

▶▶ 高等学校应用型本科“十三五”规划教材

机 电
MECHATRONICS

计 算 机
COMPUTER

电 子
ELECTRONICS

电子技术基础

▶▶ 主 编 韩东宁
副主编 于秀明 李居尚 战荫泽

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

电子技术基础

主 编 韩东宁

副主编 于秀明 李居尚 战荫泽

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是非电类专业基础课教材，全书共 8 章。内容包括模拟电子技术和数字电子技术两大部分。

本书作为应用型本科教材在内容上注重充分联系实际，分析讲解简洁流畅，概念清晰。具体内容包括：半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、半导体存储器和可编程逻辑器件、数/模与模/数转换器。在各章节后配有习题，以便学生理解巩固所学知识。

本书专业适用面较广，可面向非电类专业工科学生，亦可供工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础/韩东宁主编. —西安：西安电子科技大学出版社，2017.3
高等学校应用型本科“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5606-4475-2

I. ① 电… II. ① 韩… III. ① 电子技术—教材 IV. ① TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 053532 号

策划编辑 井文峰 陈 欣

责任编辑 王 斌 马武装

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)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 19.5

字 数 459 千字

印 数 1~3000 册

定 价 42.00 元

ISBN 978-7-5606-4475-2/TN

XDUP 4767001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

西安电子科技大学出版社

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

编审专家委员会名单

主任：鲍吉龙(宁波工程学院副院长、教授)

副主任：彭 军(重庆科技学院电气与信息工程学院院长、教授)

张国云(湖南理工学院信息与通信工程学院院长、教授)

刘黎明(南阳理工学院软件学院院长、教授)

庞兴华(南阳理工学院机械与汽车工程学院副院长、教授)

电子与通信组

组长：彭 军(兼) 张国云(兼)

成员：(成员按姓氏笔画排列)

王天宝(成都信息工程学院通信学院院长、教授)

安 鹏(宁波工程学院电子与信息工程学院副院长、副教授)

朱清慧(南阳理工学院电子与电气工程学院副院长、教授)

沈汉鑫(厦门理工学院光电与通信工程学院副院长、副教授)

苏世栋(运城学院物理与电子工程系副主任、副教授)

杨光松(集美大学信息工程学院副院长、教授)

钮王杰(运城学院机电工程系副主任、副教授)

唐德东(重庆科技学院电气与信息工程学院副院长、教授)

谢 东(重庆科技学院电气与信息工程学院自动化系主任、教授)

湛腾西(湖南理工学院信息与通信工程学院教授)

楼建明(宁波工程学院电子与信息工程学院副院长、副教授)

计算机大组

组长：刘黎明(兼)

成员：(成员按姓氏笔画排列)

刘克成(南阳理工学院计算机学院院长、教授)

毕如田(山西农业大学资源环境学院副院长、教授)

向 毅(重庆科技学院电气与信息工程学院院长助理、教授)

李富忠(山西农业大学软件学院院长、教授)

张晓民(南阳理工学院软件学院副院长、副教授)

何明星(西华大学数学与计算机学院院长、教授)

范剑波(宁波工程学院理学院副院长、教授)

赵润林(山西运城学院计算机科学与技术系副主任、副教授)

黑新宏(西安理工大学计算机学院副院长、教授)

雷 亮(重庆科技学院电气与信息工程学院计算机系主任、副教授)

“电子技术基础”是一门重要的专业基础课。当今电子技术发展迅速，新器件、新技术、新应用不断涌现，为适应独立学院教学改革的需要，体现与时俱进的特点，在本书编写时我们尽量做到内容讲述浅一点、宽一点、严谨一点、先进一点，以便于学生自学和掌握，同时注意吸收前瞻性应用内容，便于学生学习新概念和新知识。本书是在参阅大量电子技术教材的基础上，根据应用型人才培养的特点精心编写而成的。

本书共分为 8 章，内容包括模拟电子技术和数字电子技术两大部分。模拟电子技术部分主要围绕放大电路展开讲解，放大电路是一切功能电路的基础；数字电子技术部分主要围绕组合逻辑电路和时序逻辑电路展开讲解，内容丰富，重点鲜明，侧重应用。本书内容设计结合了工科非电类专业的特点和授课时数，每节配有“练习与思考”，每章配有习题，方便教学。

本书由长春理工大学光电信息学院韩东宁担任主编，于秀明、李居尚、战荫泽担任副主编。具体编写分工为：韩东宁负责全书的修改和定稿，于秀明编写第 1 章、第 2 章，李居尚编写第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章，战荫泽编写第 7 章、第 8 章和前言。

周志国教授作为本书的主审，对本书的内容进行了认真细致的审阅，并提出了诸多宝贵意见。本书在编写过程中参考了大量文献资料，在此对这些文献的作者表示诚挚的谢意。此外，本书得到了长春理工大学光电信息学院各级领导和相关部门的大力支持与帮助，在此也向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现疏漏和不妥之处，敬请广大读者指正。

编 者

2017 年 1 月

第1章 半导体器件	1	1.8.3 结型场效应管的结构和类型	28
1.1 半导体材料	1	1.8.4 场效应管使用注意事项	31
1.1.1 本征半导体	1	1.9 常用新型半导体器件	31
1.1.2 杂质半导体	2	1.9.1 静电感应晶体管(SIT、BSIT)	31
1.2 PN结的形成及特性	3	1.9.2 晶闸管	32
1.2.1 PN结的形成	3	习题	33
1.2.2 PN结的单向导电性	4		
1.3 PN结的反向击穿	5	第2章 基本放大电路	36
1.4 半导体二极管	6	2.1 概述	36
1.4.1 二极管的结构与类型	6	2.1.1 放大器的用途与分类	36
1.4.2 二极管的伏安特性	6	2.1.2 放大器的主要性能指标	36
1.4.3 二极管的主要参数	7	2.2 共射极放大电路	38
1.4.4 二极管使用注意事项	8	2.2.1 共射极放大电路的组成	39
1.5 二极管的分析方法及应用	8	2.2.2 共射极放大电路的工作原理	39
1.5.1 二极管的分析方法	8	2.3 放大电路的分析	40
1.5.2 二极管的简化模型	9	2.3.1 静态分析法	40
1.5.3 二极管的应用	10	2.3.2 动态分析法	41
1.6 特殊二极管	14	2.3.3 静态工作点对非线性失真的影响	44
1.6.1 稳压二极管	14	2.4 温度对静态工作点的影响	45
1.6.2 变容二极管	16	2.4.1 放大电路静态工作点的稳定	46
1.6.3 双向二极管	16	2.4.2 动态性能的分析	47
1.6.4 肖特基二极管	16	2.5 共集电极放大电路	49
1.6.5 光电子器件	16	2.5.1 共集电极放大电路的组成	49
1.7 双极型三极管(BJT)	18	2.5.2 共集电极放大电路分析	49
1.7.1 BJT的结构及符号	18	2.6 共基极放大电路	51
1.7.2 三极管的电流分配与放大作用	18	2.6.1 共基极放大电路的组成	51
1.7.3 三极管的特性曲线	20	2.6.2 共基极放大电路分析	51
1.7.4 三极管的主要参数	22	2.6.3 三极管三种基本放大电路的 性能比较	52
1.7.5 温度对三极管参数及特性的影响	24	2.7 放大电路的频率响应	53
1.8 单极性三极管场效应管(FET)	25	2.8 多级放大电路	55
1.8.1 绝缘栅型场效应管(MOSFET)	25	2.8.1 多级放大电路的耦合方式	56
1.8.2 绝缘栅型场效应管的主要参数	27		

2.8.2 多级放大电路的性能分析	57	3.7.2 高通滤波电路(HPF)	112
2.9 绝缘栅型场效应管放大电路	58	3.7.3 带通滤波电路(BPF)	112
2.9.1 共源极放大电路的组成	58	3.7.4 带阻滤波电路(BEF)	113
2.9.2 共源极放大电路分析	58	3.8 电压比较器	113
2.10 功率放大电路	60	3.8.1 单值电压比较器	113
2.10.1 功率放大电路的特点	61	3.8.2 滞回电压比较器	115
2.10.2 功率放大电路的工作 状态与效率	61	3.8.3 集成电压比较器	116
2.10.3 射极输出器	62	3.9 波形发生电路	118
2.10.4 乙类双电源互补对称功率 放大电路	63	3.9.1 正弦波振荡电路	118
2.10.5 甲乙类互补对称功率放大电路	64	3.9.2 RC 正弦波振荡电路	120
2.10.6 集成功率放大器	65	3.9.3 LC 正弦波振荡电路	123
习题	67	3.9.4 石英晶体振荡电路	126
		3.9.5 非正弦波发生电路	129
		3.9.6 集成函数发生器	131
		习题	134
第3章 集成运算放大器及其应用	71		
3.1 概述	71	第4章 直流稳压电源	140
3.1.1 集成运放的结构特点和分类	71	4.1 整流电路	140
3.1.2 集成运放的主要性能指标	73	4.1.1 单相半波整流电路	140
3.2 直接耦合放大器	75	4.1.2 单相桥式整流电路	141
3.3 差动放大电路	76	4.2 滤波电路	144
3.4 集成运放的理想模型	80	4.2.1 电容滤波电路	144
3.4.1 理想集成运放的电压传输特性	80	4.2.2 电感滤波电路	146
3.4.2 理想集成运放的性能指标	81	4.2.3 复式滤波电路	146
3.4.3 理想集成运放工作在线 性区的特点	81	4.3 稳压电路	147
3.4.4 理想集成运放工作在线 性区的特点	82	4.3.1 并联型稳压电路	147
3.4.5 集成运放的正确使用	82	4.3.2 串联型稳压电路	149
3.5 负反馈放大电路	84	4.3.3 集成稳压器	150
3.5.1 概述	84	4.4 串联式开关型稳压电源	155
3.5.2 反馈的概念	84	4.5 采用集成 PWM 电路的开关电源	156
3.5.3 反馈的类型及判别	86	习题	159
3.5.4 负反馈的四种组态	90		
3.5.5 负反馈对放大电路性能的影响	94	第5章 门电路和组合逻辑电路	162
3.6 集成运放在信号运算电路中的应用	100	5.1 逻辑代数与逻辑函数	162
3.6.1 比例运算电路	100	5.1.1 逻辑代数与逻辑函数概述	162
3.6.2 加法运算电路	102	5.1.2 逻辑运算	163
3.6.3 减法运算电路	104	5.1.3 逻辑代数的公理与定理	165
3.6.4 积分运算电路	105	5.1.4 逻辑函数的基本定理	166
3.6.5 微分运算电路	107	5.1.5 逻辑函数的表示方法	167
3.7 有源滤波电路	108	5.1.6 逻辑函数的标准形式	169
3.7.1 低通滤波电路(LPF)	109	5.1.7 逻辑函数的化简	171
		5.1.8 具有无关项的逻辑函数及 其化简	174

5.2 逻辑门电路	175	6.6.4 单稳态触发器及由 555 定时器构成的单稳态触发器	260
5.2.1 半导体二极管、三极管和场效应管的开关特性	176	6.6.5 多谐振荡器及由 555 定时器构成的多谐振荡器	262
5.2.2 分立元件门电路	177	习题	264
5.2.3 TTL 门电路	178	第 7 章 半导体存储器和可编程逻辑器件	270
5.2.4 ECL 门电路	184	7.1 半导体存储器	270
5.2.5 MOS 门电路	185	7.2 只读存储器	270
5.3 组合逻辑电路的分析与设计	191	7.2.1 掩模只读存储器(ROM)	270
5.3.1 组合逻辑电路的结构	191	7.2.2 可编程只读存储器(PROM)	272
5.3.2 组合逻辑电路的分析	191	7.2.3 可擦除可编程只读存储器(EPROM)	273
5.3.3 组合逻辑电路的设计	196	7.3 随机存取存储器	275
5.3.4 常用组合逻辑器件	199	7.3.1 静态随机存储器(SRAM)	275
5.3.5 组合逻辑器件的应用	219	7.3.2 动态随机存储器(DRAM)	276
习题	221	7.4 可编程逻辑器件	279
第 6 章 触发器和时序逻辑电路	227	7.4.1 可编程阵列逻辑器件(PAL)	280
6.1 概述	227	7.4.2 通用阵列逻辑器件(GAL)	281
6.2 锁存器和触发器	227	7.4.3 复杂可编程逻辑器件(GPLD)与现场可编程门阵列(FPGA)	282
6.2.1 基本 R-S 锁存器	227	7.5 可编程逻辑器件的开发	282
6.2.2 同步 R-S 锁存器	230	习题	283
6.2.3 D 锁存器	231	第 8 章 数/模与模/数转换器	284
6.2.4 主从 J-K 触发器	232	8.1 概述	284
6.2.5 T 触发器	234	8.2 数/模转换器	284
6.2.6 维持阻塞 D 触发器	235	8.2.1 权电阻网络数/模转换器	284
6.2.7 集成触发器	237	8.2.2 倒 T 形电阻网络数/模转换器	285
6.3 时序逻辑电路的分析与设计	238	8.2.3 权电流型数/模转换器	288
6.3.1 概述	238	8.2.4 数/模转换器的转换精度与转换速度	289
6.3.2 时序逻辑电路分析	239	8.3 模/数转换器	290
6.3.3 时钟同步状态机的设计	243	8.3.1 模/数转换的基本原理	290
6.4 寄存器和移位寄存器	246	8.3.2 直接 A/D 转换器	293
6.5 计数器	248	8.3.3 间接 A/D 转换器	297
6.5.1 同步计数器	249	8.3.4 模/数转换器的转换精度与转换速度	300
6.5.2 异步二进制计数器	250	习题	301
6.5.3 异步 N 进制计数器	251	参考文献	302
6.6 555 定时器及其应用	254		
6.6.1 555 定时器的电路结构	254		
6.6.2 555 定时器的引脚用途及工作原理	255		
6.6.3 施密特触发器及由 555 定时器构成的施密特触发器	256		

第1章 半导体器件

半导体器件是现代电子技术的重要组成部分,由于它具有体积小、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的应用。

本章首先简单介绍半导体的基本知识,接着讨论半导体器件的基础——PN结,了解二极管、稳压管、三极管和场效应管的基本构造、工作原理和特性曲线,理解主要参数的意义以及二极管基本电路及其分析方法与应用;在此基础上,对齐纳二极管、变容二极管和光电子器件的特性与应用也做了简要的介绍。

1.1 半导体材料

根据导电性能的不同,自然界中的许多不同物质大体可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。将导电能力强、电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为导体,如金属材料;将导电能力弱、电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为绝缘体,如塑料、橡胶、陶瓷等材料;将导电能力介于导体和绝缘体之间的、电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围的物质称为半导体。在电子器件中,常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等。其中硅是最常用的一种半导体材料。由于半导体材料的导电能力会随着温度的变化、光照或掺入杂质的多少发生明显的变化,因此半导体材料广泛应用于电子器件的制作。这是半导体不同于导体的特殊性质。为了了解这些特点,我们必须了解半导体的结构。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是纯净的不含杂质的、结构完整的半导体晶体。硅和锗是四价元素,原子的最外层轨道上有4个电子,称为价电子。原子呈中性,故正离子用带圆圈的+4符号表示。硅(或锗)原子结构简化模型如图1-1所示。

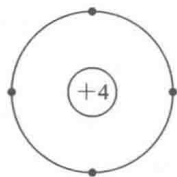


图 1-1 硅(或锗)原子结构简化模型

硅(或锗)均具有晶体结构,原子在空间形成规则的晶体点阵,每个原子最外层的价电子不仅受到自身原子核的束缚,同时还受到相邻原子核的吸引,因此,价电子不仅围绕自身的原子核运动,同时也出现在相邻原子核的轨道上。于是两个相邻的原子共用一对价电子,即形成了晶体中的共价键结构,如图1-2所示。由于每一个原子的最外层被共价键所束缚,形成稳定结构,因此半导体不能传导电流。

半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中的束缚那么紧。硅和锗晶体在外界激发的情况下,如常温(300 K)下,少数价电子获得能量脱离共价键的束缚成为自由电子。这些自由电子很容易在晶体内运动,如图1-3所示,这种现象称为本征激发。

当电子脱离共价键束缚成为自由电子后,在共价键中留下一个空位,称为空穴(如图1-3所示)。空穴是半导体区别于导体的一个特点。

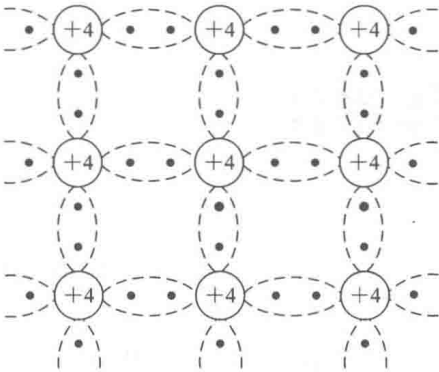


图 1-2 硅和锗晶体的共价键结构

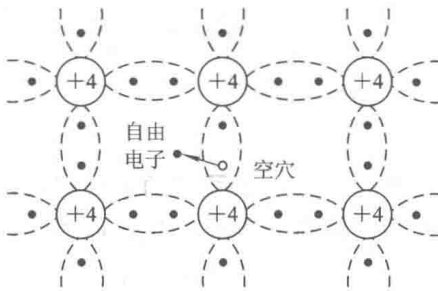


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

共价键中有了空穴，邻近共价键中的价电子很容易过来填补这个空穴，这样空穴便转移到邻近共价键中。新的空穴又会被邻近的价电子填补。带负电荷的价电子依次填补带正电荷的空穴的运动。

由此可见，本征半导体中存在着两种运载电荷的粒子(即载流子)：带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。在本征半导体中，热激发产生的自由电子和空穴是成对出现的，电子和空穴又可能重新结合而成对消失，这称为复合。在一定温度下自由电子和空穴维持一定的浓度。载流子的浓度越高，晶体的导电能力越强。本征半导体的导电率随温度的增加而增加。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体在室温下导电能力很差，掺入少量杂质，半导体的导电性能将会发生显著的变化。根据掺入杂质的不同，杂质半导体分为 N(电子)型半导体和 P(空穴)型半导体。

1. N(电子)型半导体

在硅(或锗)的晶体内掺入少量五价元素杂质，如磷、砷、锑等，因其原子最外层有 5 个价电子，故在构成的共价键结构中，存在多余的价电子而产生大量自由电子，这就是 N 型半导体，如图 1-4 所示。磷原子在掺入硅晶体后产生多余的电子，称为施主原子或 N 型杂质。在 N 型半导体中，自由电子的数量远远高于空穴的数量，因此自由电子称为多数载流子(简称多子)，而空穴为少数载流子(简称少子)。N 型半导体主要靠自由电子导电，掺入的杂质越多，自由电子的浓度越高，导电性能就越强。

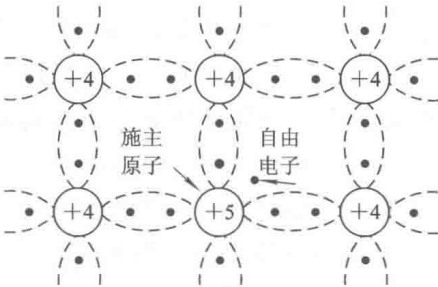


图 1-4 N 型半导体

2. P(空穴)型半导体

在硅(或锗)中掺入硼、铝等三价元素，其原子最外层只有 3 个价电子，在与周围硅(或

锗)原子组成共价键时,因缺少一个价电子而形成一个空位。在室温下,硅(或锗)共价键上的价电子填补硼原子的空位,形成空穴运动,这就是P型半导体,如图1-5所示。硼原子在硅(或锗)晶体中接受电子,称为受主原子或P型杂质。其中空穴的数量远远多于自由电子的数量,所以空穴为多数载流子(多子),而自由电子是少数载流子(少子)。P型半导体主要靠空穴导电,掺入的杂质越多,空穴的浓度越高,导电性能就越强。

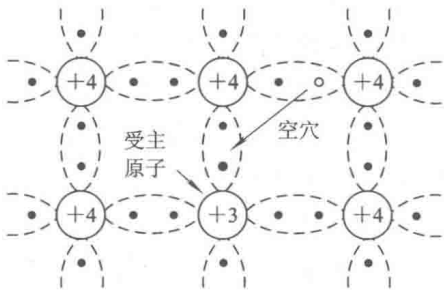


图 1-5 P 型半导体

【练习与思考】

- 1. 什么是本征激发? 什么是复合?
- 2. 半导体和导体的导电机理有什么不同?
- 3. 什么是 N 型半导体? 什么是 P 型半导体?

1.2 PN 结的形成及特性

载流子在内电场的作用下的定向运动称为漂移;载流子从高浓度区域向低浓度区域的运动称为扩散。

1.2.1 PN 结的形成

在半导体两个不同区域内分别掺杂三价和五价杂质元素,形成P区和N区。在它们的交界面就会出现空穴和电子的浓度差。P区的空穴浓度高,N区的电子浓度高。电子和空穴都要向浓度低的一侧扩散。P区的空穴向N区扩散,N区的电子向P区扩散,PN结的形成如图1-6所示。多数载流子扩散到对方就被复合了,使P区和N区的交界面原来的电中性被

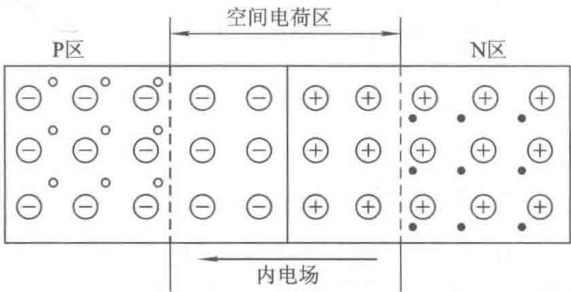


图 1-6 PN 结的形成

破坏。在 P 区和 N 区交界处剩下了不能移动的带负电的杂质离子和不能移动的带正电的杂质离子。这些带电离子不能任意移动，因此不参与导电。这些不能移动的带电粒子在 P 区和 N 区交界面，形成了一个很薄的空间电荷区，即 PN 结。空间电荷区的多数载流子扩散到对方并复合掉，或者说在扩散过程中被消耗尽了，也把空间电荷区称为耗尽层。

多子的扩散运动，在出现空间电荷区以后，由于正负离子之间的相互作用，在空间电荷区会形成一个电场，方向从 N 区指向 P 区。电场是由 PN 结内部产生的，不是外加电压形成的，称为内电场。内电场的建立阻碍多子扩散运动，使多子扩散运动逐渐减弱。

同时，内电场使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移，形成定向漂移运动。内电场越强，漂移运动越强，扩散运动反而减弱，最后形成一个动态平衡，空间电荷区的厚度、内电场的大小都不再发生变化。

综上所述，扩散运动和漂移运动是互相联系又互相对立的。扩散使空间电荷区不断加宽，内电场加强；内电场的加强使漂移运动增强，而漂移使空间电荷区变窄，内电场减弱，扩散运动又不断加强。当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时，将形成一个稳定的空间电荷区，称为势垒区。

1.2.2 PN 结的单向导电性

当稳定的 PN 结无外加电压时，多子的扩散运动和少子的漂移运动处于动态平衡状态，通过 PN 结的电流为零。只有在外加电压时，才会打破平衡，当外加不同电压时，PN 结的导电特性完全不同，即 PN 结是单向导电的。

1. 外加正向电压

PN 结外加正向电压 U_S (即正向偏置)，如图 1-7 所示， U_S 的正极接 P 区，负极接 N 区。此时，外电场方向与内电场方向相反，内电场被削弱，扩散增强，漂移减弱，因此空间电荷区变窄，PN 结中形成了以扩散电流为主的正向电流 I_F 。由于多子的数量较多，所以 I_F 较大，因而电阻的阻值减小，PN 结处于正向导通状态。

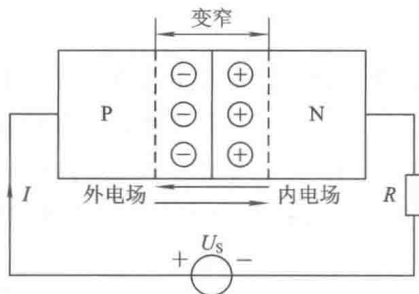


图 1-7 PN 结外加正向电压

2. 外加反向电压

PN 结外加反向电压 U_S (即反向偏置)，如图 1-8 所示， U_S 的正极接 N 区， U_S 的负极接 P 区。此时，外加电场与空间电荷区的内电场方向一致，同样会导致扩散运动与漂移运动的平衡状态被打破。内电场加宽，阻碍多子的扩散运动，使少子漂移运动加强，形成由 N 区流向 P 区的反向电流 I_R ，少数载流子在一定温度下的浓度很少，所以 I_R 是很微弱的，一般硅管

只有微安级,PN结呈现出高电阻状态。由于少子是本征激发产生的,其浓度几乎只与温度有关,而与外加电压 U_s 无关。因此,当外加反向电压大于一定值后,反向电流 I_R 就不会再随反向电压的增加而增大了,这时的电流 I_R 称为反向饱和电流 I_S 。

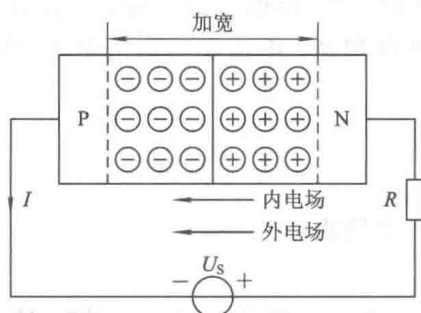


图 1-8 PN 结外加反向电压

可见,PN结在反向偏置时基本不导电,处于反向截止状态。

由此可见,当PN结加正向电压时,处于导通状态,电阻值很小,有较大的正向电流 I_F 通过;当PN结加反向电压时,处于截止状态,反向电阻值很大,电流 I_R 很小,这就是它的单向导电性。

【练习与思考】

1. 什么是PN结?
2. 什么是PN结的单向导电性?

1.3 PN 结的反向击穿

PN结处于反向偏置时,在一定的电压范围内,流过PN结的电流很小,但反向电压增大到一定数值时,反向电流急剧增加,这个现象称为PN结反向击穿。

发生击穿所需的反向电压 U_{BR} 为反向击穿电压。反向击穿分为电击穿和热击穿,电击穿包括齐纳击穿和雪崩击穿,对于硅材料的PN结,当 U_{BR} 大于 7 V 时为雪崩击穿,当 U_{BR} 小于 4 V 时为齐纳击穿。 U_{BR} 在 4~7 V 时两种击穿都有。

PN结产生击穿的原因是,当加反向电压很高时,PN结会产生很大电场,共价键被破坏,阻挡层内中性原子的价电子被拉出,产生大量电子-空穴对,在电场作用下,电子移向N区,空穴移向P区,使PN结反向电流增加,这种击穿称为齐纳击穿。齐纳击穿需要在高掺杂的PN结中发生。

PN结产生击穿的另一个原因是,当PN结反向电压增加时,空间电荷区的内电场也增强。在强电场作用下,少子漂移运动动能加大,通过空间电荷区时,与中性原子发生碰撞,打破了共价键的束缚,形成新的电子-空穴对,这种现象称为碰撞电离。新产生的电子-空穴对在强电场作用下,和原有的电子-空穴对一样获得足够能量,继续碰撞电离,再产生新电子-空穴对,如此反复,使载流子数目倍增,这就是倍增效应。PN结的反向电流急剧增大,这种击穿称为雪崩击穿。雪崩击穿发生在掺杂浓度较低、外加反向电压较高的情况下。

齐纳击穿是一种场效应击穿，多用于特殊二极管中，如齐纳二极管(稳压管)。雪崩击穿是一种碰撞击穿，一般整流二极管掺杂浓度低，其击穿多是雪崩击穿。

电击穿过程是可逆的，当加在 PN 结的反向电压降低后，PN 结仍可恢复到原来的状态。但反向电压过高，反向电流过大时，PN 结的结温上升，一直升温不降而烧毁，就会使 PN 结的电击穿转化为热击穿而造成永久损坏。电击穿与热击穿往往同时存在，电击穿可被人们利用，而热击穿要尽量避免。

【练习与思考】

雪崩击穿和齐纳击穿各有什么特点？

1.4 半导体二极管

1.4.1 二极管的结构与类型

半导体二极管也称为晶体二极管，简称二极管，是非线性半导体器件。二极管按材料不同可分为硅(Si)二极管和锗(Ge)二极管；按结构不同可分为点接触型和面接触型。半导体二极管结构如图 1-9 所示。将 PN 结用外壳封装，P 区引出阳极(用符号 A 或 a 表示)，N 区引出阴极(用符号 K 或 k 表示)，这样就构成了二极管。由于 PN 结具有单向导电性，因此二极管也具有单向导电性。图 1-10 中所示箭头为正电流方向。

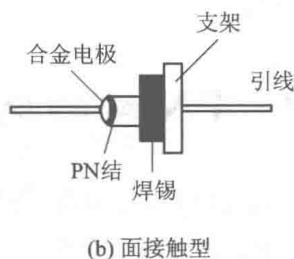
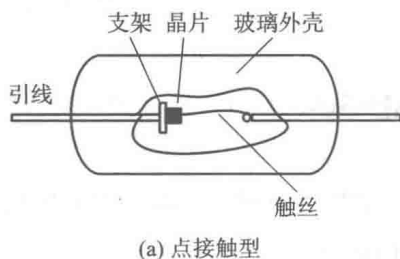


图 1-9 半导体二极管结构



图 1-10 二极管符号

点接触型二极管的 PN 结面积很小，因此其结电容也很小，但不能承受高的反向电压和大的电流。它适用于高频电路和脉冲数字电路，也可用于小电流整流。例如，2AP1 是点接触型锗二极管，最大整流电流为 16 mA，最高工作频率是 150 MHz。

面接触型(或称为面结型)二极管的 PN 结面积大，能承受较大正向电流，但极间结电容也大。它不适宜应用在高频电路中，常用于低频整流电路。例如，2CP1 为面接触型硅二极管，最大整流电流为 400 mA，最高工作频率只有 3 kHz。

1.4.2 二极管的伏安特性

二极管两端电压与流过二极管电流的关系称为二极管的伏安特性。二极管的伏安特性直观地表现了二极管的单向导电性。图 1-11 所示为二极管的伏安特性曲线与符号表示，曲线对应的函数为

$$i_D = I_S(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式中, i_D 为通过二极管的电流; I_S 为二极管反向饱和电流; U_D 为二极管的外加电压; U_T 为温度的电压当量, 常温下取 $U_T = 26 \text{ mV}$ 。

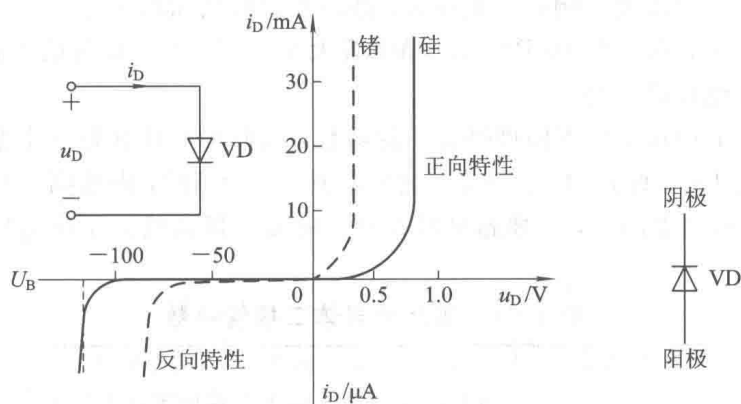


图 1-11 二极管的伏安特性曲线与符号表示

1. 正向特性

当外加电压很小时, 外电场很小, 不足以克服 PN 结的内电场, 故这时的正向电流很小, 几乎为零。此时的 PN 结呈现为大电阻。这时的电压称为死区电压 (U_{th}) 或门槛电压。 U_{th} 的大小与材料和温度有关, 通常硅管的 U_{th} 约为 0.5 V , 锗管的 U_{th} 约为 0.1 V 。继续增加正向电压, 内电场被大大削弱, 电流迅速增长, 电压与电流关系呈现指数关系。二极管正向导通, 呈低阻状态, 管压降很小。硅管的管压降约为 $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$, 锗管的管压降约为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。图 1-11 所示, 当温度升高时, 正向特性曲线将向上移动, 如这说明在 u_D 一定时, i_D 将增加。

2. 反向特性

在反向电压作用下, P 型和 N 型半导体中的少数载流子通过 PN 结, 形成反向饱和电流。由于少子的数目很少, 因此反向电流很小, 如图 1-11 所示。一般硅管的反向电流比锗管小很多。当温度升高时, 反向饱和电流也随之增加。

3. 反向击穿特性

当反向电压继续升高, 超过反向击穿电压 (U_{BR}) 以后, 反向电流急剧增大, 这种现象称为二极管的反向击穿, 如图 1-11 所示。普通二极管被击穿后会过热而烧坏, 发生热击穿。特殊二极管可工作在此区域, 发生电击穿。

1.4.3 二极管的主要参数

为了合理选择和正确使用二极管, 需要熟悉以下几个二极管的主要参数, 以满足工作需要:

(1) 最大整流电流 I_F 。它是指管子在工作时, 允许通过的最大正向平均电流值。使用时, 管子的平均工作电流要小于最大整流电流的一半。电流过大, 管子工作时可能会因 PN 结温升高而烧毁。例如, 2AP7 的最大整流电流为 12 mA 。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。它是指管子在使用时, 允许施加的最高反向电压。超过此值, 二极管就会发生反向击穿的危险。通常取反向击穿电压的一半作为 U_{RM} 。

(3) 反向击穿电压 U_{BR} 。它是指二极管反向击穿时的反向电压。例如, 2AP1 的 U_{BR} 为

40 V 左右， U_{RM} 约为 20 V。

(4) 反向电流 I_R 。它是指管子 in 常温下未发生击穿时的反向电流值，其值愈小，管子的单向导电性愈好。 I_R 受温度影响的变化较大，这一点要特别加以注意。

(5) 最高工作频率 f_M 。 f_M 由 PN 结的结电容大小决定。若二极管的工作频率超过该值，则二极管的单向导电性能变差。

一般半导体手册中都给出不同型号管子的参数，这些参数往往是一个范围值。国产半导体二极管参数如表 1-1 所示。由于制造工艺的限制，在使用时，即使同一型号的管子参数的分散性也很大。值得注意的是，不要超过最大整流电流和最高反向工作电压，否则管子容易损坏。

表 1-1 国产半导体二极管参数

	最大整 流电流 /mA	最高反 向工作 电压 /V	反向击穿电压 (反向电流为 400 μ A) /V	正向电流 (正向电压 为 1 V) /mA	方向电流(反 向电压分别为 10 V 和 100 V) / μ A	最高工 作频率 /MHz	极间电容 /pF
2AP1	16	20	≥ 40	≥ 2.5	≤ 250	150	≤ 1
2AP7	12	100	≥ 150	≥ 5	≤ 250	150	≤ 1

1.4.4 二极管使用注意事项

- (1) 半导体二极管在电路应用中要注意极性连接。
- (2) 避免靠近发热元件，保证散热良好。工作在高频或脉冲电路的二极管的引线要尽量短，不能用长引线或把引线弯成圈来达到散热目的。
- (3) 注意二极管的参数，不允许超过最大值。
- (4) 不允许不同材料的二极管互相替换。硅管和锗管不能互相代替。

【练习与思考】

- 1. 什么是死区电压？硅管和锗管的死区电压的典型值为多少？
- 2. 为什么二极管的反向电流具有饱和性？当温度升高时其饱和值又会增大？
- 3. 如何用指针式万用表欧姆挡判断二极管的极性 & 判断管子的好坏。

1.5 二极管的分析方法及应用

在电子电路中，最常用的半导体器件就是二极管。本节将重点介绍二极管的简化模型及二极管的单向导电性，实现并分析二极管典型电路，如整流电路、限幅电路、钳位电路、峰值采样电路等。

1.5.1 二极管的分析方法

从前面的分析可知，二极管是一种非线性器件，因此其电路的分析一般要采取非线性电路的分析方法，一般比较复杂。多采用图解法，但前提是已知二极管的 $V-I$ (伏安) 特性曲线。下面我们通过一个例子加以说明。

【例 1-1】 二极管电路如图 1-12(a)所示, 设二极管的 $V-I$ 特性如图 1-12(b)所示。已知电源 U_{DD} 和电阻 R , 求二极管的电压 u_D 和二极管电流 i_D 。

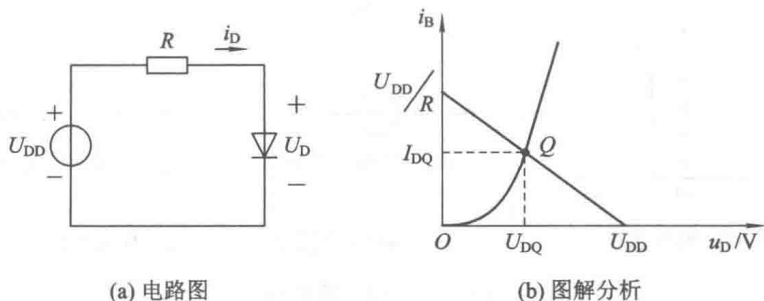


图 1-12 例 1-1 二极管电路

解 由电路的 KVL 方程可得

$$i_D = \frac{U_{DD} - u_D}{R} = -\frac{1}{R} u_D + \frac{1}{R} U_{DD} \quad (1-2)$$

由式(1-2)可在图 1-12(b)的坐标系中画出斜率为 $-1/R$ 的直线, 称为负载线。与二极管 $V-I$ 特性曲线的交点 Q 的坐标值 (U_D, I_D) 就是所求, 其中, Q 称为电路的工作点。

从此例可以看出, 用图解法求解比较直观简单。但前提是要已知二极管的 $V-I$ 特性曲线。这在实际的应用中是不现实的。所以图解法并不适用求解实际问题, 但对理解电路的工作原理和相关概念是有帮助的。

二极管的 $V-I$ 特性关系式 $i_D = I_S(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)$ 与式(1-2)联立, 也可求解出 U_D, I_D 。这种方法要求解指数方程, 称为代数法。代数法解方程的过程要复杂得多。显然也不实用。

在工程中, 常常利用二极管的简化模型代替其非线性特性, 分析二极管电路, 使分析更为简单。简化模型是工程近似分析方法。

1.5.2 二极管的简化模型

1. 理想模型

图 1-13 为理想二极管的 $V-I$ 特性曲线。由图可见, 当二极管加正向电压时, 二极管压降为 0 V 。当二极管加反向电压时电流为 0 A , 认为电阻无穷大。在实际电路中, 当电源电压远远大于二极管压降时, 用理想模型来近似分析是可以的。

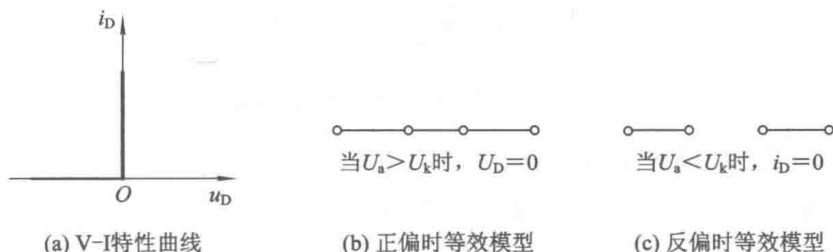


图 1-13 理想模型

2. 恒压降模型

恒压降模型如图 1-14 所示。当二极管加正偏电压时, 认为管压降是恒定不变的, 即不