




21 世纪高等院校计算机网络与通信教材

电子线路基础

北京希望电子出版社 总策划
姚秀芳 杨 梅 主 编



 科学出版社
www.sciencep.com



21 世纪高等院校计算机网络与通信教材

电子线路基础

北京希望电子出版社 总策划
姚秀芳 杨 梅 主 编



 科学出版社
www.sciencep.com

内容简介

本书是为适应“面向 21 世纪电工电子系列课程教学内容与课程改革”而编写的教材之一。全书共分为 11 章, 内容包括半导体二极管及其基本电路、半导体三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、多级放大电路、集成运算放大电路、放大电路的频率响应、反馈放大电路、信号的运算与处理电路、信号的产生和变换电路、低频功率放大电路、直流稳压电源。本书着重基本概念、基本原理和基本分析方法的论述。为便于学生自学, 在每章后面都有小结和习题。

本书可作为高等学校电气、电子信息、通信工程类专业的教科书, 也可作为从事电子技术工作的技术人员及电子技术爱好者的自学用书。

需要本书或技术支持的读者, 请与北京清河 6 号信箱(邮编 100085) 发行部联系。电话: 010-82702660 010-82702658 010-62978181 转 103 或 238, 传真: 010-82702698, E-mail: tbd@bhp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

电子线路基础/姚秀芳, 杨梅主编—北京: 科学出版社,
2005.10
21 世纪高等院校计算机网络与通信教材
ISBN 7-03-016188-2
I. 电... II. ①姚...②杨... III. 电子电路 IV. TN710
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 096467 号

责任编辑: 曾 华 / 责任校对: 马 君
责任印刷: 媛 明 / 封面设计: 梁运丽

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市媛明印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
2005 年 10 月第一次印刷 印张: 19 1/2
印数: 1-3 000 册 字数: 433118

定价: 26.00 元

21 世纪高等院校计算机网络与通信教材：

编委会

主任 曲 炜

副主任 陆卫民 卢 昱 赵洪利 李新明

委 员 （以姓氏笔画为序）

马彦恒 万定生 王擎天 王成友 王向阳

朱诗兵 刘作学 吴善培 何新华 何忠龙

张 文 周 辉 郑明红 罗建华 杨喜权

赵立军 姚秀芳 徐建华 徐远超 郭德纯

梁计春 韩素华 葛洪华 樊秀梅 穆道生

序

目前,中国固定和移动两大网络的规模都已位居世界第2位,上网用户2004年总数达9400万,中国的信息通信制造业也得到很大的发展。今后5年中国信息产业预计将仍以高于20%的速度增长。中国将加快建设新一代信息通信网络,全面振兴信息通信产品制造业和软件业,建立能够支撑信息通信业发展的技术、生产体系。在向数字化、集成化、网络化转变的过程中,简单服务要向个性化服务发展,低带宽要向高带宽发展,电路交换要向分组交换发展。无线网络、网络多媒体、多媒体计算、人机自然语音通信是网络与通信专业重点建设的四大方向。

面对潜力巨大的中国市场,我国大学的相关专业需要培养具有知识创新能力的高素质人才,在通信高新技术的研究上争创国际先进水平,为我国在信息领域达到国际一流的目标作出贡献。

科技的发展使得教育要跟上时代发展的步伐,但是目前市面上还没有一套系统、完整的关于计算机网络与通信方面的教材。现有的教材有些偏重理论,有些则偏重实用,不太适合于课堂教学。而对于学习网络与通信的学生来说,不仅要懂得原理,还必须学会技术,这样才能符合“培养人才、创造知识、转化成果、服务社会”的教学宗旨,在人才培养、科学研究和技术应用等方面有所成就,为我国通信与信息领域的发展做出贡献。

为了获得与国际接轨的教学内容,达到提高整体教学水平的目的,北京希望电子出版社组织国内各大高校相关专业的教授、专家、学者,共同编选本套丛书。本套丛书强化学生实践能力和创新意识的培养,定位准确、内容创新、结构合理。在选材上主要采用了成熟的理论,并通过对目前研究现状的跟踪,补充了最新的研究成果;充分考虑了内容组织的系统性和完整性,从学生的认知规律出发,力求做到简明和便于教学的特色;以培养学生分析问题和解决问题的能力为目标,着重基本概念、基本原理和基本分析方法的论述。本套丛书特别突出了各项技术的实用性,可作为计算机网络和通信专业或相近专业本科生、研究生的教科书,同时,还可以作为从事网络系统开发的科研人员和相关行业技术人员、管理人员有用的参考资料。

在撰写过程中参阅了大量的参考书、论文和资料,这里谨向所有的作者致以崇高的敬意!

我们欢迎更多的优秀教师参与到教材建设中来,真诚希望广大教师、学生与读者朋友在使用本丛书过程中提出宝贵的意见和建议。若有投稿或建议,请发至本丛书出版者电子邮件: textbook@bhp.com.cn

21世纪高等院校计算机网络与通信教材编委会

前 言

本书是为适应“面向 21 世纪电工电子系列课程教学内容与课程改革”而编写的教材之一。全书共分 11 章，主要内容包括半导体器件基础、基本放大电路分析、集成运算放大器及其应用、负反馈放大电路分析、波形发生与信号的转换、直流电源等。

“电子线路基础”是电子工程类专业重要的技术基础课，是研究半导体器件的性能、电路及其应用的学科。半导体电子技术发展迅猛，已经历了由分立元件到集成器件、由中小规模集成到超大规模集成、由单元集成到系统集成的一系列变革，集成化已成为电子技术发展的潮流。

基于这一特点，本书在内容的选取和安排上，从两方面进行了加强，一是加强基础知识，首先简要阐明半导体元件的工作原理，重点分析了由半导体元件组成的基本放大电路、负反馈放大电路及系统稳定性的判断等；二是加强集成电路运用，对集成运算放大器、集成模拟乘法器、集成稳压电源、集成功放电路、有源滤波器、开关电源等内容有所加强，着重阐明电路的原理、功能及主要参数并给出典型电路分析。

本书内容按课内 70 学时编写的，在编写过程中，认真总结了多年来的教学实践，并参考了国内外许多同类教材和有关文献，从学生的认知规律出发，力求做到简明和便于教学，以培养学生分析问题和解决问题的能力为目标，着重基本概念、基本原理和基本分析方法的论述。为便于学生自学，在每章后面都有小结和习题。

本书第 1、2、3、4、5、8 章由姚秀芳编写，第 6、7、9、10、11 章由杨梅编写，全书由姚秀芳主编统稿。参加本书编写工作的还有杜晋军、崔松菲、金淑霞、姚树成、李俊、强秀丽、胡欣杰、段继亮、郝立华、王勇、盖江南等。

本书由刘振起教授审阅并提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。

由于水平有限，书中定有不妥之处，欢迎广大师生和读者给予批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本电路.....1	2.2.2 共射极基本放大电路工作原理.....39
1.1 半导体基础知识.....1	2.2.3 放大电路的主要技术指标.....41
1.1.1 半导体的物理特性.....1	2.3 基本放大电路的图解分析方法.....43
1.1.2 本征半导体.....1	2.3.1 直流通路和交流通路.....43
1.1.3 掺杂半导体.....3	2.3.2 放大电路的静态图解分析.....45
1.1.4 PN 结.....4	2.3.3 放大电路的动态图解分析.....46
1.2 半导体二极管.....7	2.4 放大电路的低频小信号模型分析法.....51
1.2.1 半导体二极管的结构类型.....7	2.4.1 h 参数的引出及等效模型.....51
1.2.2 半导体二极管的伏安特性.....8	2.4.2 h 参数的物理含义.....52
1.2.3 半导体二极管的主要参数.....9	2.4.3 h 参数微变等效电路简化模型.....54
1.3 半导体二极管的等效模型及其电路 分析方法.....10	2.4.4 简化 h 参数模型中的主要参数.....54
1.3.1 二极管的等效电阻.....10	2.4.5 共射组态基本放大电路微变 等效电路分析法.....55
1.3.2 二极管的等效模型.....11	2.5 放大器的工作点稳定问题.....56
1.3.3 含二极管电路分析.....12	2.5.1 温度对工作点的影响.....56
1.4 特殊二极管.....15	2.5.2 分压式电流负反馈稳定 偏置电路.....57
1.4.1 稳压二极管.....15	2.6 共集电极放大电路和共基极放大电路.....60
1.4.2 变容二极管.....16	2.6.1 共集电极放大电路.....60
1.4.3 光电二极管.....17	2.6.2 共基极放大电路.....62
1.4.4 发光二极管.....17	2.6.3 3 种组态基本放大电路比较.....65
1.5 半导体二极管的应用.....18	2.7 复合管放大电路.....66
1.5.1 半导体二极管整流电路.....18	2.8 本章小结.....67
1.5.2 二极管限幅电路.....19	2.9 习题.....68
1.5.3 稳压电路.....20	
1.6 本章小结.....20	第 3 章 场效应管及其放大电路.....74
1.7 习题.....21	3.1 结型场效应三极管.....74
第 2 章 半导体三极管及其放大电路.....26	3.1.1 结型场效应三极管的结构.....74
2.1 半导体三极管.....26	3.1.2 结型场效应三极管的工作原理.....75
2.1.1 半导体三极管的结构.....26	3.1.3 结型场效应三极管的特性曲线.....76
2.1.2 半导体三极管的电流放大作用.....27	3.2 绝缘栅型场效应三极管.....78
2.1.3 三极管的特性曲线.....30	3.2.1 N 沟道增强型 MOSFET 场 效应三极管.....78
2.1.4 半导体三极管的主要参数.....33	3.2.2 N 沟道耗尽型 MOSFET 管.....81
2.2 共射极基本放大电路的组成及 工作原理.....38	3.2.3 各种场效应管的伏安特性 曲线比较.....81
2.2.1 共射极基本放大电路的组成.....38	

3.2.4	场效应三极管的主要参数.....	83	5.2.3	多路电流源.....	123
3.2.5	双极型三极管和场效应型 三极管的比较.....	84	5.2.4	电流源用作有源负载.....	123
3.3	场效应三极管放大电路分析.....	85	5.3	运算放大器的主要参数及理想 运算放大电路特点.....	124
3.3.1	场效应管直流偏置电路及 静态分析.....	85	5.3.1	运算放大器的技术指标.....	124
3.3.2	场效应管放大电路的动态分析.....	87	5.3.2	理想运算放大器.....	125
3.3.3	3种基本放大电路的动态分析.....	89	5.4	集成运算放大电路分析.....	126
3.3.4	3种接法基本放大电路的 性能比较.....	94	5.5	本章小结.....	128
3.4	本章小结.....	95	5.6	习题.....	129
3.5	习题.....	96	第6章	放大电路的频率响应.....	130
第4章	多级放大电路.....	99	6.1	RC电路的频率响应.....	130
4.1	多级放大电路的耦合方式.....	99	6.1.1	RC高通电路.....	130
4.1.1	直接耦合.....	99	6.1.2	RC低通电路.....	131
4.1.2	阻容耦合.....	101	6.1.3	频率响应的描述.....	132
4.1.3	变压器耦合.....	101	6.2	晶体管的高频等效模型.....	133
4.1.4	多级放大电路的分析计算.....	102	6.2.1	晶体管的高频等效模型.....	133
4.2	差动放大电路.....	106	6.2.2	晶体管混合 π 模型的简化.....	134
4.2.1	差动放大电路组成及抑制 零点漂移原理.....	106	6.2.3	混合 π 模型的主要参数.....	136
4.2.2	射极耦合差动放大电路的 静态分析.....	108	6.2.4	晶体管交流电流放大系数 β 的 频率响应.....	137
4.2.3	射极耦合差动放大电路的 动态分析.....	108	6.3	单管放大电路的频率响应.....	138
4.2.4	恒流源差动放大电路.....	114	6.3.1	单管放大电路的高频响应.....	140
4.3	本章小结.....	115	6.3.2	单管放大电路的低频响应.....	141
4.4	习题.....	115	6.3.3	放大电路频率响应的改善 和增益带宽积.....	144
第5章	集成运算放大电路.....	119	6.4	多级放大电路的频率响应.....	145
5.1	集成运算放大器简介.....	119	6.4.1	多级放大电路频率特性的 定性分析.....	145
5.1.1	集成运算放大电路的特点.....	119	6.4.2	多级放大电路截止频率的估算.....	146
5.1.2	集成运算放大电路的组成.....	119	6.4.3	集成运放的频率响应.....	149
5.1.3	简单的集成运算放大电路及 其电压传输特性.....	120	6.5	本章小结.....	150
5.2	运算放大器中的电流源.....	121	6.6	习题.....	151
5.2.1	镜像电流源.....	122	第7章	反馈放大电路.....	155
5.2.2	微电流源.....	122	7.1	反馈的基本概念和分类.....	155
			7.1.1	反馈的概念.....	155
			7.1.2	反馈的类型.....	156
			7.2	反馈的判断.....	156

7.2.1 有无反馈的判断.....	156	8.4.1 积分运算电路.....	199
7.2.2 反馈极性的判断.....	157	8.4.2 微分运算电路.....	200
7.2.3 直流反馈和交流反馈的判断.....	159	8.5 对数运算与指数运算电路.....	202
7.2.4 反馈组态的判断.....	159	8.5.1 对数运算电路.....	202
7.3 负反馈放大电路的方框图及其增益的一般表达式.....	162	8.5.2 指数运算电路.....	204
7.3.1 负反馈放大电路的方框图.....	162	8.6 模拟乘法器及其应用.....	205
7.3.2 负反馈放大电路增益的一般表达式.....	164	8.6.1 模拟乘法器的基本概念.....	205
7.3.3 负反馈放大电路的基本放大电路.....	165	8.6.2 用对数指数运算电路实现模拟乘法器.....	206
7.4 深度负反馈放大电路放大倍数的分析.....	167	8.6.3 变跨导型模拟乘法器.....	207
7.4.1 深度负反馈的实质.....	167	8.6.4 集成模拟乘法器的主要参数.....	210
7.4.2 深度负反馈条件下放大倍数的计算.....	168	8.6.5 模拟乘法器的应用.....	210
7.5 负反馈对放大电路性能的影响.....	173	8.7 有源滤波器.....	214
7.5.1 稳定电路放大倍数.....	173	8.7.1 概述.....	214
7.5.2 展宽频带.....	173	8.7.2 低通有源滤波器.....	216
7.5.3 负反馈对输入电阻输出电阻的影响.....	174	8.7.3 有源高通滤波器 (HPF).....	221
7.5.4 减小非线性失真.....	177	8.7.4 有源带通滤波器 (BPF) 和带阻滤波器 (BEF).....	221
7.5.5 放大电路中负反馈的正确引入.....	178	8.8 本章小结.....	222
7.6 负反馈放大电路的稳定.....	180	8.9 习题.....	222
7.6.1 负反馈放大电路的自激及稳定工作的条件.....	180	第 9 章 信号的产生和变换电路.....	225
7.6.2 负反馈放大电路自激振荡的消除方法.....	182	9.1 正弦波振荡电路.....	225
7.7 本章小结.....	186	9.1.1 概述.....	225
7.8 习题.....	187	9.1.2 RC 正弦波振荡电路.....	227
第 8 章 信号的运算与处理电路.....	192	9.1.3 LC 正弦波振荡电路.....	231
8.1 概述.....	192	9.1.4 石英晶体正弦波振荡电路.....	238
8.2 比例运算电路.....	193	9.2 非正弦波发生电路.....	241
8.2.1 反比例运算电路.....	193	9.2.1 电压比较器.....	241
8.2.2 同比例运算电路.....	195	9.2.2 方波发生电路.....	245
8.3 加减运算电路.....	196	9.2.3 三角波发生电路和锯齿波发生电路.....	247
8.3.1 加法运算电路.....	196	9.2.4 集成函数发生器 8038 简介.....	249
8.3.2 减法运算电路.....	197	9.3 利用集成运放实现的信号变换电路.....	251
8.4 微分运算与积分运算电路.....	199	9.3.1 电压—电流转换电路.....	252
		9.3.2 精密整流电路.....	252
		9.3.3 电压—频率转换电路.....	254
		9.4 本章小结.....	255
		9.5 习题.....	256

第 10 章 低频功率放大电路.....	264	第 11 章 直流稳压电源.....	280
10.1 功率放大电路概述.....	264	11.1 整流电路.....	280
10.1.1 功率放大电路的主要技术指标...264		11.1.1 单相半波整流电路.....	280
10.1.2 功率放大电路的分类.....	265	11.1.2 单相全波整流电路.....	281
10.2 互补功率放大电路.....	265	11.1.3 单相桥式整流电路.....	282
10.2.1 乙类互补功率放大电路.....	265	11.2 滤波电路.....	284
10.2.2 甲乙类互补功率放大电路.....	266	11.2.1 电容滤波电路.....	285
10.2.3 互补功率放大电路的参数计算...268		11.2.2 电感滤波电路.....	287
10.2.4 互补功率放大电路的安全运行...269		11.3 稳压电路.....	287
10.2.5 其他类型的互补功率放大电路...272		11.3.1 稳压二极管稳压电路.....	288
10.3 集成功率放大器.....	273	11.3.2 线性串联型稳压电源.....	291
10.3.1 集成功率放大电路 LM386 的 电路组成.....	273	11.3.3 稳压电路的保护环节.....	292
10.3.2 集成功率放大电路 LM386 的 工作原理.....	274	11.4 三端集成稳压器.....	293
10.3.3 集成功率放大电路 LM386 的 应用.....	275	11.4.1 概述.....	293
10.4 本章小结.....	275	11.4.2 线性三端集成稳压器的分类...293	
10.5 习题.....	276	11.4.3 应用电路.....	293
		11.5 串联开关型稳压电源.....	295
		11.6 本章小结.....	296
		11.7 习题.....	297

第 1 章 半导体二极管及其基本电路

PN 结具有单向导电性，PN 结是构成各种半导体器件的基础。本章将围绕 PN 结这个中心问题展开分析。首先简要介绍半导体材料的物理特性，然后讨论 PN 结的形成机理及其导电特性，最后介绍半导体二极管的工作原理、特性曲线、电流方程、主要参数及电路模型。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体的物理特性

物质导电性能的强弱主要取决于原子结构。自然界的物质按其导电性能的强弱来分，可以分为导体、绝缘体和半导体。导体一般为低价元素，其最外层电子极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，在外电场的作用下定向移动形成电流。导体的电阻率较小，一般在 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 以下，如铜、铝、银等都是良好的导体。绝缘体一般为高价元素，最外层电子受原子核的束缚力很强，难以挣脱原子核的束缚成为自由电子，绝缘体几乎不导电，电阻率一般在 $10^9\Omega\cdot\text{cm}$ 以上，如橡胶、塑料、石英、陶瓷等都是性能良好的绝缘体。此外还有一类物质，它的导电性能介于导体和绝缘体之间，我们称它为半导体。目前常用的半导体材料是硅 (Si) 和锗 (Ge)，它们都是四价元素，它们的最外层电子既不象导体那样容易形成自由电子，也不像绝缘体那样难以成为自由电子，因而导电性能介于二者之间。

半导体材料在导电性能上具有以下重要特性：① 当半导体受到外界光和热的刺激时，其导电性能将发生显著的变化；② 在纯净的半导体内加入微量的其他元素，其导电性能也会显著增加。这些性能是由半导体材料本身结构特点所形成的。下面将通过硅 (Si) 和锗 (Ge) 两种半导体材料的结构特点来分析其导电机理。

1.1.2 本征半导体

本征半导体是指完全纯净的、原子按晶格排列的、结构完整的半导体。一般当半导体材料的纯度达到 99.9999999%，常称为“9 个 9”，即认为是纯净的半导体，纯净的半导体在物理结构上呈单晶体形态。

硅原子有 14 个电子，锗原子有 32 个电子，它们在最外层电子轨道上都分布着 4 个电子，我们把原子最外层的电子称为价电子，硅和锗都是 4 价元素。物质的许多物理性质和化学性质都由价电子决定，为了突出价电子的作用，常将原子的内层电子和原子核看作一个整体，价电子单独考虑，硅和锗原子结构简化图如图 1-1 所示。其中“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子，外层的小圆点表示价电子。

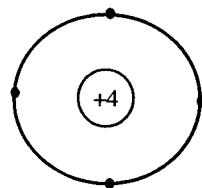


图 1-1 硅和锗原子结构简化图

纯净的硅和锗它们的原子在空间的排列都是有序的空间点阵，如图 1-2 所示，每个原子的 4 个价电子不仅受自身原子核的吸引，而且还要受相邻原子核的吸引，使得每个价电

子为相邻两个原子所共有，我们把这样一对价电子组合称为共价键。共价键中的价电子为这些原子所共有，并为它们所束缚。在本征半导体中，价电子全部被束缚在共价键中，在热力学温度零度（ $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$ ），且无外界光的照射时，价电子不能挣脱共价键的束缚，此时晶体中不存在能参与导电的粒子，因此绝对零度下纯净的半导体材料几乎不导电。

但是当半导体材料的温度升高或者受到光线照射时，共价键中的价电子将从外界获得能量而摆脱共价键对它的束缚，离开原子核而形成自由电子，自由电子带负电，同时在原来共价键中留下一个空位，称这个空位为“空穴”，如图 1-3 所示。空穴的出现，使邻近原子的价电子比较容易离开它所在的共价键，去填充这个空位，而在原共价键中又留下新的空穴位，这样依次填充下去，价电子填补空穴形成的运动，就相当于空穴的逆向运动，由于空穴是原子失去一个电子而形成的，我们把空穴看成带正电的粒子，所带的电量与电子电量相等，符号相反，所以空穴的运动就可看成是一个带正电荷的粒子运动。如果把运载电荷的粒子称为载流子，则在导体中只有一种载流子，即自由电子，而在本征半导体中就有两种载流子，即电子和空穴，空穴的出现是半导体区别于导体的重要特点。

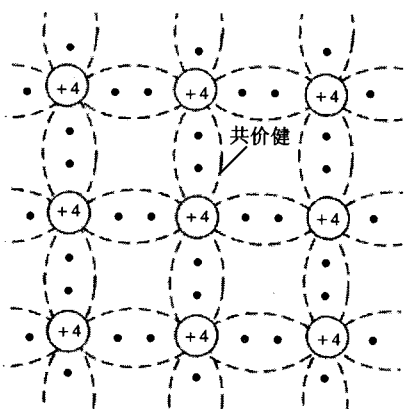


图 1-2 本征半导体结构示意图

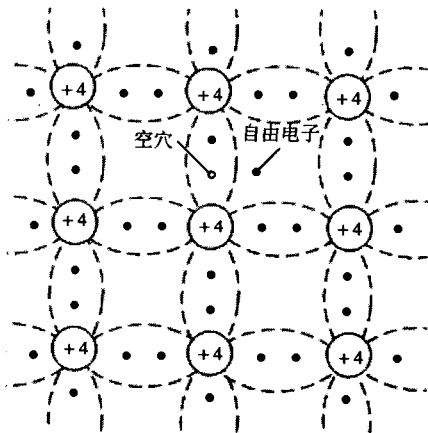


图 1-3 本征半导体中自由电子和空穴

把因温度升高或受到光的照射，价电子获得能量而挣脱原子核的束缚，成为自由电子参与导电的现象称为本征激发（也称热激发）。本征半导体内受激发产生一个电子，就必然相伴出现一个空穴，电子和空穴是成对出现的。同时自由电子在运动中又会遇到空穴，并与空穴相结合而中和，这一过程叫“复合”。在本征半导体中，载流子总是不断的产生与复合，最终达到动态平衡，在任何情况下本征半导体中电子和空穴的数量都是相等的。

在半导体材料确定后，载流子的浓度与温度有关，随着温度的升高，载流子的浓度近似按指数规律增长。在室温附近，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，可见温度是影响半导体性能的重要因素。

理论分析表明，本征半导体载流子的浓度表达式为：

$$n_i = p_i = K_1 T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{g0}}{2KT}} \quad (1-1)$$

式中 n_i 、 p_i 分别表示自由电子和空穴的浓度（每立方厘米的电子或空穴数）； T 为热力学温度（ K ）； k 为玻耳兹曼常数（ $8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ ）； E_{g0} 为热力学零度时挣脱共价

键所需的能量,称为禁带宽度(硅为 1.21eV ,锗为 0.785eV); K_1 是与半导体材料载流子有效质量、有效能级密度有关的常数(硅为 $3.87 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$,锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$)。

式(1-1)表明,在 $T = 0\text{K}$ 时,自由电子和空穴的浓度均为零,本征半导体如同绝缘体一样;当温度升高时,本征半导体载流子的浓度按指数规律升高。在常温下($T=300\text{K}$)时,硅材料的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$,锗材料的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 2.38 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。硅和锗的本征载流子浓度不同主要是两种半导体的禁带宽度不同所致。当半导体材料确定后,禁带宽度即已确定,则载流子浓度取决于温度的变化,这一点是半导体的一个重要特性。

1.1.3 掺杂半导体

在本征半导体中掺入某些微量的杂质元素,便可得到掺杂半导体。按照掺入杂质元素的不同,可分为N型半导体(电子型半导体)和P型半导体(空穴型半导体),比起本征半导体,掺杂半导体的导电性将有显著的提高,控制掺入杂质元素的浓度,即可控制掺杂半导体的导电性能。

1. N型半导体

在纯净的硅或锗中掺入少量五价元素(如磷),则在本征半导体的晶体点阵中某些位置上的硅原子或锗原子将被磷原子取代。磷原子有5个价电子,它以4个价电子与相邻的硅原子或锗原子组成共价键后,还多1个价电子,如图1-4所示,这个多余的价电子不受共价键的束缚,只受磷原子核的吸引,这个吸引力比起共价键的束缚作用要微弱得多,只要较小的能量就能挣脱磷原子的吸引而形成自由电子,在常温下这些电子几乎全部被激发为自由电子。

由于磷在晶体中给出了一个多余的电子,故称磷原子为施主杂质。磷原子给出了一个电子后,本身成为正离子,但在产生自由电子的同时,并不产生空穴,这一点与本征半导体不同,正离子束缚在晶格中不再移动,所以它不能参与导电。在掺杂后的晶体中,同样也有本征激发产生的电子-空穴对,但数量较少,因此在掺入五价的磷元素后,半导体中的自由电子数远大于空穴数。因自由电子带负电(Negative),故称这种杂质半导体为电子型半导体或N型半导体,N型半导体中自由电子数比空穴数多,电子为多数载流子,称为多子,空穴为少数载流子,称为少子,少子是由热激发形成的,多子主要是由杂质原子提供的。N型半导体中主要靠自由电子导电,掺杂越多,则多子浓度越高,导电性能越好。

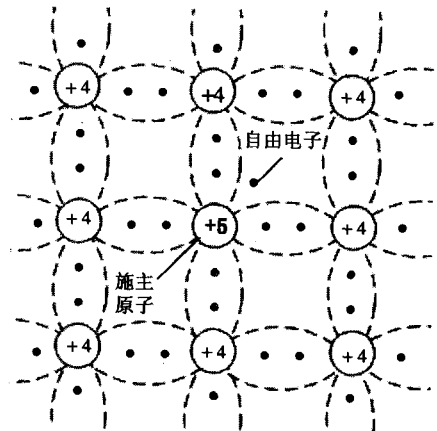


图1-4 N型半导体

2. P型半导体

在纯净的硅或锗中掺入少量三价元素(如硼),则在本征半导体的晶体点阵中某些位置

上的硅或锗原子将被三价硼原子取代。硼原子只有三个价电子，它与周围硅或锗原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位，这个空位与空穴不同，它不带电。

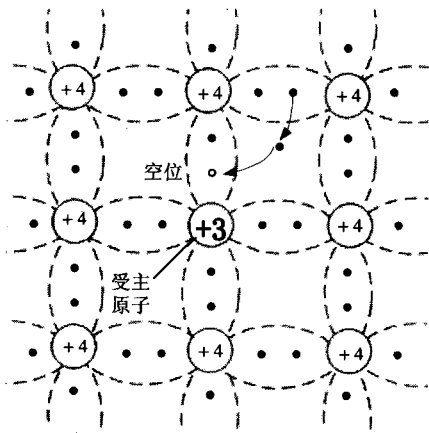


图 1-5 P 型半导体

当相邻共价键上的电子受到热激发时，就有可能去填补这个空位，使硼原子成为不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子形成空穴，如图 1-5 所示。硼原子在硅晶体中接受电子，故称为受主杂质。硼原子每接受一个电子，在晶体中就产生一个空穴，但在产生空穴的同时并不产生新的自由电子，因而在这种半导体中空穴为多子，自由电子为少子，主要靠空穴导电，空穴带正电 (Positive)，故称这种半导体为空穴型半导体或 P 型半导体。与 N 型半导体相同，掺入的杂质越多，空穴的浓度越高，导电性能越强。

在掺杂半导体中多子的浓度主要取决于掺杂原子的浓度，因而它受温度的影响很小，而少子是本征激发形成的，所以尽管其浓度很低，却对温度十分敏感，所以分析半导体电路，当环境温度变化较大时应考虑温度的影响。

1.1.4 PN 结

在一块本征半导体两侧通过不同的掺杂工艺，使一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，并且保持晶格的连续性，则在两种半导体的交界面附近，就会形成一个具有独特物理特性的薄层，称之为 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起时，在交界面处就出现了自由电子和空穴的浓度差，由于浓度差的出现，必然引起电子、空穴从高浓度区向低浓度区运动，这种由于浓度而产生的运动称为扩散运动。N 区的自由电子向 P 区扩散，并与 P 区的空穴复合，而在 N 区留下带正电的施主离子，P 区的空穴向 N 区扩散，并与 N 区电子复合，在 P 区留下带负电的受主离子，在交界面的两侧，由不能移动的正负离子形成空间电荷区，称为 PN 结，如图 1-6 (a)、1-6 (b) 所示。

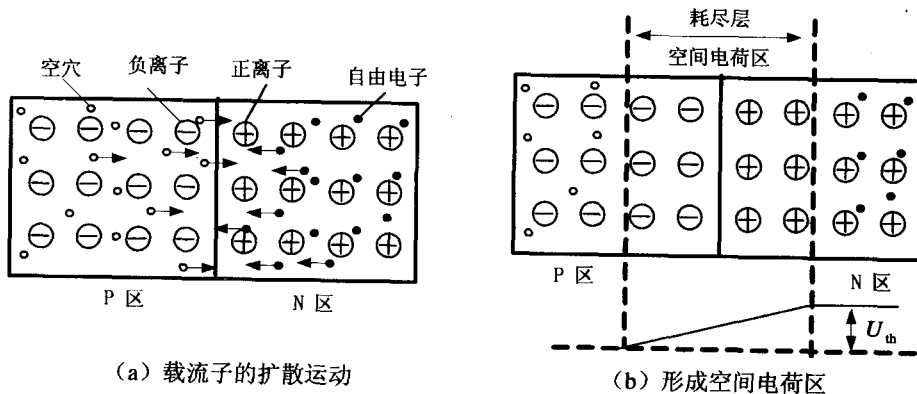


图 1-6 PN 结的形成

由于空间电荷区的出现，破坏了P区、N区原来电中性的条件，使P、N区交界面处形成了一个由N区指向P区的电场，由于这个电场是由半导体内部载流子的扩散运动形成的，故称之为内电场。内电场的建立将阻止多子的进一步扩散，所以空间电荷区又称为阻挡层。内电场的作用有利于使N区中的少数载流子空穴向P区移动，P区中的少数载流子电子向N区移动，把这种由于内电场的作用使少数载流子产生的运动称为漂移运动。扩散运动能使空间电荷区加宽，内电场增强，对多子的扩散起阻止作用，同时增强了少子的漂移运动；而漂移又使空间电荷区内电场减弱，使扩散容易进行，当漂移和扩散达到动态平衡时，PN结中总的电流等于零，空间电荷区的宽度达到稳定。

在空间电荷区，只有不能移动的正负离子，而载流子几乎全部扩散到对方并复合掉了，几乎不存在可以运动的载流子，所以空间电荷区又称为耗尽层。

2. PN结的单向导电性

在PN结的两端外加电压，将破坏原来扩散电流等于漂移电流的平衡状态，PN结将有电流流过，根据外加电压与内电场极性的相对关系，分为外加正向电压和反向电压两种情况。

(1) PN结外加正向电压

P区接电源正极，N区接电源负极，称为PN结外加正向电压，简称为正偏。此时外电场与内电场方向相反，外电场将多数载流子推向空间电荷区，使空间电荷区变窄，削弱了内电场，破坏了原来的平衡状态，使扩散运动加剧，而漂移运动削弱，从而使PN结中形成正向电流，PN结正向导通，如图1-7所示。在PN结正向导通时，由于内电场较弱，由内电场引起的PN结电压较小，一般为零点几伏，所以正向导通时PN结呈低阻特性，其等效电阻很小，几乎为零。

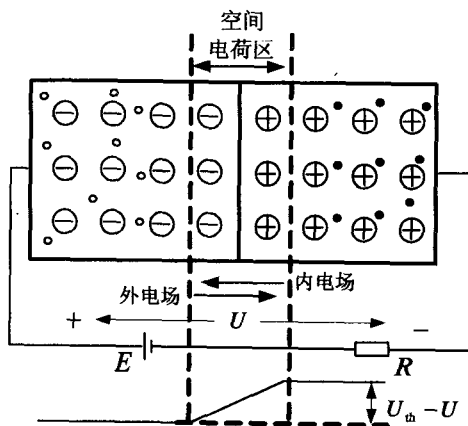


图1-7 PN结加正向电压导通

(2) PN结外加反向电压

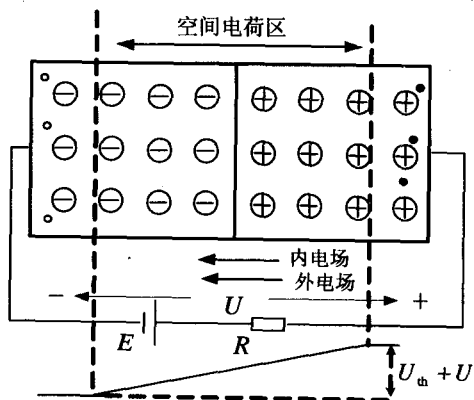


图1-8 PN结加反正向电压截止

P区接电源负极，N区接电源正极，称为PN结外加反向电压，简称为反偏。此时外电场与内电场方向相同，外电场将增加内电场的作用，使空间电荷区变宽，对多数载流子的扩散运动阻挡作用增大，但却有利于少子的漂移运动，使PN结中形成了由少子漂移运动产生的反向电流，因少子浓度有限，所以反向电流很小，即呈现高阻特性。当温度一定时，由本征激发产生的少子浓度是一定的，故少子形成的漂移电流基本上与所加反向电压的大小无关，是恒定的，称这个电流为反向饱和电流 I_s 。在近似分析中， I_s 可以忽略不计，认为PN结反偏时处于截止状态，如图1-8所示。

上述分析表明, PN 结外加正向电压时, 空间电荷区变窄, 呈现较小的正向电阻, 具有较大的正向扩散电流, 处于导通状态; 外加反向电压时, 空间电荷区变宽, 呈现较大的反向电阻, 具有很小的反向漂移电流, 处于截止状态, 这种特性称为 PN 结的单向导电性。

(3) PN 结的伏安特性

理论分析表明, 流过 PN 结的电流与 PN 结两端电压之间的关系为:

$$I = I_S (e^{\frac{qu}{kT}} - 1) = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-2)$$

其中, I_S 为反向饱和电流 (安); $U_T = kT/q$ 称为温度电压当量; k 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度; q 为电子电量; 在室温下 (300K) $U_T \approx 26\text{mV}$ 。把式 (1-2) 绘成曲线, 称为 PN 结的伏安特性曲线, 如图 1-9 所示。

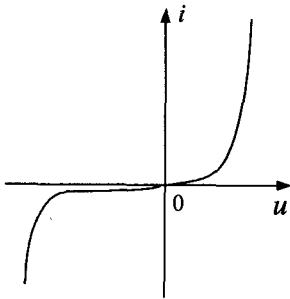


图 1-9 PN 结的伏安特性

由 PN 结伏安特性曲线可知: 当 PN 结外加正向电压, 且 u 大于 U_T 几倍以上时, 则 $e^{\frac{u}{U_T}} \gg 1$, 于是 $I \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$, 即正向电流随外加电压按指数规律增加; 当 PN 结外加反向电压, 在 $|u|$ 大于 U_T 几倍以上时, 则 $e^{\frac{u}{U_T}} \approx 0$, 于是 $I \approx -I_S$, 即反向电流是一个不随外加电压变化的常数。但反向电流是由少数载流子漂移形成的, 它受温度或光照影响较大, 在使用时, 必须考虑外界环境对反向电流的影响。

3. PN 结的反向击穿

当 PN 结反向电压增加到一定数值时, 反向电流急剧增大, 这种反向电流急剧增大的现象称为 PN 结反向击穿, 对应于电流开始急剧增大的电压称为击穿电压。产生 PN 结电击穿的原因是在强电场作用下, 大大地增加了自由电子和空穴的数目, 引起电流的急剧增加, 这种现象的产生分为雪崩击穿和齐纳击穿两种类型。

(1) 雪崩击穿

若 PN 结掺杂浓度低, 当反向电压较高时, 空间电荷区较宽, 内电场较强, 在 PN 结内, 漂移运动的少数载流子受强电场的作用, 获得的动能增大, 漂移速度加快。在运动过程中少数载流子与共价键中的价电子发生碰撞, 使原子的价电子挣脱束缚状态而形成电子—空穴对。新产生的自由电子在强电场的作用下, 再去碰撞其他原子, 产生更多的电子空穴对, 如此下去, 使耗尽层中载流子的数量急剧增加, 反向电流迅速增大, 即形成了载流子像雪崩似的倍增效应, 这种现象称为雪崩击穿。雪崩击穿的本质是碰撞电离。

(2) 齐纳击穿

齐纳击穿发生在掺杂浓度较高的 PN 结中, 因掺杂浓度高, 耗尽层宽度较窄, 在不太大的反向电压下 (一般为几伏), 就可在耗尽层中形成很强的电场, 它可直接破坏共价键结构, 使价电子脱离共价键束缚, 产生电子—空穴对, 致使电流急剧增大, 这种击穿称为齐纳击穿。

齐纳击穿电压较低, 雪崩击穿电压较高。对硅材料而言, 击穿电压在 4V 以下的多为齐纳击穿; 击穿电压在 7V 以上的多为雪崩击穿; 击穿电压在 4V~7V 之间, 两种击穿都

有可能。PN 结在击穿后，并不一定就损坏，只要有一定的限流措施，PN 结击穿后就不会因电流大而产生过热导致损坏。当降低反向电压后，PN 结特性仍能恢复到击穿前的状况。但如果击穿后的反向电流过大，使 PN 结过热将损坏 PN 结。通常把前一种可恢复的击穿称为电击穿，后一种不可恢复的击穿称为热击穿。

4. PN 结的电容效应

PN 结的电容效应按其形成的原因不同，可分为势垒电容和扩散电容。

(1) 势垒电容

在耗尽层中，存储有一定数量的正负离子，当外加电压变化时，就会引起空间正负离子数的变化，这种现象与电容的充放电过程相同。耗尽层电荷量随外加电压的变化而变化的电容效应称为势垒电容，用 C_b 表示。势垒电容只有在外加电压发生变化时才起作用，外加电源频率越高，其电容效应越强。势垒电容具有非线性，外加反向电压越高， C_b 越小，外加正向电压越大， C_b 越大。势垒电容随外电压变化如图 1-10 所示。

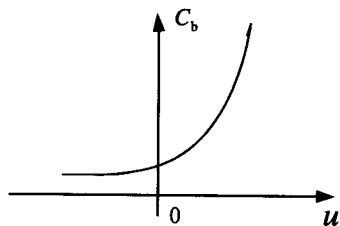


图 1-10 势垒电容与电压的关系

(2) 扩散电容

当 PN 结外加一定的正向电压时，PN 结导通，形成较大的正向电流，这时 P 区和 N 区的多数载流子就会在扩散过程中越过 PN 结，到达另一方而成为少数，这些少数载流子在扩散中逐渐复合消失。刚扩散过来的电子（空穴）就堆积在 PN 结的附近，在靠 PN 结交界面的地方浓度高，在远离交界面的地方浓度低，且浓度由高向低逐渐衰减，形成一定的浓度梯度，当外加正向电压增大时，正向电流也增大，有更多的载流子扩散到对方区域，即在对方区域有更多的少数载流子积累。反之当正向电压减小时，对方区域内积累的少数载流子也减少，这种因外加电压的改变引起 PN 结两侧电荷的积累和释放过程，与电容充放电过程相同，称这种电容效应为扩散电容 C_d 。扩散电容示意图如图 1-11 所示。 C_d 也具有非线性，它与流过 PN 结的正向电流成正比。

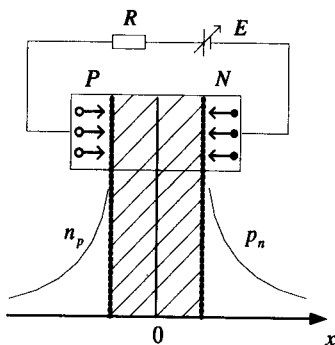


图 1-11 扩散电容示意图

非线性，它与流过 PN 结的正向电流成正比。

PN 结的结电容 C_j 包括结电容 C_b 和扩散电容 C_d 两部分，即：

$$C_j = C_b + C_d$$

在外加电压频率较低时，PN 结的结电容较小，可以忽略不计，但在高频应用时，要考虑 PN 结结电容 C_j 的影响。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构类型

在 PN 结的两端分别引出一个电极，外加管壳封装即构成半导体二极管。其中接在 P