分析等内容。

本书是西安电子科技大学国家工科基础课程电工电子教学基地规划教材之一，作者以极大的热情编写了该书，期望能够为电子技术和线路课程教学内容的改革注入新意和活力。

本书第一、二、四章以及全部附录由张企民老师编写，第三、五、六、七、八、九章由孙肖子老师编写；江晓安教授审阅了全部书稿并提出了宝贵的修改意见；西安电子科技大学出版社云立实编辑担任本书的责任编辑，为本书的出版付出了许多努力。在此，对江晓安教授、云立实编辑以及所有帮助过我们的同志表示深深的敬意和感激。

由于时间和水平所限，本书仍存在许多问题和遗憾之处，望尊敬的老师、同学和广大读者批评指正。

编 者

2000年10月于西安

目 录

第一章 晶体二极管及其基本电路

1-1 半导体物理基础知识	1
1-1-1 本征半导体	1
1-1-2 杂质半导体	3
1-1-3 半导体中的电流	4
1-2 PN 结及晶体二极管	5
1-2-1 PN 结的形成	5
1-2-2 PN 结的单向导电特性	6
1-2-3 PN 结的击穿特性	8
1-2-4 PN 结的电容特性	8
1-2-5 PN 结的温度特性	9
1-3 晶体二极管及其基本电路	10
1-3-1 二极管特性曲线	10
1-3-2 二极管的主要参数	10
1-3-3 晶体二极管模型	12
1-3-4 二极管基本应用电路	13
1-3-5 稳压二极管及稳压电路	15
1-4 其它二极管简介	17
1-4-1 变容二极管	17
1-4-2 肖特基二极管	17
1-4-3 光电二极管	18
1-4-4 发光二极管	18
本章小结	18
习题	19
计算机仿真练习题	21

第二章 双极型晶体管及其放大电路

2-1 双极型晶体管的工作原理	22
2-1-1 放大状态下晶体管中载流子的传输过程	23

2-1-2	电流分配关系	24
2-1-3	晶体管的放大作用	25
2-2	晶体管伏安特性曲线及参数	25
2-2-1	晶体管共发射极特性曲线	26
2-2-2	晶体管的主要参数	28
2-3	晶体管工作状态分析及偏置电路	30
2-3-1	晶体管的直流模型	30
2-3-2	晶体管工作状态分析	31
2-3-3	放大状态下的偏置电路	33
2-4	放大器的组成及其性能指标	35
2-4-1	基本放大器的组成原则	36
2-4-2	直流通路和交流通路	37
2-4-3	放大器的主要性能指标	37
2-5	放大器图解分析法	40
2-5-1	直流图解分析	40
2-5-2	交流图解分析	41
2-5-3	直流工作点与放大器非线性失真的关系	43
2-6	放大器的交流等效电路分析法	44
2-6-1	晶体管交流小信号电路模型	44
2-6-2	共射极放大器的交流等效电路分析法	49
2-7	共集电极放大器和共基极放大器	54
2-7-1	共集电极放大器	54
2-7-2	共基极放大器	55
2-7-3	三种基本放大器性能比较	56
2-8	放大器的级联	57
2-8-1	级间耦合方式	58
2-8-2	级联放大器的性能指标计算	59
2-8-3	组合放大器	60
	本章小结	63
	习题	64
	计算机仿真练习题	72

第三章 场效应管及其基本电路

3-1	结型场效应管(JFET)	73
3-1-1	结型场效应管的结构及工作原理	73
3-1-2	结型场效应管的特性曲线	74
3-2	绝缘栅场效应管(IGFET)	76
3-2-1	绝缘栅场效应管的结构	76

3-2-2 N 沟道增强型 MOSFET(Enhancement NMOSFET)	77
3-2-3 N 沟道耗尽型 MOSFET(Depletion NMOSFET)	79
3-2-4 各种类型 MOS 管的符号及特性对比	80
3-3 场效应管的参数和小信号模型	81
3-3-1 场效应管的主要参数	81
3-3-2 场效应管的低频小信号模型	82
3-4 场效应管放大器	83
3-4-1 场效应管偏置电路	83
3-4-2 场效应管放大器分析	84
3-4-3 若干问题的讨论	88
本章小结	90
习题	91
计算机仿真练习题	93

第四章 集成运算放大器电路

4-1 集成运算放大器的特点	94
4-2 电流源电路	95
4-3 差动放大电路	100
4-3-1 零点漂移现象	100
4-3-2 差动放大器的工作原理及性能分析	100
4-3-3 具有恒流源的差动放大电路	104
4-3-4 差动放大器的传输特性	106
4-3-5 差动放大器的失调及温漂	108
4-4 集成运算放大器的输出级电路	111
4-5 集成运放电路举例	113
4-5-1 集成运算放大器 F007	113
4-5-2 专用型集成运算放大器简介	114
4-6 MOS 集成运算放大器	117
4-6-1 MOS 集成运放中的基本单元电路	117
4-6-2 CMOS 集成运算放大器 5G14573	121
4-7 集成运算放大器的主要性能指标	122
本章小结	124
习题	124
计算机仿真练习题	128

第五章 频率响应

5-1 频率响应的概念	129
5-1-1 频率失真及不失真条件	129
5-1-2 实际的频率响应及通频带定义	131
5-2 单级共射放大器的高频响应	132
5-2-1 晶体管的频率参数和高频等效电路	132
5-2-2 共射放大器的高频响应分析	133
5-3 共集电路的高频响应	139
5-4 共基电路的高频响应	140
5-5 差分放大器的频率响应	142
5-6 场效应管放大器的高频响应	143
5-6-1 场效应管的高频小信号等效电路	143
5-6-2 场效应管放大器的高频响应	144
5-7 放大器的低频响应	145
5-7-1 阻容耦合放大器的低频等效电路	145
5-7-2 阻容耦合放大器低频响应分析	146
5-8 多级放大器的频率响应	149
5-8-1 多级放大器的上限频率 f_H	149
5-8-2 多级放大器的下限频率 f_L	150
5-9 建立时间 t_r 与上限频率 f_H 的关系	151
5-9-1 建立时间 t_r 的定义	151
5-9-2 建立时间与上限频率的关系	151
5-10 举例及计算机仿真	152
本章小结	153
习题	153
计算机仿真练习题	156

第六章 反 馈

6-1 反馈的基本概念及基本方程	158
6-1-1 什么是反馈	158
6-1-2 反馈放大器的基本框图	158
6-1-3 反馈放大器的基本方程	159
6-2 负反馈对放大器性能的影响	160
6-2-1 负反馈使放大倍数稳定度提高	160
6-2-2 负反馈使放大器通频带展宽, 线性失真减小	162
6-2-3 负反馈使非线性失真减小, 输入动态范围展宽	163

6-2-4 负反馈可减小放大器内部产生的噪声和干扰的影响	164
6-3 反馈放大器分类及对输入、输出阻抗的影响	165
6-3-1 电压反馈与电流反馈	165
6-3-2 电压反馈和电流反馈对输出电阻的影响	165
6-3-3 串联反馈与并联反馈	167
6-3-4 串联反馈和并联反馈对放大器输入电阻的影响	168
6-4 反馈放大器的分析和近似计算	170
6-4-1 四种组态反馈放大器增益和反馈系数的定义及近似计算	170
6-4-2 集成运算放大器的两种基本反馈组态	171
6-4-3 分立元件负反馈放大器的分析计算	174
6-5 反馈放大器稳定性讨论	182
6-5-1 负反馈放大器稳定工作的条件	182
6-5-2 利用开环增益的波特图来判别放大器的稳定性	183
6-5-3 常用的消振方法——相位补偿法	184
6-6 运算放大器小信号闭环带宽、压摆率及全功率带宽	188
6-6-1 运算放大器的小信号闭环带宽	188
6-6-2 大信号工作下的压摆率和全功率带宽	188
本章小结	190
习题	190
计算机仿真练习题	196

第七章 模拟集成电路系统

7-1 集成运算放大器在基本运算中的应用	198
7-1-1 相加器	198
7-1-2 相减器(差动放大器)	200
7-1-3 积分器	201
7-1-4 微分器	203
7-1-5 对数、反对数运算器	204
7-1-6 V/I 变换和 I/V 变换	207
7-2 有源 RC 及开关电容滤波器	208
7-2-1 有源滤波器的类型、传递函数及零、极点分布	208
7-2-2 运放作为有限增益放大器的有源滤波器电路	210
7-2-3 运放作为无限增益放大器的多重反馈有源滤波器	211
7-2-4 有源带阻滤波器	213
7-2-5 全通滤波器	215
7-2-6 模拟电感电路	215
7-2-7 基于双积分环的二阶有源滤波器	216
7-2-8 开关电容网络	218

7-3 集成运算放大器精密二极管电路	221
7-3-1 精密整流(限幅)电路	221
7-3-2 峰值检波电路	222
7-3-3 取样保持电路	223
7-4 电压比较器及弛张振荡器	224
7-4-1 电压比较器	224
7-4-2 弛张振荡器	228
7-4-3 窗口比较器	231
7-5 模拟开关	233
7-5-1 CMOS 传输门和 CMOS 模拟开关	233
7-5-2 MOS 模拟开关的应用	234
7-6 集成运算放大器选择指南	235
本章小结	237
习题	238
计算机仿真练习题	245

第八章 现代模拟集成电路技术

8-1 模拟集成电路设计——电流模法	246
8-1-1 电流模法的特点及原理	246
8-1-2 跨导线性环——电流模电路举例	248
8-2 电流反馈型集成运算放大器	250
8-2-1 电流模集成运算放大器的基本特性	251
8-2-2 电流模运放的典型电路	251
8-2-3 电流模运放的闭环特性	252
8-3 开关电流——数字工艺的模拟集成技术	254
8-3-1 开关电流镜(Switched Current Mirror)	254
8-3-2 第一代开关电流积分器	255
8-3-3 第二代开关电流积分器	257
8-4 跨导运算放大器(OTA)及其应用	257
8-4-1 典型的单片集成 OTA 电路	257
8-4-2 OTA 组成的连续时间滤波器	259
8-5 在系统可编程模拟器件(ispPAC)原理及其软件平台	262
8-5-1 在系统可编程模拟电路的结构及原理	262
8-5-2 PAC - Designer 软件及开发实例	266
本章小结	270
习题及计算机仿真练习题	271

第九章 功率电路及系统

9-1 功率放大器	274
9-1-1 功率放大器的特点及工作状态分类	274
9-1-2 甲类(A类)功率放大器	275
9-1-3 互补跟随乙类(B类)功率放大器	277
9-1-4 集成功率放大器	281
9-2 整流器和直流稳压电源	283
9-2-1 整流滤波电路	283
9-2-2 串联反馈型线性稳压电源的工作原理	286
9-2-3 开关型稳压电源	289
9-3 功率器件	291
9-3-1 双极型大功率晶体管(BJT)	291
9-3-2 功率 MOS 器件	293
9-3-3 绝缘栅—双极型功率管(IGBT)及功率模块	294
9-3-4 功率管的保护	296
9-4 高精度基准电压源	296
9-4-1 能隙基准电压源	296
9-4-2 以埋层齐纳管为参考的超高精度基准电压源	297
本章小结	298
习题	299
计算机仿真练习题	302
附录 A 集成电路制造工艺	303
附录 B 波特(Bode)图	316
附录 C 集成运放非理想参数对电路性能的影响	323
参考文献	328

第一章 晶体二极管及其基本电路

晶体二极管是由PN结构成的一种最简单的半导体器件，在电子线路中有着广泛的应用。本章首先介绍半导体的基本导电机理、PN结及其特性，这部分内容是学习半导体器件的基础知识；接着讨论晶体二极管的特性、参数和简单应用电路；最后，简要介绍几种特殊二极管。

1-1 半导体物理基础知识

按导电性能的不同，物质可分为导体、绝缘体和半导体。目前用来制造电子器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，并且会随温度、光照或掺入某些杂质而发生显著变化。要理解这些特性，就必须从半导体的原子结构谈起。

1-1-1 本征半导体

硅和锗都是四价元素，其原子结构中最外层轨道上有四个价电子。由于半导体的导电性能与价电子密切相关，所以为了突出价电子的作用，我们采用图1-1所示的简化原子结构模型。图中圆圈内的数字，表示原子核为中和最外层电子应具有的正电荷数；虚线上的黑点表示电子。显然，该图是硅或锗原子的简化模型。

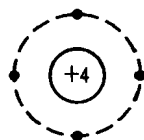


图 1-1 原子的简化模型

纯净的单晶半导体称为本征半导体。在本征硅和锗的单晶中，原子按一定间隔排列成有规律的空间点阵(称为晶格)。由于原子间相距很近，价电子不仅受到自身原子核的约束，还要受到相邻原子核的吸引，使得每个价电子为相邻原子所共有，从而形成共价键。这样四个价电子与相邻的四个原子中的价电子分别组成四对共价键，依靠共价键使晶体中的原子紧密地结合在一起。图1-2是单晶硅或锗的共价键结构平面示意图。共价键中的电子，由于受到其原子核的吸引，是不能在晶体中自由移动的，所以是束缚电子，不能参与导电。

一、半导体中的载流子——自由电子和空穴

在绝对零度(-273°C)时，所有价电子都被束缚在共价键内，晶体中没有自由电子，所以半导体不能导电。当温度升高时，键内电子因热激发而获得能量。其中获得能量较大的

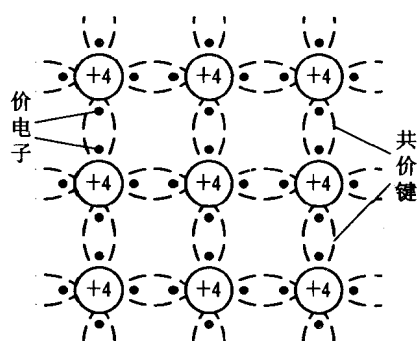


图 1-2 单晶硅和锗的共价键结构示意图

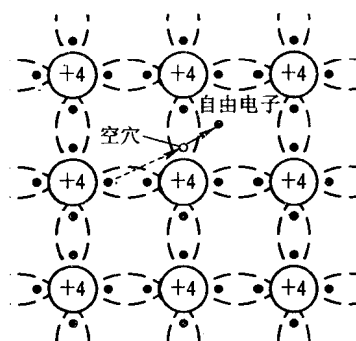


图 1-3 本征激发产生电子和空穴

一部分价电子，能够挣脱共价键的束缚离开原子而成为自由电子。与此同时在共价键内留下了与自由电子数目相同的空位，如图 1-3 所示。

下面来看这些空位的作用。由图 1-2 可知，完整的共价键，价电子数等于原子核的正电荷数，所以原子不显电性。现在空位处失去一个电子，使得该处所属原子核多出了一个未被抵消的正电荷，于是空位呈现出一个正电荷的电性。由于相邻共价键内的电子在正电荷的吸引下会填补这个空位，因而把空位又移到别处去。依此类推，空位便可在整个晶体内自由移动。当有电场作用时，价电子定向地填补空位，使空位作相反方向的移动，这与带正电荷的粒子作定向运动的效果完全相同。由此可见，空位既显一个电子电量的正电荷，又能在电场作用下作定向运动。因此，可以把空位视为一种带正电荷的粒子，并称之为空穴。这样由于热激发，在本征半导体中存在有两种极性的载流子：带负电荷的自由电子（简称为电子）和带正电荷的空穴。

本征半导体受外界能量（热能、电能和光能等）激发，同时产生电子、空穴对的过程，称为本征激发。

二、本征载流子浓度

在本征半导体中，由于本征激发，不断地产生电子、空穴对，使载流子浓度增加。与此同时，又会有相反的过程发生。由于正负电荷相吸引，因而，会使电子和空穴在运动过程中相遇。这时电子填入空位成为价电子，同时释放出相应的能量，从而消失一对电子、空穴，这一过程称为复合。显然，载流子浓度越大，复合的机会就越多。这样在一定温度下，当没有其它能量存在时，电子、空穴对的产生与复合最终会达到一种热平衡状态，使本征半导体中载流子的浓度一定。理论分析表明，本征载流子的浓度为

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

式中 n_i 、 p_i 分别表示电子和空穴的浓度 (cm^{-3})； T 为热力学温度 (K)； E_{G0} 为 $T=0$ K 时的禁带宽度 (硅为 1.21 eV，锗为 0.78 eV)； k 为玻尔兹曼常数 (8.63×10^{-6} V/K)； A_0 是与半导体材料有关的常数 (硅为 $3.87 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$ ，锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$)。

在 $T=300$ K 的室温下，由式 (1-1) 可求得本征硅 (锗) 的载流子浓度为 $1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ($2.38 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)，而硅 (锗) 的原子密度为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ($4.4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)。相比

之下可以看出，室温下只有极少数原子(对硅约为三万亿分之一)的价电子受激发产生电子、空穴对。因此，本征半导体的导电能力是很弱的。

由式(1-1)还可以看出，本征载流子浓度随温度升高近似按指数规律增大，所以其导电性能对温度的变化很敏感。

1-1-2 杂质半导体

在本征半导体中，有选择地掺入少量其它元素，会使其导电性能发生显著变化。这些少量元素统称为杂质。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。根据掺入的杂质不同，有N型半导体和P型半导体两种。

一、N型半导体

在本征硅(或锗)中掺入少量的五价元素，如磷、砷、锑等，就得到N型半导体。这时，杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的四个价电子和周围四个硅原子组成共价键，而多出一个价电子只能位于共价键之外，如图1-4所示。由于这个键外电子受杂质原子的束缚力很弱，所以只需很小的激发能便可挣脱杂质原子的束缚，成为自由电子。因此，室温下几乎全部的杂质原子都能提供一个自由电子，从而使N型半导体中的电子数大大增加。因为这种杂质原子能“施舍”出一个电子，所以称为施主原子(杂质)。

施主原子失去一个价电子后，便成为正离子。由于施主离子被束缚在晶格中，不能自由移动，所以不能参与导电。

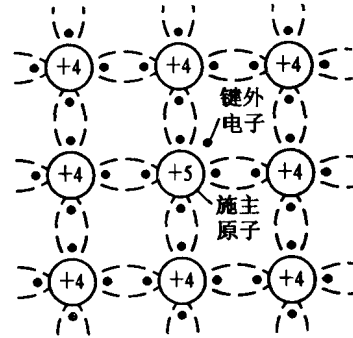


图1-4 N型半导体原子结构示意图

在杂质半导体中，本征激发依旧进行，产生电子、空穴对。但由于掺入施主杂质后电子数目大大增加，使得空穴与电子复合的机会也相应增多，从而使空穴浓度值远低于它的本征浓度值。因此，在N型半导体中，电子浓度远大于空穴浓度。由于电子占多数，故称它为多数载流子，简称多子；而空穴占少数，故称它为少数载流子，简称少子。因为N型半导体主要靠电子导电，所以又称为电子型半导体。

应当指出，在N型半导体中，虽然自由电子数远大于空穴数，但由于施主离子的存在，使正、负电荷数相等，即自由电子数等于空穴数加正离子数，所以整个半导体仍然是电中性的。

二、P型半导体

在本征硅(或锗)中掺入少量的三价元素，如硼、铝、镓等，就得到P型半导体。这时杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的三个价电子和相邻的四个硅原子组成共价键时，只有三个共价键是完整的，第四个共价键因缺少一个价电子而出现一个空位，如图1-5所示。由于空位的存在，使邻近共价键内的电子只需很小的激发能便能填补这个空位，使杂质原子因多一个价电子而成为负离子，同时在邻近产生一个空穴。由于这种杂质原子能

接受价电子, 所以称为受主原子(杂质)。在室温下, 几乎全部的受主原子都能接受一个价电子而成为负离子, 同时产生相同数目的空穴, 所以在 P 型半导体中, 空穴浓度大大增加。

与 N 型半导体中的情况相反, 在 P 型半导体中, 空穴浓度远大于电子浓度。空穴为多数载流子, 而电子为少数载流子。因 P 型半导体主要靠空穴导电, 所以又称为空穴型半导体。

在 P 型半导体中, 空穴数等于自由电子数加受主负离子数, 整个半导体也是电中性的。

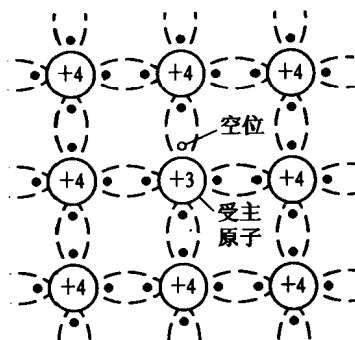


图 1-5 P 型半导体原子结构示意图

三、杂质半导体的载流子浓度

在以上两种杂质半导体中, 尽管掺入的杂质浓度很小, 但通常由杂质原子提供的载流子数却远大于本征载流子数。例如, 在室温下, 硅的本征载流子浓度 $n_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 硅的原子密度为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, 若掺入百万分之一的磷原子, 则施主杂质浓度为

$$N_D = 5 \times 10^{22} \times 10^{-6} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

可见, 由杂质提供的电子数比 n_i 大百万倍以上。因此, 在杂质半导体中, 多数载流子的浓度主要由掺杂浓度决定。具体而言, 对 N 型半导体, 电子浓度 n_n 近似等于施主浓度 N_D ; 对 P 型半导体, 空穴浓度 p_p 近似等于受主浓度 N_A 。

杂质半导体中的少数浓度, 因掺杂不同, 会随多子浓度的变化而变化。在热平衡下, 两者之间有如下关系: 多子浓度值与少数浓度值的乘积恒等于本征载流子浓度值 n_i 的平方。即对 N 型半导体, 多子 n_n 与少数 p_n 有

$$n_n \cdot p_n = n_i^2 \quad (1-2a)$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1-2b)$$

对 P 型半导体, 多子 p_p 与少数 n_p 有

$$p_p \cdot n_p = n_i^2 \quad (1-3a)$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \quad (1-3b)$$

由以上分析可知, 本征半导体通过掺杂, 可以大大改变半导体内载流子的浓度, 并使一种载流子多, 而另一种载流子少。对于多子, 通过控制掺杂浓度可严格控制其浓度, 而温度变化对其影响很小; 对于少数, 主要由本征激发决定, 因掺杂使其浓度大大减小, 但温度变化时, 由于 n_i 的变化, 会使少数浓度有明显变化。

1-1-3 半导体中的电流

了解了半导体中的载流子情况之后, 我们来讨论它的电流。在半导体中有两种电流。

一、漂移电流

在电场作用下, 半导体中的载流子作定向漂移运动形成的电流, 称为漂移电流。它类

似于金属导体中的传导电流。

半导体中有两种载流子——电子和空穴，当外加电场时，电子逆电场方向作定向运动，形成电子电流 I_n ，而空穴顺电场方向作定向运动，形成空穴电流 I_p 。虽然它们运动的方向相反，但是电子带负电，其电流方向与运动方向相反，所以 I_n 和 I_p 的方向是一致的，均为空穴流动的方向。因此，半导体中的总电流为两者之和，即

$$I = I_n + I_p$$

漂移电流的大小将由半导体中载流子浓度、迁移速度及外加电场的强度等因素决定。

二、扩散电流

在半导体中，因某种原因使载流子的浓度分布不均匀时，载流子会从浓度大的地方向浓度小的地方作扩散运动，从而形成扩散电流。

半导体中某处的扩散电流主要取决于该处载流子的浓度差(即浓度梯度)。浓度差越大，扩散电流越大，而与该处的浓度值无关。反映在浓度分布曲线上(见图 1-6)，即扩散电流正比于浓度分布线上某点处的斜率 $dn(x)/dx$ ($dp(x)/dx$)。例如，某半导体中载流子的分布如图 1-6 所示，图中 $n(x)$ 表示 x 处的电子浓度， $p(x)$ 表示 x 处的空穴浓度。由图中的分布曲线可知，该半导体的右端电子(空穴)浓度最大，沿 x 方向浓度按指数规律减小，最后趋向于平衡值 n_0 (p_0)。因此，该半导体中的扩散电流也有上述的变化规律，即沿 x 方向扩散电流逐渐减小，最后趋向于零。

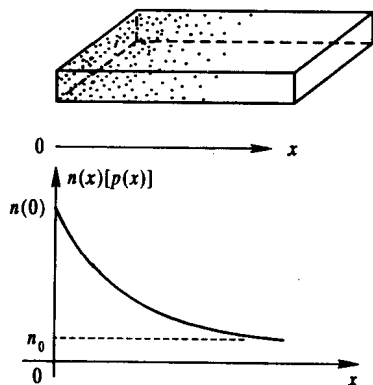


图 1-6 半导体中载流子的浓度分布

1-2 PN 结及晶体二极管

通过掺杂工艺，把本征硅(或锗)片的一边做成P型半导体，另一边做成N型半导体，这样在它们的交界面处会形成一个很薄的特殊物理层，称为PN结。PN结是构造半导体器件的基本单元。其中，最简单的晶体二极管就是由PN结构成的。因此，讨论PN结的特性实际上就是讨论晶体二极管的特性。

1-2-1 PN 结的形成

P型半导体和N型半导体有机地结合在一起时，因为P区一侧空穴多，N区一侧电子多，所以在它们的界面处存在空穴和电子的浓度差。于是P区中的空穴会向N区扩散，并在N区被电子复合。而N区中的电子也会向P区扩散，并在P区被空穴复合。这样在P区和N区分别留下了不能移动的受主负离子和施主正离子。上述过程如图 1-7(a)所示。结果在界面的两侧形成了由等量正、负离子组成的空间电荷区，如图 1-7(b)所示。

由于空间电荷区的出现，在界面处产生了内建电位差 U_B ，形成一个方向由N区指向P区的内电场。该电场一方面会阻止多子的扩散，另一方面会引起少子的漂移，即P区中的电子向N区漂移，N区中的空穴向P区漂移。少子漂移的结果会使界面两侧的正、负离子