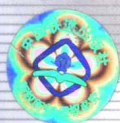




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校计算机基础教育规划教材

模拟电子技术

董秀峰 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校计算机基础教育规划教材

模拟电子技术

董秀峰 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书是按照高等学校计算机类专业的要求编写的。主要内容有半导体器件、基本放大器、负反馈放大器、模拟集成电路、低频功率放大器、信号产生电路和直流稳压电源。本书注重基础知识的论证,强化集成电路的应用,大幅度删减了分离元件的电路分析和“基础性”较差的内容。本书论述精细,适宜学生自学,有助于“多媒体”教学方式。讲完全部内容约需要 60 学时。

本书可作为高等学校计算机类专业及相关专业本科生或专科生的“模拟电子技术”、“模拟电子线路”、“线性电子线路”和“低频电子线路”等课程的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/董秀峰编著. —北京:中国铁道出版社, 2006. 11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-113-07325-5

I. 模... II. 董... 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(2006)第 085166 号

书 名: 模拟电子技术

作 者: 董秀峰

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑: 严晓舟 秦绪好

责任编辑: 苏 茜 翟玉峰 王春霞

特邀编辑: 李红玉

封面设计: 薛 为

封面制作: 白 雪

责任校对: 康珊珊

印 刷: 北京市新魏印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 401 千

版 本: 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1~5 000 册

书 号: ISBN 7-113-07325-5/TP·2010

定 价: 22.00 元

版权所有 侵权必究

本书封面贴有中国铁道出版社激光防伪标签, 无标签者不得销售

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社计算机图书批销部调换。

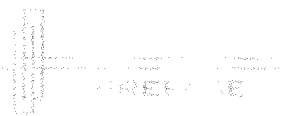
高等学校计算机基础教育规划教材

主 任：冯博琴（西安交通大学 教授）

委 员：（按姓氏字母为序）

段 富	（太原理工大学	教授）
甘 勇	（郑州轻工业学院	教授）
耿国华	（西北大学	教授）
管会生	（兰州大学	教授）
李振坤	（广东工业大学	教授）
李志蜀	（四川大学	教授）
李雁翎	（东北师范大学	教授）
刘东升	（内蒙古师范大学	教授）
裴喜春	（内蒙古农业大学	教授）
石 冰	（山东大学	教授）
武 波	（西安电子科技大学	教授）
张毅坤	（西安理工大学	教授）
邹北骥	（中南大学	教授）

序



1997 年教育部高教司颁发的“加强非计算机专业计算机基础教学工作的几点意见”（简称 155 号文件）中提出的要求已经达到，各校的计算机基础教学条件明显改善，计算机基础教学进入了一个新阶段。

本届非计算机专业计算机基础课程教学指导分委员会按照高教司指示，分析了当前高校遇到的计算机基础教学的新形势，根据人才培养的基本要求，针对计算机基础教学中普遍存在的问题，提出了 3 个文件：“关于进一步加强高等学校计算机基础教学的意见”（俗称白皮书）、白皮书的附件“计算机基础教学内容的知识结构与课程设置”和“高等学校非计算机专业计算机基础课程教学基本要求”。在附件中提出了“1+X”的课程设置方案，即 1 门“大学计算机基础”（必修）加上几门核心课程（必修或选修）。

白皮书及附件自 2003 年底在高校征求意见以来，受到了普遍的关注，在高校中引起了巨大反响。特别是 2005 年 4~5 月教指委在全国 19 个省进行了白皮书的巡讲活动，参会学校 641 所，教师达 1 269 人，从问卷调查结果数据看，对白皮书内容同意的占 81.16%，基本同意但有异议的占 9.36%，很有问题不同意的占 0.22%，未发表意见的占 9.26%，可见白皮书已得到大多数一线教师的认同。教指委将根据征求到的意见做进一步的修改，不久将正式发布。无疑它将直接影响今后高校计算机基础教学的整体架构，也将推动新一轮的计算机基础教材的面世。

中国铁道出版社是国内实力雄厚的大社，近年对计算机教材的出版颇为关注，最近又以其敏锐的眼光和雄伟的魄力，怀着为计算机基础教学做出贡献的责任感，遵循白皮书提出的理念和教学基本要求，2004 年在全国范围内邀请计算机基础教学一线教师，组织编写“1+X”中规定的 6 门核心课程及其若干门整合课程，争取在一两年内出版。本丛书按照白皮书对教材建设所提出的建议，努力在以下几个方面做出特色：

- 对于核心课程的教材，要体现课程内容的基础性和系统性；基本概念、基本技术与方法的讲解力求准确明晰。
- 体现非计算机专业计算机基础教材特点，重在应用。内容要激发学生的学习兴趣、通俗易懂、理论联系实际，每一门课都要使学生真正学到一点有用知识和技术。
- 保证教材内容的先进性，特别对于技术性、应用性的内容更是如此。
- 重视实验教材的建设，重点教材都要配备实验教材。

我们希望本丛书的出版对推动高校计算机基础教学有所帮助，并在使用中不断改进，恳请读者不吝指正。

冯博琴

2005 年 7 月

冯博琴，西安交通大学教授，博士生导师，兼任教育部 2001 年~2005 年高校计算机科学与技术教学指导委员会副主任、非计算机专业计算机课程教学指导分委员会主任委员，全国计算机基础教育研究会副会长，陕西省计算机教育研究会理事长。



前言

本教材是按照高等学校计算机类专业的“模拟电子技术”教学大纲编写的。可用做高校“模拟电子技术”、“模拟电子线路”、“线性电子线路”以及“低频电子线路”等课程的教科书，讲完全书约需要 60 学时。

“模拟电子技术”是一门基础课。因此，作者在编写本教材时，并不苛求学术上的“高、尖、全”，而是竭尽全力讲清基本概念、基本原理、基本分析方法和基本应用。在取材上，以满足后期课程的需要为准则，同时也注意反映当前电子技术的发展状况。大幅度删减了分离元件的电路分析和那些“基础性”较差、对初学者来说难度较大的内容，强化了集成电路的应用。在论述方法上，充分考虑了初学者的思维特点，对基础知识和重要内容的论述不惜笔墨。因此，本教材非常适合学生自学，也能较好地适应当前流行的“多媒体”教学方式。

本教材与当前流行的同类教材相比较，在内容上有如下变动：

- “放大器的频率特性”只做了定性论述和简单计算，删除了严谨的数学分析。
- “负反馈放大器”删除了分离元件构成的强负反馈放大器的增益计算。这是因为在实践中，都使用集成放大器，而集成放大器的闭环指标计算，在“模拟集成电路”一章中有详细论述。
- “负反馈放大器的自激振荡”移到“正弦振荡电路”一节中，因为学生学过正弦振荡原理后，很容易理解负反馈放大器在高频区或低频区可能产生的自激振荡。
- “运算放大器”一章改为“模拟集成电路”。重点论述“运算放大器”和“集成乘法器”的外部特性以及它们在各个领域的应用。其内部电路除差动放大器外，其他部分全部删除。
- “功率放大器”重点讲述 OCL 电路和集成功率放大器，简单介绍 OTL 电路。
- “直流稳压电源”简化了分离元件的串联型稳压器的论述，加强了集成稳压器和开关型稳压电源的论述。
- “信号产生电路”重点讲述计算机应用系统中常用的 RC 桥式正弦振荡器、石英晶体正弦振荡器以及矩形波产生电路。对于 LC 正弦波振荡器只做了简单介绍。

西安电子科技大学计算机学院的江晓安教授、李伯成教授、周端教授、吴自力教授以及电子工程学院的张企民教授在本书的编写过程中，给予了热情的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

敬请各位老师和同学以及广大读者对本书的不足之处给予批评指正。

编 者

2006 年 8 月

西安电子科技大学计算机学院

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 掺杂半导体	3
1.2 PN 结与二极管	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的偏置方式	5
1.2.3 PN 结的单向导电特性	5
1.2.4 PN 结的击穿特性	7
1.2.5 PN 结的电容效应	7
1.2.6 常用二极管	7
1.2.7 其他二极管	11
1.3 晶体三极管	13
1.3.1 三极管的结构及工作状态	14
1.3.2 三极管的电流放大特性（以 NPN 管为例）	14
1.3.3 三极管的伏安特性曲线	17
1.3.4 三极管的主要参数	19
1.3.5 三极管的温度特性	21
1.4 场效应管	22
1.4.1 结型场效应管（JFET）	22
1.4.2 绝缘栅场效应管（IGFET）	25
1.4.3 各种场效应管的符号及特性比较	28
1.4.4 场效应管的主要参数	28
1.4.5 场效应管的温度特性	30
本章小结	30
习 题	32
第 2 章 基本放大器	35
2.1 放大器概述	35
2.1.1 放大器的构成原则	35
2.1.2 晶体管的工作点	36
2.1.3 放大器的主要指标	36
2.1.4 直流通路和交流通路	37
2.1.5 放大器的分析方法	37
2.2 放大器的图解法分析	38
2.2.1 静态分析	38

2.2.2 动态分析.....	40
2.3 偏置电路的解析法分析.....	44
2.3.1 固定偏置电路.....	45
2.3.2 电流负反馈偏置电路.....	45
2.3.3 分压式电流负反馈偏置电路.....	46
2.4 放大器的动态解析法分析.....	48
2.4.1 晶体管放大状态下的低频简化微变等效电路.....	48
2.4.2 三种基本放大器的动态分析.....	50
2.5 场效应管放大器.....	62
2.5.1 静态分析.....	62
2.5.2 动态分析.....	66
2.5.3 FET 放大器与 BJT 放大器的性能比较.....	71
2.6 多级放大器.....	72
2.6.1 级间耦合方式.....	72
2.6.2 多级放大器的主要指标.....	76
2.7 放大器的频率特性概述.....	78
2.7.1 频率失真(线性失真).....	79
2.7.2 单级阻容耦合共射极放大器的频率特性.....	80
2.7.3 变压器耦合放大器的频率特性.....	84
2.7.4 直接耦合放大器的频率特性.....	84
2.7.5 多级放大器的幅频特性.....	85
2.7.6 晶体管的高频参数.....	86
本章小结.....	86
习 题.....	89
第 3 章 负反馈放大器	95
3.1 反馈的基本概念.....	95
3.1.1 什么是反馈.....	95
3.1.2 反馈放大器的基本关系式.....	96
3.1.3 反馈机理.....	96
3.1.4 反馈类型及其判定方法.....	97
3.1.5 反馈放大器的四种基本组态.....	102
3.2 负反馈对放大器性能的影响.....	107
3.2.1 负反馈使放大器的增益降低.....	107
3.2.2 负反馈可以提高被取样的输出信号的稳定性.....	108
3.2.3 负反馈可以提高放大倍数的稳定性.....	108
3.2.4 负反馈可以展宽通频带.....	109
3.2.5 负反馈可以减小反馈环路内产生的非线性失真和噪声.....	110
3.2.6 负反馈可以改变输入电阻.....	111
3.2.7 负反馈可以改变输出电阻.....	112

本章小结	114
习 题	115
第 4 章 模拟集成电路	119
4.1 差动放大器	119
4.1.1 典型差动放大器	119
4.1.2 带有恒流源的差动放大器	124
4.1.3 带有调零电路的差动放大器	126
4.1.4 差动放大器的四种接法	127
4.2 集成运算放大器	128
4.2.1 运放概述	129
4.2.2 运放在模拟信号运算中的应用	136
4.2.3 运放在电压比较器中的应用	150
4.2.4 运放的其他应用电路	162
4.3 集成模拟乘法器	164
4.3.1 模拟乘法器的信号通道及电路符号	165
4.3.2 主要参数	165
4.3.3 乘法器的应用	166
本章小结	168
习 题	169
第 5 章 低频功率放大器	177
5.1 功率放大器概述	177
5.1.1 功率放大器的特点	177
5.1.2 放大器的分类	178
5.2 双电源互补对称电路	179
5.2.1 电路结构	179
5.2.2 工作原理	180
5.2.3 指标计算	181
5.2.4 元件选择原则	183
5.2.5 乙类互补对称电路存在的问题及克服的措施	184
5.2.6 复合管互补对称电路	185
5.3 单电源互补对称电路	187
5.4 集成功率放大器介绍	188
5.4.1 通用型集成功率放大器 LM386	188
5.4.2 BiMOS 集成功率放大器	189
5.4.3 桥式互补对称电路	190
5.5 功率放大器应用中的几个问题	191
5.5.1 功放管的散热	191
5.5.2 晶体管的二次击穿	191
5.5.3 功放管的保护	192

本章小结	192
习 题	194
第 6 章 信号产生电路	197
6.1 正弦波产生电路	197
6.1.1 振荡原理、组成与指标	197
6.1.2 RC 串并联式正弦振荡器	199
6.1.3 LC 正弦振荡器	202
6.1.4 石英晶体正弦振荡器	206
6.1.5 负反馈放大器中的自激振荡	210
6.2 矩形波产生电路	210
6.2.1 电路结构	210
6.2.2 工作原理	211
6.2.3 主要指标	212
6.2.4 占空比可调的矩形波产生电路	213
6.3 三角波产生电路	214
6.3.1 工作原理	214
6.3.2 主要指标	215
本章小结	216
习 题	219
第 7 章 直流稳压电源	223
7.1 单相整流电路	223
7.1.1 单相桥式全波整流电路	224
7.1.2 倍压整流电路	226
7.2 滤波电路	227
7.2.1 电容滤波电路	227
7.2.2 电感滤波电路	230
7.2.3 复式滤波电路	230
7.3 稳压电路	232
7.3.1 稳压电路的主要指标	232
7.3.2 稳压二极管稳压电路（并联型稳压电路）	233
7.3.3 串联型稳压电路	235
7.4 集成三端稳压器	237
7.5 开关型稳压电源	240
本章小结	243
习 题	244
附录 A 半导体器件型号命名方法（国家标准 GB249—74）	246
附录 B 常用半导体器件的参数	248
参考文献	257

第1章 半导体器件

教学目的

- ☑ 了解半导体的导电特性。
- ☑ 理解 PN 结的形成机理，掌握 PN 结的主要特性。
- ☑ 理解 BJT 和 FET 的工作原理，掌握其主要特性及参数。

作为半导体器件的使用者，最关心的是器件的外部特性，但是，为了正确地使用这些器件，也必须对其内部结构及工作原理有适当的了解。因此，本章首先讲述 PN 结的形成及其特性，然后再介绍二极管、三极管、场效应管的结构、工作原理、外部特性及参数。

1.1 半导体

在电子技术领域，常用的半导体材料有硅（Si）和锗（Ge）。它们都是四价元素，在元素表中分别是 14 号和 32 号元素。某一元素的导电特性主要与其价电子有关，因此，四价原子的结构图如图 1-1 所示。惯性核由内层电子和原子核构成，+4 代表原子核中的质子带的正电荷与内层电子带的负电荷互相抵消后对外呈现的电荷数。

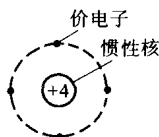


图 1-1 四价原子结构简化图

1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体的晶体结构

纯净而且结构完整的半导体称为本征半导体，它未经人为的改造，具有这种元素的本来特征。硅和锗都是晶体结构，经过“提纯”和“拉单晶”两种工艺后，即可成为纯净的、结构完整的单晶体。在单晶体中，各原子的间距很小，各个价电子不仅受到自身原子核的束缚，而且还受到相邻原子的吸引，使得每个价电子的运动轨迹发生了交叠，各个价电子不再只绕着自身的原子核运动，而是绕着两个相邻的原子核运动，如图 1-2（a）所示，这种现象称为价电子的共有化运动。价电子的共有化运动，使得两个原子之间产生一种束缚作用，这种束缚作用把两个原子紧紧地连接在一起。我们把价电子的共有化运动形成的束缚作用称为共价键，图 1-2（b）是其示意图，两个原子间的虚弧线代表共价键，其中的两个黑点代表参与共有化运动的两个价电子，称之为价键电子。由于价键电子受两个原子核的约束，而价电子只受一个原子核的约束，所以，价键电子比价电子更稳定。

每个硅或锗原子都有四个价电子，它们可以与相邻的四个原子形成完整的共价键。从

而使半导体的所有原子通过共价键的作用，紧密地结合在一起，形成一个坚固的晶体，如图 1-3 所示。

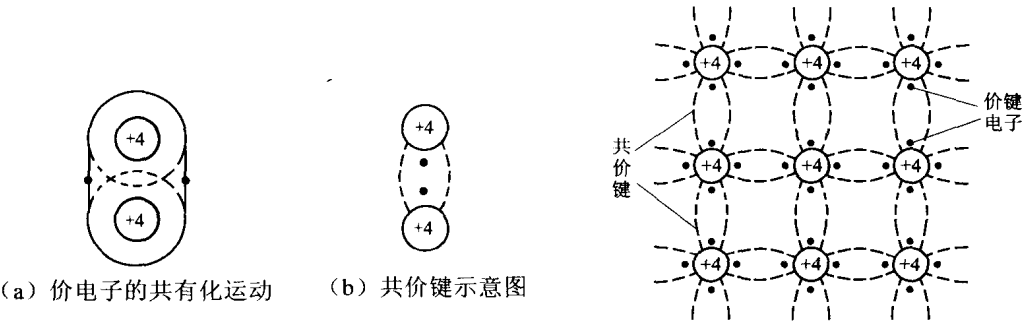


图 1-2 价电子的共有化及共价键

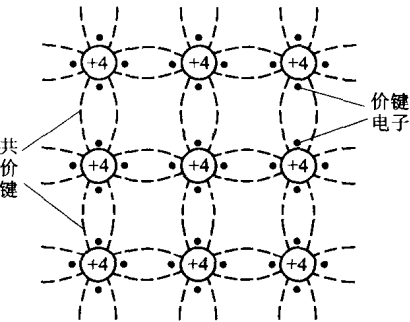


图 1-3 本征半导体的晶体结构示意图

2. 本征半导体的导电特性

在电场力的作用下，能做定向运动的带电粒子称为载流子。物质的导电能力取决于该物质的载流子浓度。

在绝对零度时，半导体所有的价电子都被束缚在共价键中，不能参与导电。此时半导体相当于绝缘体。当温度逐渐升高时，原子的热运动会逐渐加强，价键电子从原子热运动中吸取的能量也逐渐增大。在常温范围内，有少量的价键电子可以从原子的热运动中获得足够的能量，挣脱共价键的束缚离开共价键，成为自由电子。同时在原共价键处出现一个空位，称之为空穴。由于空穴所在处失去了一个带负电荷的电子，所以对外呈现一个单位的正电荷，我们把该正电荷看作是空穴所具有的。半导体内出现空穴后，价键电子就有了活动余地。当有外加电场作用时，价键电子会逆着电场的方向依次填补空穴，从而使空穴顺着电场的方向运动。既然空穴带有正电荷，又能在外加电场的作用下做定向运动，所以空穴是载流子。可见，本征半导体中有自由电子和空穴两种载流子，如图 1-4 所示。图中的空心圈代表空穴，键外的黑点代表自由电子。

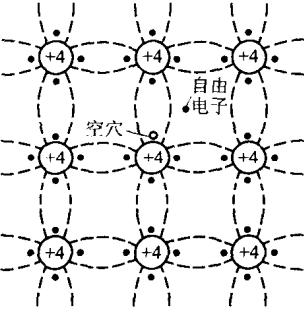


图 1-4 本征半导体的自由电子和空穴

上述价键电子吸收热能激发为自由电子，同时生成一个空穴的过程称为热激发。另外还有光激发、电磁激发等。半导体受外界能量的激励，使自由电子和空穴成对地产生的过程称为本征激发。

在本征半导体中，本征激发使自由电子和空穴的浓度逐渐升高；另一方面，自由电子在运动过程中，不断地与其他粒子碰撞，会使其能量逐渐减小，当其能量衰减到一定程度

时,会被带正电荷的空穴吸引,重新与空穴结合成完整的共价键,这一过程称为复合。显然,复合会使自由电子和空穴成对地消失。当温度一定并且无其他能量激励时,自由电子和空穴的产生与复合会达到动态平衡,此时,单位时间内有多少自由电子和空穴产生,同时就有多少自由电子和空穴因复合而消失,使本征半导体的载流子浓度基本不变。在本征半导体中,因为自由电子和空穴的产生与复合总是成对地进行,所以其自由电子浓度和空穴浓度始终相等。

常温下,本征半导体中只有极少量的价键电子(每 10^{12} 个硅原子中有一个;每 10^9 个锗原子中有一个)被激发为自由电子,所以,本征半导体在常温下的载流子浓度很低,导电能力很弱。温度升高,热激发加剧,载流子浓度升高,导电能力增大;温度降低,热激发减弱,复合加强,载流子浓度下降,导电能力减小。本征半导体的导电性能对温度变化的敏感性,会严重影响半导体器件的热稳定性。

1.1.2 掺杂半导体

在本征半导体中,掺入微量的五价或三价元素,会使其导电性能发生显著变化。掺入的五价或三价元素称为杂质。掺有杂质的半导体称为掺杂半导体或杂质半导体,按掺入杂质元素不同掺杂半导体有N型半导体和P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,如磷、砷、锑等,就形成N型半导体。由于掺入的五价元素微量,所以,半导体的晶体结构基本不变,只是在个别的位置上,某个硅(或锗)原子被五价原子取代,如图1-5所示。五价原子有五个价电子,它与相邻的四个硅(或锗)原子构成完整的共价键后,还剩余一个价电子。这个剩余的价电子,被搁置在共价键之外,只受自身原子核的束缚。常温下,它所具有的能量足以挣脱其原子核的束缚,成为自由电子,同时使五价原子成为正离子,这一过程称为五价原子电离。由于五价原子能施舍出一个电子,故称之为施主杂质,其电离过程称为施主电离,由此生成的正离子称为施主离子。施主离子虽然带有一个单位的正荷,但是,它不能在整个半导体中自由运动,所以,它不是载流子,不能参与导电。

在本征半导体中掺入五价元素后,热激发照样进行。可见,在掺有五价元素的半导体中,自由电子来源于施主电离和热激发两个物理过程,而空穴只来源于热激发。另外,由于自由电子浓度的增加,使空穴被复合的机会增多,因此,当达到平衡状态时,自由电子的浓度就远远大于空穴的浓度,其导电能力主要由自由电子决定,即这种半导体属于负电荷导电类型,故称为N型半导体。在N型半导体中,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。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素,如硼、铝、镓等,就形成P型半导体。由于掺入的三价元素微量,所以,半导体的晶体结构基本不变,只是在个别的位置上,某个硅(或锗)原子被三价原子取代,如图1-6所示。三价原子只有三个价电子,它与相邻的四个硅(或锗)原子只能构成三个完整的共价键,还有一个共价键因缺少一个价电子而出现一个空位。常温下,所有的价键电子都具有足够的能量来填补这个空位,从而产生一个空穴,同时使三价原子接受一个电子变为负离子,这一过程称为三价原子电离。由于三价原子在电离过程中接受

电子,故称之为受主杂质,其电离过程称为受主电离,由此生成的负离子称为受主离子。由于受主离子不能在整个半导体中自由运动,所以它不是载流子,不能参与导电。

在掺有三价元素的半导体中,也存在热激发,所以空穴来源于受主电离和热激发两个物理过程,而自由电子只来源于热激发。并且,由于空穴浓度的增加,使自由电子被复合的机会增大,因此,当达到平衡状态时,必然使空穴的浓度远远大于自由电子的浓度,其导电能力主要由空穴决定,即这种半导体属于正电荷导电类型,故称为P型半导体。在P型半导体中,多数载流子是空穴,少数载流子是自由电子。

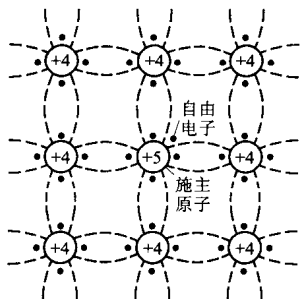


图 1-5 N 型半导体晶体结构示意图

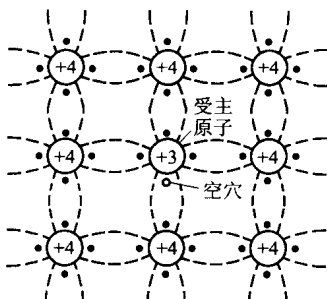


图 1-6 P 型半导体晶体结构示意图

3. 掺杂半导体的温度特性

掺杂半导体中的多数载流子主要来源于杂质电离,其次来源于热激发。但是,由热激发产生的载流子数量微小,通常只有前者的百万分之一,其影响可以忽略。所以,掺杂半导体的多子浓度,主要由杂质电离产生的载流子浓度决定。常温下,掺入的杂质原子全部可以电离,因此,当环境温度在常温范围内变化时,由杂质电离产生的载流子数量不会变化。由此可知,掺杂半导体的多数载流子浓度受温度的影响很小,主要由掺杂浓度决定。

掺杂半导体中的少数载流子完全由热激发产生。温度发生变化,热激发与复合的程度都会随之变化,因此,掺杂半导体中的少子浓度受温度的影响很大。

1.2 PN 结与二极管

在一块半导体晶片上,利用特殊的掺杂工艺,使其一边形成P型,另一边形成N型,则在两者的交界处,会形成一个特殊的区域,称之为PN结。PN结是构成半导体器件的基本单元。

1.2.1 PN 结的形成

当P型半导体与N型半导体紧密地结合在一起时,由于在交界面两侧,空穴与自由电子都存在着很大的浓度差。因此,两者都必将产生扩散运动,P区的多子空穴向N区扩散,并且与N区的自由电子复合;N区的多子自由电子向P区扩散,并且与P区的空穴复合,如图1-7(a)所示。上述扩散的结果为:在P区一侧,因失去部分空穴而显露出不能自由移动的受主负离子;在N区一侧,因失去部分自由电子而显露出不能移动的施主正离子。显露出来的这些正、负离子称为空间电荷。空间电荷占有的区域称为空间电荷区。P区一侧的空间电荷全部是负极性的,N区一侧的空间电荷全部是正极性的。而且,空间电荷不

能自由移动, 所以, 这些空间电荷必然形成一个电场, 称之为自建电场、内建电场或势垒电场。其方向是由 N 型区指向 P 型区。该电场使空穴由 N 区向 P 区漂移 (电场力使载流子产生的运动称为漂移); 使自由电子由 P 区向 N 区漂移。显然, 自建电场对载流子的作用力和浓度差对载流子的作用力方向相反。因此, 自建电场对多子的扩散运动起阻碍作用。开始, 自建电场较弱, 不足以阻止多子的扩散。但是, 随着多子的不断扩散, 显露出来的空间电荷逐渐增多, 自建电场逐渐增强, 对多子扩散的阻碍作用也逐渐增大。当自建电场力等于浓度差产生的扩散力时, 多子的扩散被阻止 (这时, 单位时间内, 有多少载流子扩散到空间电荷区, 同时就有多少载流子被自建电场原路推回)。空间电荷的数量不再变化, 空间电荷区的宽度也不再变化, 这样 PN 结便形成了, 如图 1-7 (b) 所示。

由于空间电荷区中没有长时间存留的载流子, 所以称之为耗尽层。又因为空间电荷区内的自建电场对于多子的扩散运动像一个电势壁垒一样起阻挡作用, 所以又称之为阻挡层或势垒区。

掺杂浓度相同的 P 型与 N 型半导体形成的 PN 结, 其界面两边的耗尽层宽度相等, 称为对称结, 如图 1-7 (b) 所示。掺杂浓度不同的 P 型与 N 型半导体形成的 PN 结, 其界面两边的耗尽层宽度不相等, 称为不对称结, 记作 P^+N 或 PN^+ 。 P^+ 表示 P 区的掺杂浓度高 (或称 P 区是重掺杂区)。重掺杂区的耗尽层宽度要比轻掺杂区的耗尽层宽度窄, 如图 1-8 所示。

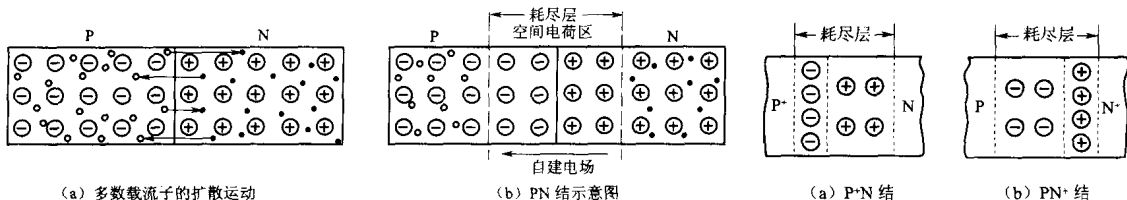


图 1-7 PN 结的形成

图 1-8 不对称 PN 结

1.2.2 PN 结的偏置方式

由于 PN 结的耗尽层中几乎无载流子, 所以呈现出很大的电阻。当 PN 结接有外加电压时, 外加电压几乎全部降落在耗尽层两端。

若外加电压使 PN 结的 P 区电位高于 N 区电位, 则称 PN 结被正向偏置, 简称 PN 结正偏。其端电压称为正向偏置电压, 简称正偏压或正向电压。这种偏置方式也称做: 给 PN 结加正向电压。

若外加电压使 PN 结的 P 区电位低于 N 区电位, 则称 PN 结被反向偏置, 简称 PN 结反偏。其端电压称为反向偏置电压, 简称反偏压或反向电压。这种偏置方式也称做: 给 PN 结加反向电压。

若外加电压使 PN 结的 P 区电位和 N 区电位相等, 则称 PN 结被零偏置, 简称 PN 结零偏。这种情况, 相当于没有给 PN 结加电压。

1.2.3 PN 结的单向导电特性

PN 结的偏置方式不同, 表现出的特性也不同。

1. PN 结的正偏特性

PN 结正偏时, 外加正向电压在势垒区形成的电场与势垒区的自建电场方向相反, 使自建电场的一部分被抵消, 空间电荷减少, 阻挡层变窄, 对多子扩散的阻碍作用减弱。因此, PN 结两边的多子, 在浓度差的作用下做扩散运动, 连续不断地穿过阻挡层, 在外加电源的作用下, 流出外电路, 形成正向电流 I_F , 如图 1-9 (a) 所示。

小功率的 PN 结, 其自建电场很小, 一般不超过 1V, 所以, 外加较小的正向电压, 就可以使自建电场明显地减弱, 从而产生较大的正向电流。当外加正向电压有较小的变化时, 也会使正向电流产生较大的变化。

当 PN 结正偏并且有较大的正向电流流过时, 称 PN 结处于正向导通状态。

2. PN 结的反偏特性

PN 结反偏时, 外加反向电压在势垒区形成的电场与势垒区的自建电场方向相同, 使自建电场加强, 空间电荷增多, 阻挡层变宽, 对多子扩散的阻碍作用增强, 多子的扩散运动被阻止, 不能参与导电。但是, 外加反向电压和势垒区的强大自建电场, 会推动 PN 结两边的少数子做漂移运动穿越阻挡层, 然后在外加电源的作用下流出外电路, 形成反向电流 I_s , 如图 1-9 (b) 所示。反向偏置电压在一个较大范围内变化时, 反向电流基本不变, 故反向电流也常称做反向饱和电流, 记作 I_s 。由于少数子浓度很低, 所以由此形成的反向电流很小 (硅 PN 结的 I_s 约为几微安, 锗 PN 结的 I_s 为几十微安左右), 通常可视之为零。PN 结的这种工作状态也叫做反向截止状态。温度变化会使少数子浓度发生变化, 因此, 由少数子形成的反向电流也必然随温度变化。

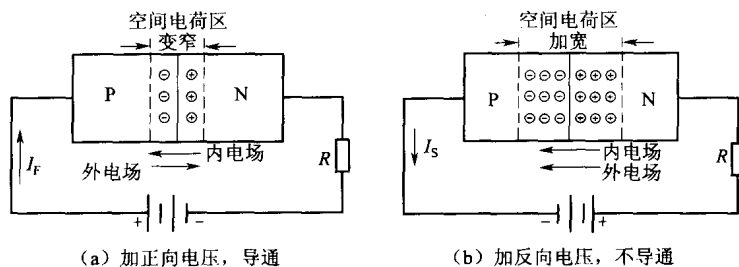


图 1-9 PN 结的单向导电特性

综上所述, 当 PN 结正偏时, 有较大的电流流过 PN 结; PN 结反偏时, 流过 PN 结的电流几乎为零。即 PN 结只允许电流沿着一个方向流通。这一特性称做 PN 结的单向导电特性。

由半导体物理学可知, 室温下流过 PN 结的电流 i_D 与其端电压 u_D 之间的关系为

$$i_D = I_s \left(e^{\frac{u_D}{0.026V}} - 1 \right) \quad (\text{安培}) \quad (1-1)$$

式中, i_D 与 u_D 的参考方向都是由 P 区指向 N 区。 I_s 是 PN 结的反向饱和电流, 其大小与 PN 结的材料、制作工艺、温度等有关, 与外加电压无关。0.026V 是常温 (27°C) 时的热电压当量。 $u_D > 0$ 时, PN 结正偏, i_D 是正向电流; $u_D < 0$ 时, PN 结反偏, i_D 是反向电流。该关系式, 没有考虑 P 区和 N 区的体电阻的影响。

1.2.4 PN 结的击穿特性

PN 结反偏时, 若其反偏压在一定范围内变化, 则其反向电流基本保持一个较小的值不变。但是, 当反偏压超过某一个值后, 反向电流会急剧增大, 这种现象称做 PN 结被击穿。PN 结发生击穿时的反偏压称为 PN 结的击穿电压, 记作 U_{BR} 。造成 PN 结击穿的机理有以下两种。

1. 雪崩击穿

在反偏的 PN 结中, 少子穿越势垒区时, 会受到自建电场的加速作用, 从而动能增强。反偏压越大, 则势垒区越宽, 自建电场越强, 少子穿越势垒区时, 受到的加速时间越长, 同时受到的加速力也越大, 从而少子的动能也就越大。当反偏压增大到某一个值时, 少子的动能就会增大到足以把共价键中的电子撞击出来, 使之成为自由电子, 同时生成一个空穴。新产生的自由电子和原有的少子, 经自建电场再次加速后, 又会撞击出新的自由电子和空穴, 如此循环往复, 于是耗尽层内载流子的浓度猛增, 使反向电流急剧增大。这种现象与雪崩类似, 故称为雪崩击穿。雪崩击穿主要发生在耗尽层较宽的 PN 结中。

2. 齐纳击穿

势垒区较窄的 PN 结, 少子穿越时, 受的加速时间很短, 其动能不足以把共价键中的电子撞击出来, 但是, 由于势垒区较窄, 较小的反偏压就能使势垒区内形成很强的电场, 增大反偏压, 势垒区内的电场也随之增大。当反偏压增大到某一个值时, 势垒区内的电场强度就会增大到足以把共价键中的电子直接拉出来, 从而在耗尽层内产生大量的自由电子和空穴, 使反向电流急剧增大, 这种击穿称为场致击穿。齐纳先生首先对这种击穿做了解释, 故又称为齐纳击穿。齐纳击穿主要发生在耗尽层较窄的 PN 结中。

PN 结击穿时, 只要限制击穿电流在允许的范围内, 就不会损坏 PN 结。反偏压减小后, PN 结会退出击穿状态。

PN 结击穿后, 其单向导电特性被破坏, 并且, 电流过大还会使之烧坏, 因此, 除利用击穿特性外, 都应避免 PN 结发生击穿。

1.2.5 PN 结的电容效应

PN 结的耗尽层中, 几乎没有载流子, 其电阻率很高, 相当于一种绝缘介质。而 P 区和 N 区的电导率很高, 相当于两个导电板。因此, 从结构上看, PN 结相当于两个导电板之间夹着一层绝缘介质, 与普通的平板电容器非常相似。当 PN 结两端接有交变电压时, 必定呈现出一定程度的电容效应, 称之为 PN 结的结电容, 记作 C_j 。其容量在几皮法到几百皮法之间。

若外加电压变化, PN 结的耗尽层宽度就会变化, 相当于两个导电板的间距发生变化, 因此, C_j 也随之变化, 所以, C_j 是非线性电容。

1.2.6 常用二极管

二极管的种类很多, 其中最常用的是专门利用 PN 结单向导电特性的二极管。本节主要讲述这种管子的特性及其应用。

1. 二极管的结构及电路符号

PN 结装上外壳和电极即构成二极管。图 1-10 (a)、(b)、(c) 是几种常用二极管的外