

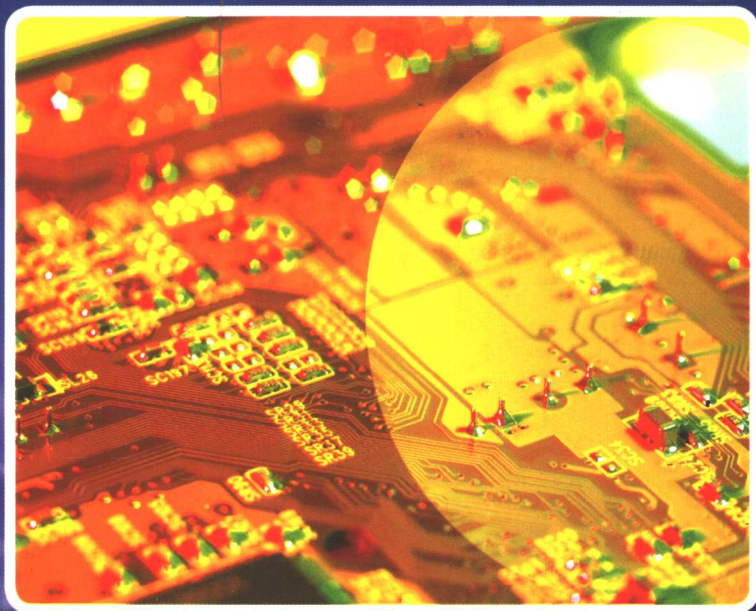
高等学校教材

低频电子线路

第二版

傅丰林 主编

傅丰林 陈 健 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

TN722.1/16

2008

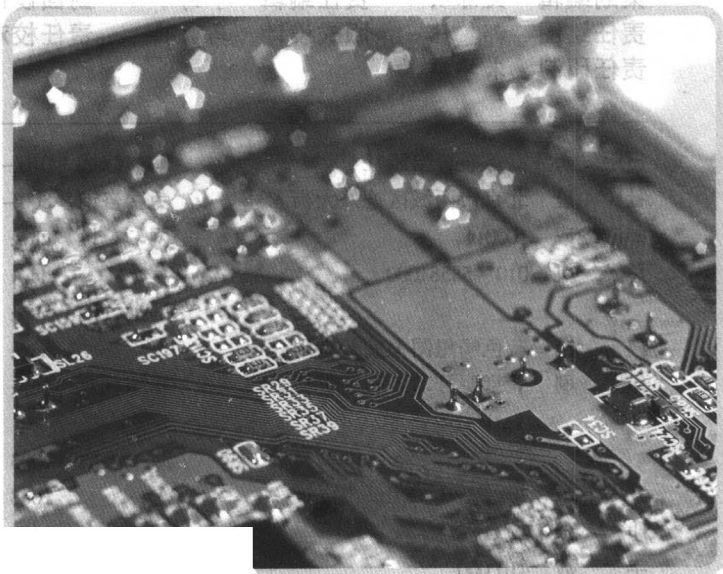
高等学校教材

低频电子线路

第二版

傅丰林 主编

傅丰林 陈 健 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材《低频电子线路》的修订版,也是西安电子科技大学国家精品课程“模拟电子线路基础”的配套教材。本书内容包括二极管及电路、双极晶体管和场效应晶体管、放大器基础、放大器的频率特性、负反馈放大器、低频功率放大器、模拟集成电路原理及应用、直流稳压电源等。本书突出模拟集成电路,增加了电流模集成运算放大器,删减了分立元件电路的内容,引入了计算机辅助分析进行电路模拟。书中附有大量的例题、思考题和习题。

本书可作为高等学校电子信息类或相近专业技术基础课教材或教学参考书,也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

低频电子线路/傅丰林主编;傅丰林,陈健编. —2版.
北京:高等教育出版社,2008.1
ISBN 978-7-04-023011-6

I. 低… II. ①傅…②傅…③陈… III. 低频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第195859号

策划编辑	吴陈滨	责任编辑	李葛平	封面设计	赵阳
责任绘图	郝林	版式设计	马敬茹	责任校对	杨雪莲
责任印制	朱学忠				

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网址	http://www.hep.edu.cn
总机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印刷	北京明月印务有限责任公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开本	787×960 1/16	版次	2003年12月第1版
印张	22.25		2008年1月第2版
字数	410 000	印次	2008年1月第1次印刷
		定价	25.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23011-00

第二版前言

本书是西安电子科技大学国家精品课程“模拟电子线路基础”的配套教材。本书自2003年出版以来,已经过几届学生的使用。作者在广泛听取教师和学生使用意见的基础上,对第一版教材作了较大的修改。对要求过高的内容作了删减,对重点、难点问题作了比较详尽的阐述。如删去了第1章半导体器件中对晶体管厄立效应的解释;强化了有源负载的概念及电路构成、有源负载放大器的小信号分析;增加了共基和共集放大器、组合放大器高频特性分析,阐述了展宽通频带的思路和方法;增加了反馈类型的判别方法,进一步阐明了直通效应和负载效应的概念;强调了差模信号和共模信号的概念以及差分放大器基本性能的分析方法,着重阐述了提高共模抑制比的方法。增加了许多例题,更加可读易懂。

本书体系与第一版相同,按不少于60学时教学时数编写。本书涉及内容丰富,概念很多,要求学生建立工程观点、学会工程建设分析的方法,实施起来一定困难不少。编者建议采用现代教学手段与传统教学方法相结合,改变以往单一的教学模式。使用者可以制作多媒体课件(高等教育出版社已出版了本书第一版的电子教案,可供参考),利用多媒体教学形象生动、图文并茂、色彩鲜艳和课堂信息量大等特点,通过视觉和听觉,全方位地帮助学生加深对问题的理解和记忆,启迪学生思维,提高教学和学习效率。同时力求克服其局限性,实行多媒体教学与课堂板书的有机结合,留时间给学生记笔记,特别是让学生有进行思考的时间,避免现代“填鸭式”,保持传统教学方法中板书规范美观、语言表达优美、师生交流融洽等优点。

还需指出,“低频电子线路”是一门实践性很强的课程,必须重视实践、重视实验,贯彻理论联系实际的原则,只有这样才能对低频电子线路的基本概念、基本工作原理和基本分析方法理解透彻。

本书由傅丰林主编并负责统稿,陈健编写了第1章、第3章和第4章。

本书由西北工业大学段哲民教授负责审阅,段教授认真仔细地审阅了全稿,提出了很多宝贵的修改意见,在此表示诚挚的感谢。

本课程网址是:<http://ste.xidian.edu.cn/modian/frame.htm>,欢迎读者上网

浏览。

尽管编者已对本书作了改进,但一定还存在很多不足,恳请广大读者提出批评和指教。

编 者

2007 年 8 月 28 日于西安

第一版前言

本书是教育部“十五”规划教材,是在西安电子科技大学通信工程学院各专业多年试用的教材的基础上编写而成的。

全书共分7章。第1章半导体器件,介绍半导体物理的基础知识,PN结的构成,二极管特性、参数和电路;双极晶体管的基本工作原理、特性和主要参数;结型和绝缘栅场效应晶体管的基本工作原理、特性和主要参数。第2章放大器基础,介绍了双极晶体管放大器和场效应管放大器,着重介绍集成电路中最常用的基本单元电路,包括电流源偏置电路,有源负载放大器等,阐明了放大器的基本分析方法:图解法和等效电路法。本章还分析了基本单元电路的主要性能指标,充实了MOS集成单元电路内容,并分析了基调效应的影响。第3章放大器的频率响应,介绍了线性失真的基本概念和单级放大器的频率特性工程计算方法。同时给出了多级放大器频率响应的计算方法。第4章负反馈放大器,介绍4种类型负反馈放大器及其判别方法,提出了工程上估算的方法,用波特图对反馈放大器进行稳定性分析。第5章低频功率放大器,着重介绍互补推挽功率放大器的工作原理及其计算方法。增加了音频丁类功率放大器。第6章模拟集成电路原理及应用,介绍组成集成运算放大器的差分放大器等单元电路、集成运算放大器的基本组态和基本应用以及可编程模拟集成电路,增加了在高速宽带中应用十分广泛的电流模集成运算放大器及其应用电路,此外还介绍了模拟乘法器等内容。第7章直流稳压电源,主要介绍桥式整流滤波、三端稳压器和开关电源。

总之,本书主要研究双极晶体管和场效应晶体管所构成的电子线路原理、分析和计算的方法,并着重讨论在集成电路中要用到的基本概念、基本原理、基本单元电路、基本分析方法以及模拟集成电路的基本应用。作者充分注意到电子线路这门课程国内外发展的状况,删繁就简,更新内容,加强基本概念,增加了许多例题,并附有大量思考题与习题,注重工程计算,同时引入了计算机辅助分析方法,力求使全书内容的深度和广度能满足工科电子信息类或相近专业的教学需要,也希望能对广大电子工程技术人员有所裨益。使用本书时,读者应具备物理、电路理论等基础知识,实施中可根据教学要求加以取舍。

本书由傅丰林主编、统稿;陈健编写了第1章、第3章、第4章。

本书由西安交通大学杨栓科教授负责审阅。杨教授认真、仔细地审阅了全

稿,提出了很多宝贵的修改意见,在此表示诚挚的感谢。

在编写过程中还得到了王平的许多帮助,深表感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,本书难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

2003 年 7 月

目 录

第 1 章 半导体器件

1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 载流子的运动方式及形成的电流	4
1.2 PN 结与二极管	5
1.2.1 PN 结的基本原理	5
1.2.2 二极管	9
1.2.3 二极管应用电路举例	16
1.3 特殊二极管	18
1.3.1 稳压二极管	18
1.3.2 光电二极管	19
1.3.3 发光二极管	20
1.3.4 变容二极管	21
1.4 晶体三极管	22
1.4.1 晶体管的结构与符号	22
1.4.2 晶体管的工作状态	22
1.4.3 晶体管的放大原理	23
1.4.4 晶体管特性曲线	25
1.4.5 晶体管的主要参数	28
1.5 场效应晶体管	30
1.5.1 结型场效应晶体管(JFET——Junction Field Effect Transistor)	30
1.5.2 绝缘栅场效应晶体管(IGFET——Isolated Gate Field Effect Transistor)	34
1.5.3 场效应晶体管工作状态的分析和	41

1.5.4 JFET 和 IGFET 的比较	42
1.5.5 场效应晶体管的参数及特点	42
思考题与习题	45

第 2 章 放大器基础

2.1 放大器概述	50
2.1.1 放大器的用途与分类	50
2.1.2 放大器的基本组成	51
2.1.3 放大器类型	52
2.1.4 放大器主要性能指标	52
2.1.5 放大器的传输特性	57
2.2 放大器基本分析方法	58
2.2.1 静态分析	58
2.2.2 动态分析	61
2.3 晶体管偏置电路	68
2.3.1 分压式偏置电路	68
2.3.2 电流源偏置电路	69
2.4 晶体管放大器的三种基本组态	74
2.4.1 共射(CE)放大电路	74
2.4.2 共基(CB)放大电路	75
2.4.3 共集(CC)放大电路	76
2.4.4 三种放大电路性能比较	78
2.4.5 射极带有电阻的共射放大器	79
2.4.6 举例	80
2.5 场效应晶体管放大器	83
2.5.1 直流偏置电路与静态分析	83
2.5.2 动态分析	85
2.6 有源负载放大器	90
2.6.1 什么是有源负载	90
2.6.2 构成有源负载的电路	90
2.6.3 有源负载双极晶体管放大器小信号分析	92
2.6.4 场效应晶体管有源负载放大器	93
2.7 多级放大器	96

2.7.1 耦合方式	96
2.7.2 组合放大器	98
2.7.3 多级放大器性能指标的计算	99
2.8 放大器的表示法	105
思考题与习题	107

第 3 章 放大器的频率特性

3.1 线性失真及其分析方法	115
3.1.1 线性失真	115
3.1.2 分析方法	118
3.2 单级放大器的频率响应	123
3.2.1 晶体管高频混合 π 型等效电路	124
3.2.2 频率响应分析	127
3.2.3 晶体管的高频参数	133
3.2.4 场效应晶体管放大器的频率响应	135
3.3 多级放大器的频率响应	137
3.3.1 幅频特性和相频特性	137
3.3.2 多级放大器的通频带	138
3.4 放大器的阶跃响应	141
3.4.1 阶跃响应的指标	142
3.4.2 单级放大器的阶跃响应	143
3.4.3 多级放大器的阶跃响应	144
思考题与习题	146

第 4 章 负反馈放大器

4.1 负反馈的基本概念	149
4.1.1 什么是负反馈	149
4.1.2 负反馈放大器的基本类型	150
4.2 负反馈对放大器性能的影响	153
4.2.1 提高了放大倍数的稳定性	153
4.2.2 展宽了通频带	155
4.2.3 减小了非线性失真	157

4.2.4 抑制了内部噪声和干扰	157
4.2.5 对输入电阻的影响	158
4.2.6 对输出电阻的影响	159
4.3 反馈的判别及引入	161
4.3.1 反馈类型的判别	161
4.3.2 如何根据需要引入负反馈	165
4.4 负反馈放大器的分析方法	166
4.4.1 方框图分析法	166
4.4.2 近似计算方法	169
4.4.3 计算机辅助分析法	173
4.5 反馈放大器的稳定性	174
4.5.1 反馈放大器的稳定判据	175
4.5.2 反馈放大器的稳定裕度	175
4.5.3 相位补偿技术	178
思考题与习题	182

第 5 章 低频功率放大器

5.1 概述	189
5.1.1 功率放大器的主要指标	189
5.1.2 功率放大器的分类	190
5.2 互补推挽功率放大器	191
5.2.1 乙类推挽功率放大器的工作原理	191
5.2.2 乙类推挽功率放大器的分析计算	192
5.2.3 乙类推挽功率放大器的非线性失真	195
5.3 其他形式的功放电路	198
5.3.1 单电源供电的互补推挽电路	198
5.3.2 准互补推挽功率放大器	199
5.3.3 集成功放电路	200
5.3.4 丁类音频功率放大器	202
5.4 功率器件、散热及保护电路	207
5.4.1 功率器件	207
5.4.2 功放管的管耗与散热	208
5.4.3 保护电路	209

思考题与习题	210
--------------	-----

第 6 章 集成运算放大器原理及其应用

6.1 概述	213
6.2 直流信号的放大	215
6.2.1 级与级之间的直流工作状态互相影响	215
6.2.2 零点漂移	216
6.2.3 抑制零点漂移的方法	216
6.3 差分放大器	217
6.3.1 基本型差分放大器	217
6.3.2 改进电路——双电源长尾式差分放大器	223
6.3.3 减小共模输出电压提高共模抑制比的方法	227
6.3.4 有源负载差分放大器	229
6.3.5 差分放大器大信号输入时的传输特性	230
6.3.6 举例	234
6.3.7 差分放大器的失调和温漂	237
6.4 集成运算放大器典型电路介绍	239
6.4.1 双极型集成运算放大器 F741	239
6.4.2 MOS 集成运算放大器的组成	240
6.5 集成运算放大器的性能参数和模型	242
6.5.1 性能参数	242
6.5.2 模型	246
6.6 理想运放及其基本组态	247
6.6.1 理想集成运算放大器	247
6.6.2 集成运放的基本组态	248
6.7 集成运算放大器的应用	252
6.7.1 信号放大及检测电路	252
6.7.2 信号运算电路	257
6.7.3 信号处理电路	260
6.8 实际集成运放电路的误差分析	277
6.9 在系统可编程模拟器件 ispPAC	281
6.9.1 概述	281
6.9.2 在系统可编程模拟器件 ispPAC10 的电路结构	281

6.9.3 在系统可编程模拟器件 ispPAC10 的设计应用	283
6.10 单电源供电运放电路	287
6.11 电流模式运算放大器	289
6.11.1 电流模式电路的主要特点	290
6.11.2 跨导线性电路	290
6.11.3 电流反馈运算放大器	294
6.12 集成跨导放大器	301
6.13 模拟乘法器	305
6.13.1 双平衡模拟乘法器	306
6.13.2 线性化可变跨导型模拟乘法器	307
6.13.3 单片集成通用型乘法器	310
6.13.4 乘法器的应用举例	311
思考题与习题	312

第 7 章 直流稳压电源

7.1 整流与滤波	323
7.1.1 桥式整流电路	323
7.1.2 平滑滤波器	325
7.1.3 整流电路设计举例	326
7.2 线性集成稳压电路	328
7.2.1 稳压电路的主要性能指标	328
7.2.2 串联型晶体管稳压电路	328
7.2.3 线性集成稳压器	329
7.3 开关型稳压电源	336
思考题与习题	339
参考文献	341

第1章

半导体器件

本章简要介绍半导体的基础知识及二极管、晶体管、场效应晶体管等器件。半导体器件是组成各种电子线路的核心元件,掌握它们的基本工作原理、特性曲线和主要参数是学好本课程及有关后续课程的重要基础。

1.1 半导体的基础知识

物质按其导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三种。通常人们把容易导电的物质称为导体,如金、银、铜等;把在正常情况下很难导电的物质称为绝缘体,如陶瓷、云母、塑料、橡胶等;把导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,如硅和锗。导体、半导体和绝缘体的划分,严格地说是以物质的电阻率 ρ 的大小来确定的。电阻率小于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为导体;电阻率大于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为绝缘体;电阻率在导体和绝缘体之间的物质称为半导体。

半导体之所以受到人们的高度重视,并获得广泛的应用,是由于它具有不同于导体和绝缘体的独特性质,具体表现在以下三个方面:

① 掺杂性:半导体的电阻率受掺入的“杂质”影响极大,在半导体中即使掺入的杂质十分微量,也能使其电阻率大大地下降,利用这种独特的性质可以制成各种各样的晶体管。

② 热敏性:一些半导体对温度的反应很灵敏,其电阻率随着温度的上升而明显地下降,利用这种特性很容易制成各种热敏元件,如热敏电阻、温度传感器等。

③ 光敏性:有些半导体的电阻率随着光照的增强而明显地下降,利用这种特性可以作成各种光敏元件,如光敏电阻和光电管等。

要说明半导体为什么会具有上述特性,就必须研究半导体的内部结构。半导体理论是一专门的学科,本节介绍一些与制作器件有关的基本知识。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是指纯净的、不含杂质的半导体。在近代电子学中,用得最多的

半导体是硅和锗,它们都是四价元素,原子最外层有4个价电子。硅和锗的原子结构示意图如图1-1所示。价电子受原子核的束缚力最小,所以物质的导电性与价电子数有很大关系。

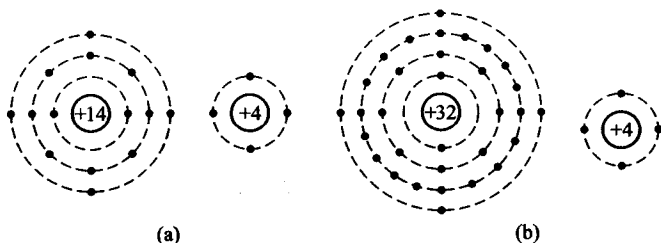


图1-1 原子结构示意图

(a) 硅; (b) 锗

在导体中,由于金属物质的原子其外层电子离原子核较远,受原子核的吸引力就很小,因此常温下就有大量的电子能挣脱原子核的束缚而成为自由电子,这就是为什么导体具有良好导电能力的原因。

在绝缘体中,其外层电子离原子核较近,受原子核的束缚力很大,几乎没有自由电子存在,因此它不导电,在正常情况下是绝缘的。在特定条件下,例如在绝缘体两端加上特别高的电压,把外层电子硬“拉”出来,这时绝缘体就变成了导体,这种现象称为击穿。

在硅和锗等半导体材料中,内部原子排列是有规律的,即为晶体结构。晶体硅(或锗)的原子排列示意图如图1-2(a)所示。每个硅原子受邻近4个原子的束缚,组成4个共价键。共价键像纽带一样将排列整齐的原子连接起来,如图1-2(b)所示。

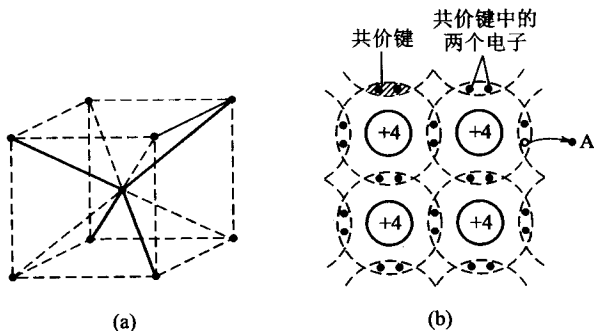


图1-2 硅晶体结构和共价键结构示意图

(a) 晶体结构; (b) 共价键结构

在热力学温度零度($0\text{K} = -273^\circ\text{C}$)时,硅和锗的外层电子(价电子)无法挣

脱共价键的束缚,因此本征半导体中没有自由电子,此时半导体相当于绝缘体。但在常温下,少量价电子受热激发获得足够的能量,挣脱了共价键的束缚而成为自由电子,如图 1-2(b) 中价电子 A。同时,在原来共价键的位置上留下一个空位,称为空穴。在外加电场或其他能源的作用下,邻近价电子就可填补到这个空位上,而在这个电子原来的位置上又留下新的空位,以后其他电子又可转移到新空位上,因此空穴能参与导电,空穴是由于失去一个电子而形成的,所以空穴是带正电的载流子。可见,在热激发下,本征半导体中存在两种能参与导电的载运电荷的粒子——载流子:成对的电子和空穴。因此,在常温下,本征半导体不再是绝缘体了,但常温下由热激发产生的电子-空穴对的数量是很少的,这就是为什么本征半导体导电能力很差的原因。

需要指出,由热激发产生的自由电子,也会释放能量返回到附近的空穴,这种现象称为复合。

除了上面讨论的热激发以外,也可利用光照进行激发。随着温度的升高或光照的增强,电子-空穴对的数量将大大增加,导电能力将大大提高,这就是半导体具有热敏性和光敏性的基本原理。热激发和光激发统称为本征激发。

1.1.2 杂质半导体

杂质半导体是指在本征半导体中掺入了微量其他元素(称为杂质)的半导体。杂质的掺入可以使半导体的导电性能发生显著的变化。根据掺入的杂质不同,杂质半导体可分为 N 型(电子)半导体和 P 型(空穴)半导体两大类。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入少量五价元素(磷、砷、锑等)磷,由于掺入的磷原子数目比硅原子要少得多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上的硅原子将被磷原子所代替。磷原子有 5 个价电子,其中 4 个价电子与邻近的硅原子的价电子形成共价键,剩下的一个价电子虽然还受到磷原子的束缚,但是这种束缚作用终究要比共价键的束缚作用微弱得多。只要给这个价电子较小的能量,它就能挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。磷原子释放出多余的价电子后,因失去电子而成为正离子,如图 1-3 所示。这类能释放电子的杂质称为施主杂质,这一释放过程称为施主杂质电离。常温下,施主杂质原子已被全部电离,可见每掺入一个施主杂质原子,电离后就产生一个电子和一个正离子,它们是成对产生的。电子是能自由运动的,而正离子是不能运动的。此外,杂质半导体中同样存在热激发,产生少量的电子-空穴对,且由

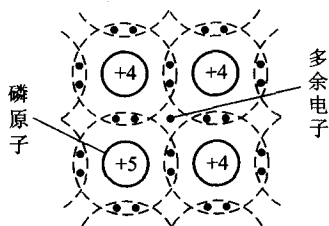


图 1-3 N 型半导体的共价键结构

于大量电子的存在增加了空穴被复合的几率。因此自由电子数远大于空穴数。自由电子称为多数载流子(简称多子),空穴称为少数载流子(简称少子)。这种使电子浓度大大增加的杂质半导体称为 N 型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素(硼、铝、镓等)硼,由于掺入的硼原子数量比硅原子要少得多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上的硅原子被硼原子所代替。硼原子只有 3 个价电子,它与周围硅原子组成共价键时,因缺少一个电子,在晶体中便产生一个空位,形成一个空穴,周围共价键中的电子很容易运动到这里来,而硼原子由于多了一个电子而成为不能运动的负离子,如图 1-4 所示。这类能接受电子的杂质称为受主杂质,这个接受过程称为受主杂质电离。常温下,受主杂质原子也被全部电离。可见每掺入一个受主杂质原子电离后就产生一个空穴和一个负离子,它们是成对产生的。此外,杂质半导体中同样存在热激发,产生少量的电子-空穴对,且由于大量空穴的存在增加了电子被复合的几率。

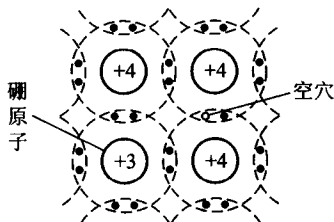


图 1-4 P 型半导体的共价键结构

因此空穴数远大于自由电子数,空穴浓度大大增加,显然,在 P 型半导体中,空穴是多数载流子,而自由电子是少数载流子。

综上所述,本征半导体中掺入微量杂质元素构成杂质半导体后,在常温下杂质原子均已电离,载流子浓度大大增加,使半导体的导电能力显著提高,因此掺杂是提高半导体导电能力的非常有效的方法。还需指出,无论是 N 型半导体还是 P 型半导体,其正负电荷量总是相等的,呈电中性。

1.1.3 载流子的运动方式及形成的电流

通过上面分析可知,半导体中有两种载流子:电子和空穴。当 $T > 0\text{ K}$ 时,载流子作热运动,各向机会均等,不形成电流。但在一定的条件下会形成有规则的定向运动。

1. 扩散运动和扩散电流

当载流子浓度分布不均匀时,就会产生一种扩散力,这种扩散力将使载流子浓度分布朝着趋向均匀的方向去改变。载流子受扩散力的作用所作的运动称为扩散运动。载流子扩散运动所形成的电流称为扩散电流。显然,载流子浓度分布越不均匀,扩散力就越强,形成的扩散电流就越大,即扩散电流与载流子浓度梯度成正比。

2. 漂移运动和漂移电流