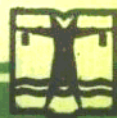


高等学校教材

电子技术基础简明教程

北京动力经济学院 张瑞华 主编



前 言

本书是根据1987年国家教育委员会颁发的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》编写的中等学时数教材。我们编写该书的目的是，希望改善国内中等学时数电子技术基础教材较少的情况。

本书是在总结多年教学实践经验的基础上编写而成的。初稿于1988年7月完成后，曾连续试用了五遍。这次公开出版又作了进一步的修订和补充。

本书可作为高等工业学校本科管理类、机电一体化类、机械类、计算机应用类和其它有关专业的教材，也可作为工程技术人员学习电子技术的参考书。

我们编写本书的原则是：①根据《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》精选教学内容，尽量做到简明而不浓缩；②根据电子技术的发展，努力更新教学内容，组成以集成电路为主的体系；③注意教学方法的改进，以达到既便于教师教学、又便于学生自学的目的。

本书的第二章、第四章和第五章由北京动力经济学院张瑞华和北京工业大学虞光楣共同编写，其它各章均由张瑞华编写。本书由张瑞华任主编，负责全部组织、修改和定稿工作。

国家教委工科电工课程教学指导委员会电子技术课程教学指导小组委员、清华大学教授阎石担任本书的主审，他在百忙中对书稿进行了非常认真负责的审查，并提出了不少宝贵的意见。阎石教授和国家教委工科电工课程教学指导委员会电工学课程教学指导小组委员、北京化工学院教授吕砚山为本书的出版给予了热情的推荐。我们向他们表示衷心的感谢。

我们对在本书编写和出版过程中给予热情帮助和支持的领导和同志们表示深切的谢意。

对于本书的不足和错误，敬请广大读者批评指正。

编者

1992年7月10日

目 录

前 言

第一章 半导体二极管和三极管	1
第一节 半导体的电特性	1
一、本征半导体 二、P型半导体和N型半导体	
第二节 PN结及其单向导电性	5
一、PN结的形成 二、PN结的单向导电性	
第三节 半导体二极管	7
一、半导体二极管的结构 二、半导体二极管的伏安特性 三、半导体二极管的主要参数	
第四节 硅稳压二极管	11
一、硅稳压二极管的工作原理 二、硅稳压二极管的主要参数	
第五节 半导体三极管	13
一、半导体三极管的结构 二、半导体三极管的电流分配和电流放大作用 三、半导体三极管的特性曲线	
四、半导体三极管的主要参数	
小结	24
习题	25
第二章 放大电路基础	28
第一节 共发射极基本放大电路的组成和工作原理简述	28
一、电路的组成 二、信号的放大过程 三、放大电路的简化和习惯画法	
第二节 分析放大电路的图解法	30
一、什么是分析放大电路的图解法 二、放大电路的两种工作状态 三、静态工作情况的分析 四、用图解法分析动态工作情况 五、放大电路的非线性失真 六、最大不失真输出电压幅值	
第三节 放大电路的微变等效电路分析法	39
一、为什么要提出微变等效电路法 二、半导体三极管的微变等效电路 三、应用微变等效电路法分析共发射极基本放大电路 四、放大电路的输入电阻和输出电阻 五、应用放大电路输入电阻的概念计算两级阻容耦合放大电路的电压放大倍数	
第四节 放大电路静态工作点的稳定	49
一、固定偏流放大电路的优缺点 二、温度变化对放大电路静态工作点的影响 三、发射极偏置放大电路	
第五节 放大电路的频率特性	56
一、放大电路频率特性的基本概念 二、RC网络的频率特性 三、单级共发射极放大电路频率特性的分析 四、多级放大电路的频率特性	
第六节 共集电极放大电路和共基极放大电路	66
一、共集电极放大电路 二、共基极放大电路	
第七节 功率放大电路	71
一、功率放大电路的特点 二、提高功率放大电路效率的方法 三、双电源乙类互补对称功率放大电路 四、双电源甲乙类互补对称功率放大电路 五、单电源甲乙类互补对称功率放大电路 六、采用复合管的互补对称功率放大电路 七、集成功率放大电路简介	

小结.....	81
习题.....	84
第三章 场效应管放大电路	90
第一节 结型场效应管.....	90
一、结型场效应管的结构 二、结型场效应管的工作原理 三、结型场效应管的特性曲线	
第二节 绝缘栅场效应管.....	94
一、结型场效应管存在的问题 二、N沟道增强型绝缘栅场效应管 三、N沟道耗尽型绝缘栅场效应管的工作特点	
第三节 场效应管的主要参数和使用注意事项.....	98
一、场效应管的主要参数 二、使用场效应管的注意事项	
第四节 场效应管基本放大电路.....	101
一、场效应管的直流偏置电路 二、确定静态工作点 三、场效应管放大电路的微变等效电路分析法	
小结.....	109
习题.....	110
第四章 集成运算放大器	113
第一节 概述.....	113
一、采用直接耦合放大电路的必要性 二、什么是集成运算放大器	
第二节 直接耦合放大电路的特殊问题.....	113
一、多级直接耦合放大电路的级间耦合方式 二、多级直接耦合放大电路的零点漂移现象	
第三节 差动放大电路.....	117
一、典型的差动放大电路 二、具有恒流源的差动放大电路 三、单端输入的差动放大电路	
第四节 集成运算放大器.....	125
一、集成运算放大器的特点 二、典型通用型集成运算放大器F007简介 三、集成运算放大器的主要参数	
四、集成运算放大器的低频等效电路 五、集成运算放大器的使用常识	
小结.....	138
习题.....	140
第五章 放大电路中的反馈	144
第一节 反馈的基本概念.....	144
一、问题的提出 二、反馈的基本概念	
第二节 负反馈放大电路的分类及判断方法.....	150
一、负反馈放大电路的四种类型 二、四种负反馈放大电路的实际电路及判断	
第三节 负反馈对放大电路性能的影响.....	159
一、降低放大电路的放大倍数 二、提高放大倍数的稳定性 三、减小非线性失真 四、展宽放大电路的通频带 五、抑制放大电路内部的噪声 六、负反馈对输入电阻和输出电阻的影响	
第四节 深度负反馈放大电路的近似计算.....	163
一、深度负反馈的特点 二、深度负反馈放大电路近似计算举例	
第五节 负反馈放大电路的自激振荡.....	167
一、产生自激振荡的原因 二、产生自激振荡的条件 三、消除自激振荡的方法	
小结.....	171
习题.....	172
第六章 集成运算放大器的应用	176
第一节 集成运算放大器在信号运算方面的应用.....	176

一、理想集成运算放大器 二、比例运算放大电路 三、加法运算电路 四、减法运算电路 五、积分运算电路 六、微分运算电路 七、对数和反对数(指数)运算电路 八、集成模拟乘法器	
第二节 集成运算放大器在信号处理方面的应用	193
一、有源滤波电路 二、比较器	
第三节 集成运算放大器在波形产生方面的应用	206
一、方波发生器 二、三角波发生器 三、锯齿波发生器	
小结	210
习题	213
第七章 正弦波振荡电路	225
第一节 振荡的基本概念	225
一、放大电路的自激振荡现象 二、自激振荡的条件 三、正弦波振荡电路的组成 四、振荡的建立和稳定	
第二节 LC振荡电路	229
一、LC并联谐振回路的选频特性 二、变压器反馈式LC振荡电路 三、三点式LC振荡电路	
第三节 RC振荡电路	233
一、RC串并联网络的选频特性 二、RC桥式振荡电路	
第四节 石英晶体振荡电路	236
一、LC振荡电路振荡频率稳定度与品质因数的关系 二、石英晶体的压电效应和阻抗频率特性 三、石英晶体振荡电路	
小结	240
习题	240
第八章 直流稳压电源	244
第一节 单相桥式整流电路	244
一、电路说明 二、工作原理 三、定量关系	
第二节 电容滤波器	246
一、工作原理 二、电容滤波电路的特点 三、定量关系 四、RC滤波器	
第三节 硅稳压管稳压电路	250
一、直流稳压电源的作用 二、硅稳压管稳压电路	
第四节 串联型稳压电路	253
一、硅稳压管稳压电路的缺点 二、串联型稳压电路的引出 三、具有放大环节的串联型稳压电路	
第五节 集成稳压电路	257
一、三端式集成稳压器的电路介绍 二、三端式集成稳压器的几种使用接线图	
小结	260
习题	261
第九章 可控整流电路	264
第一节 晶闸管	264
一、晶闸管的结构 二、晶闸管的工作原理 三、晶闸管的伏安特性 四、晶闸管的主要参数	
第二节 单相桥式可控整流电路	270
一、电阻性负载 二、电感性负载	
第三节 晶闸管的保护	273
一、晶闸管的过电流保护 二、晶闸管的过电压保护	
第四节 晶闸管的触发电路	275
一、单结晶体管 二、单结晶体管振荡电路 三、单结晶体管同步触发电路	

小结.....	282
习题.....	283
第十章 逻辑门电路和逻辑代数	285
第一节 数字电路概述.....	285
一、数字电路的研究对象 二、脉冲波形及其参数 三、数字电路的特点 四、计数体制	
第二节 二极管和三极管的开关特性.....	290
一、二极管的开关特性 二、三极管的开关特性	
第三节 基本逻辑门电路.....	295
一、逻辑电路的基本概念 二、与门电路 三、或门电路 四、非门电路 五、复合门电路	
第四节 三极管-三极管集成逻辑 (TTL) 与非门电路.....	301
一、电路组成 二、工作原理 三、TTL与非门电路的电压传输特性 四、TTL与非门电路的主要参数	
第五节 其它集成逻辑门电路.....	306
一、集电极开路与非门 (OC门) 电路 二、三态TTL与非门电路 三、高阈值逻辑 (HTL) 与非门电路	
第六节 MOS逻辑门电路.....	312
一、MOS数字集成电路的优缺点 二、几点说明 三、NMOS门电路 四、CMOS门电路	
第七节 逻辑代数.....	319
一、逻辑变量和逻辑函数的概念 二、逻辑代数的基本定律 三、用逻辑代数基本定律化简逻辑函数	
四、用卡诺图法化简逻辑函数	
小结.....	329
习题.....	331
第十一章 组合逻辑电路	337
第一节 组合逻辑电路的分析与设计基础.....	337
一、组合逻辑电路的分析方法 二、组合逻辑电路的设计方法	
第二节 编码器和译码器.....	344
一、编码器 二、译码器	
第三节 数据选择器.....	354
一、数据选择器的工作原理 二、数据选择器的扩展 三、用数据选择器作逻辑函数发生器	
第四节 数字比较器.....	358
一、一位数字比较器 二、多位数字比较器 三、数字比较器位数的扩展	
第五节 加法器.....	362
一、串行进位的加法器 二、超前进位的加法器	
第六节 组合逻辑电路中的竞争冒险.....	365
一、什么是竞争冒险 二、如何消除竞争冒险	
小结.....	366
习题.....	367
第十二章 触发器和时序逻辑电路	374
第一节 触发器.....	374
一、基本RS触发器 二、同步RS触发器 三、主从JK触发器 四、JK边沿触发器 五、维持阻塞D触发器 六、CMOS触发器 七、触发器逻辑功能的转换	
第二节 寄存器.....	386
一、数码寄存器 二、移位寄存器	
第三节 计数器.....	392

一、二进制计数器 二、十进制计数器 三、任意进制计数器	
小结	413
习题	414
第十三章 脉冲波形的产生和整形	423
第一节 555定时器	423
一、555定时器的简化原理图 二、555定时器的工作原理	
第二节 单稳态触发器	424
一、电路的组成 二、工作原理 三、输出脉冲的宽度 四、单稳态触发器的应用	
第三节 多谐振荡器	427
一、工作原理 二、振荡周期	
第四节 施密特触发器	429
一、工作原理 二、回差电压 三、输出信号的电平转换 四、施密特触发器的应用	
第五节 石英晶体多谐振荡器	432
一、TTL与非门多谐振荡器 二、石英晶体多谐振荡器	
小结	435
习题	436
第十四章 数-模和模-数转换器	439
第一节 数-模转换器	439
一、组成D/A转换器的基本指导思想 二、权电阻D/A转换器 三、倒置 $R/2R$ 梯形网络D/A转换器	
四、D/A转换器的主要技术参数 五、集成D/A转换器举例	
第二节 模-数转换器	444
一、逐次逼近A/D转换器 二、双积分A/D转换器 三、A/D转换器的主要技术参数	
第三节 采样-保持电路	449
一、关于采样-保持的概念 二、采样-保持电路	
小结	453
习题	454
第十五章 半导体存储器	457
第一节 只读存储器 (ROM)	457
一、固定ROM 二、可编程ROM(PROM) 三、可改写ROM(EPROM) 四、ROM应用举例	
第二节 随机存取存储器 (RAM)	465
一、RAM的结构和工作原理 二、RAM的扩展	
小结	470
习题	471
主要参考文献	473

第一章 半导体二极管和三极管

半导体二极管和三极管是最常用的半导体器件，它们都是由半导体材料制成的。为了理解半导体二极管和三极管以及其它常用的半导体器件的工作原理，首先必须了解半导体的电特性。

第一节 半导体的电特性

自然界的物质，按它们的导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三类。导体的导电性能很好，如金、银、铜、铝等；绝缘体的导电性能极差，如塑料、橡胶、云母、陶瓷等；半导体的导电能力则介于导体和绝缘体之间，它既不象导体那样很容易导电，又不象绝缘体那样很难导电。锗（Ge）和硅（Si）是典型的半导体。

半导体所以能用来制造各种半导体器件，并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是因为在纯净的半导体中掺入微量的杂质能使它的导电性能发生很大变化的缘故。例如，在纯硅中掺入百万分之一的硼后，硅的电阻率就从大约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右。

杂质为什么能使半导体的导电性能发生很大的变化呢？我们只有深入到半导体内部去寻找这个规律性。

一、本征半导体

结构完整和不含杂质的半导体叫本征半导体。只有认识了本征半导体，才能了解杂质对半导体导电性能的巨大影响。

1. 硅和锗的原子结构

半导体硅和锗与其它一切物质一样，也是由原子构成的，它们的原子结构的平面示意图如图1-1-1所示。由图1-1-1(a)可知，一个硅原子是由1个带正电的原子核和围绕它旋转的14个带负电的电子组成的。14个电子分布在三层轨道上，最内层为2个，第二层为8个，最外层为4个。

硅原子核带14个电子电量的正电。在正常情况下，因为原子核和电子的正负电荷相等，整个硅原子是呈电中性的。由于里面两层的10个电子离原子核较近，它们受原子核正电荷的吸引力较大，不易摆脱原子核的束缚而成为自由电子。而最外层轨道上的4个电子因离原子核较远，它们受原子核的束缚力较小，很容易成为自由电子。这4个最外层的电子称为价电子。硅是4价元素。由于内层10个电子受原子核束缚力大，可以把这10个电子和原子核看成是

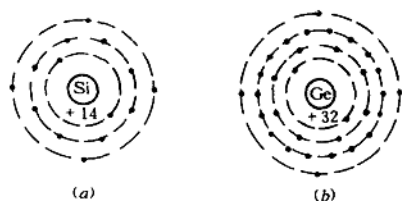


图 1-1-1 硅和锗原子结构的平面示意图
(a) 硅（Si）原子；(b) 锗（Ge）原子

一个比较稳定的整体，称为惯性核（或离子实）。这个惯性核带4个电子电量的正电。这样，就可以把一个硅原子简化成惯性核和价电子两部分，如图1-1-2(a)所示，其习惯画法如图1-1-2(b)所示。对锗原子也可作同样处理，把它内层的28个电子和原子核视为一个稳定的整体，由此形成的惯性核也带4个电子电量的正电，最外层也是4个价电子，如图1-1-2(c)所示。锗也是4价元素。

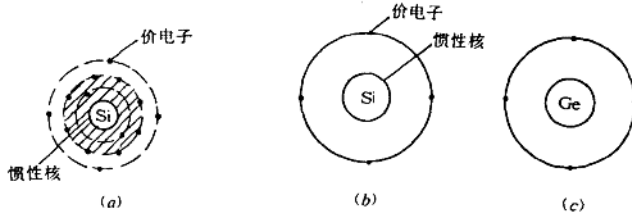


图 1-1-2 硅和锗原子结构的简化

(a) 将硅原子简化成惯性核和价电子两部分；(b) 硅原子的习惯画法；(c) 锗原子的习惯画法

硅和锗半导体材料都要制成晶体。图1-1-3是硅和锗的晶体结构。当把硅、锗制成单晶体时，它们的原子排列就由杂乱无章的状态（叫做多晶体）变成排列非常整齐的状态（叫做单晶体）。此时，各原子之间的距离都是相等的。硅晶体的平面示意图如图1-1-4所示。硅或锗制成晶体后，由于原子之间靠得很近，每个原子的价电子不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的4个原子相联系，即相邻的每两个原子共有一对价电子。电子对中的任何一个价电子，一方面围绕自身的原子核旋转，另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上，价电子的这种组合方式称为共价键结构。

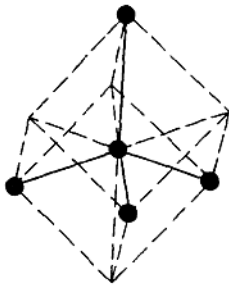


图 1-1-3 硅和锗的晶体结构

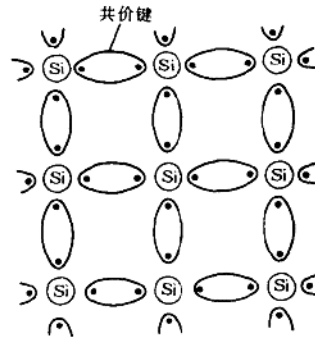


图 1-1-4 硅晶体的平面结构

2. 自由电子-空穴对的产生

由原子理论可知，当原子最外层的电子数为8个时，其结构是比较稳定的。但是，硅和锗晶体是靠共价键结构才保证每个原子最外层的电子数凑够8个的，这样，它的价电子所受的束缚力就不象绝缘体那样大。

在绝对零度（ -273.15°C ）时，由于价电子无法从外界获得能量以摆脱共价键的束

缚，所以此时本征半导体中没有自由电子。这时，本征半导体就相当于绝缘体。但是，在室温状态下，由于价电子获得了足够的能量，就会有极少量的价电子摆脱共价键的束缚成为自由电子，这个过程叫做激发。当价电子脱离共价键的束缚成为自由电子后，在原来共价键的位置上就留下一个“空位”，称为空穴，如图1-1-5中的A处所示。当呈电中性的原子失去一个价电子留下一个“空位”时，该原子就带正电。这样，有空穴的原子就能把相邻原子共价键上的价电子吸引过来，填补这个空穴，同时在这个相邻原子中出现另一个空穴。这新出现的空穴也可以由相邻原子中的价电子来填补，而在该原子中又出现一个空穴。如图1-1-5中B处的价电子去填补A处的空穴，就会在B处出现新的空穴，相当于空穴从A处移动到B处。由此可见，空穴移动的方向是和价电子依次填补空穴的移动方向相反的。由于空穴出现在某一原子上，该原子就带一个电子电量的正电，所以，可以认为空穴是带正电的，空穴的运动，就相当于正电荷在运动。

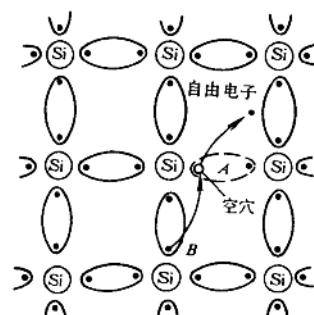


图 1-1-5 热运动产生的自由电子-空穴对

必须强调，空穴的运动方式和自由电子有着本质的区别。自由电子能在晶体中自由运动，而空穴的移动则是正离子吸引邻近的价电子造成的，即造成空穴移动的价电子移动只能从一个束缚状态到另一个束缚状态。

在半导体中，常把可以运动的带电粒子称为载流子。在室温下，在本征半导体中有两种载流子：自由电子和空穴。在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的（这种现象称为本征激发），有一个自由电子就必然出现一个空穴，故称为自由电子-空穴对。

3. 本征半导体的导电情况

在室温下，在本征半导体中，由于出现了两种载流子，它就不再是绝缘体了。当我们在一块本征半导体的两端加上一个直流电源 U 时，在本征半导体中就会产生一个电场。在这个电场的作用下，自由电子将向着电源的正极作定向运动，形成电子电流；空穴将向着电源的负极作定向运动，形成空穴电流。

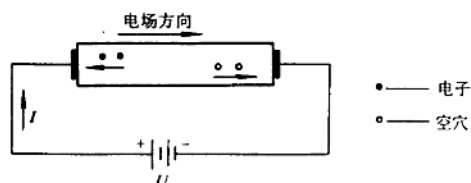


图 1-1-6 本征半导体中载流子的运动

由图1-1-6可见，在外加电源的作用下，本征半导体中流过的电流是电子电流和空穴电流之和。由于在室温下所产生的自由电子-空穴对的数量是很少的，电路中的电流很小，因此，本征半导体的导电性能仍是很差的。

本征半导体的一个重要特征是电子载流子和空穴载流子的数量相等。

4. 自由电子-空穴对的复合

在室温下，自由电子和空穴都在不停地运动着。当自由电子运动到共价键上的空穴处，自由电子和空穴就会重新结合，使自由电子和空穴都消失，这种过程称为自由电子-空穴对的复合。所以，在本征半导体中，不断进行着两种相反的过程：自由电子-空穴对

的不断产生和不断复合。在一定温度下，这种过程将达到动态平衡，使自由电子-空穴对保持一定的数量。

二、P型半导体和N型半导体

本征半导体的导电能力很差，用处不大。但是，如果在本征半导体中掺入微量有用的其它元素（称为杂质），就会使半导体的导电能力大大提高。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

根据掺入杂质的不同，杂质半导体可分为P型半导体和N型半导体两大类。

1. P型半导体

如果在本征半导体硅中掺入微量的3价元素硼（B），如图1-1-7(a)所示，由于硼原子只有3个价电子，当硼原子取代硅晶体中的硅原子与相邻的4个硅原子组成共价键时，在一个键上就少一个电子，形成一个空位（不是空穴，因为硼原子仍呈电中性）。在室温或其它能量激发下，与硼原子相邻的硅原子共价键上的价电子就可能填补这一空位，从而在价电子原来所处的位置上形成带正电的空穴。这样，每个掺入的硼原子都引起一个空穴（与此同时并不产生自由电子），使硅晶体中产生大量空穴（其数量由掺入的硼原子数决定）。此外，在硅晶体中还有由于热作用而产生的少量的自由电子-空穴对，它们的数量比硼原子引起的空穴少得多。因此，就整个半导体而言，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。因为这种半导体主要靠空穴导电，所以称为空穴型半导体，简称P型半导体。

由于硼原子在和相邻的4个硅原子组成共价键时形成一个空位，相邻硅原子的价电子过来填补这个空位，使硼原子的最外层多出一个电子，成为一个负离子（也称受主离子）。

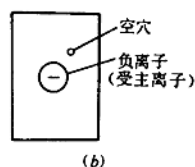
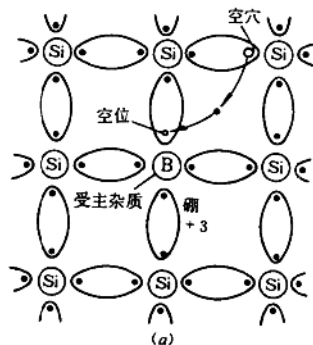


图 1-1-7 P型半导体的示意图

(a) 硅中掺硼形成空穴；(b) P型半导体结构的简化示意图

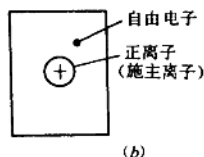
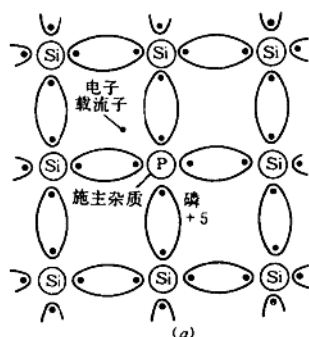


图 1-1-8 N型半导体的示意图

(a) 硅中掺磷形成自由电子；(b) N型半导体结构的简化示意图

为突出P型半导体的主要特点,将P型半导体用图1-1-7(b)所示的符号表示。图中以“○”表示P型半导体中的多数载流子为空穴,以“⊖”表示若硼原子接受一个电子就形成带一个电子电量的负离子。在P型半导体中,因为掺入的杂质硼能形成空位,接受电子,所以称为受主杂质。

2. N型半导体

如果在本征半导体硅中掺入微量的5价元素磷(P),如图1-1-8(a)所示,当磷原子取代硅原子组成共价键时,还多余一个价电子,它只受磷原子核的吸引,不受共价键的束缚,在室温下很容易成为自由电子。这样,每个掺入的磷原子都提供一个电子,使硅晶体中在室温下的自由电子大量增加(自由电子的数量由掺入的磷原子数决定)。此时,在硅晶体中还有由于热作用而产生的少量的自由电子-空穴对,它们的数量比磷原子提供的自由电子少得多。因此,就整个半导体而言,自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子。因为这种半导体主要靠自由电子导电,所以称为电子型半导体,简称N型半导体。

当磷原子在与相邻的4个硅原子组成共价键,使多余的一个价电子变成自由电子后,磷原子就成为带一个电子电量的正离子(也称施主离子)。为突出N型半导体的主要特点,将N型半导体用图1-1-8(b)所示的符号表示。图中以“·”表示N型半导体中的多数载流子是自由电子,以“⊕”表示磷原子失去一个价电子后成为一个正离子。

在N型半导体中,因为掺入的杂质磷能提供自由电子,所以称为施主杂质。

应该指出,不论是P型半导体还是N型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但整个晶体仍是呈电中性的。

第二节 PN结及其单向导电性

在本征半导体中掺入杂质后形成的P型或N型半导体,虽然由于载流子数量大大增加而大大提高了导电能力,但是单独的P型或N型半导体并不能用来制造各种类型的半导体器件。

如果采取一定的工艺措施,在一块本征半导体的两边掺入不同的杂质,使一边成为P型半导体,另一边成为N型半导体,则在两种不同类型半导体的交界面处会形成一个PN结。PN结是构成各种类型半导体器件的基础。PN结是怎样形成的呢?它有什么特性?下面就来讨论这些问题。

一、PN结的形成

如图1-2-1(a)所示,当在本征半导体中掺入不同的杂质,使它的两边分别形成P型半导体(P区)和N型半导体(N区)时,由于P型半导体中的空穴浓度比N型半导体中的大得多,N型半导体中的自由电子浓度比P型半导体中的大得多,P型半导体中的空穴就要向N型半导体中扩散,并与其中的自由电子相复合,同时,N型半导体中的自由电子也要向P型半导体中扩散,并与其中的空穴相复合。扩散首先在P型和N型半导体的交界面处进行。多数载流子扩散和复合的结果,破坏了P区和N区的电中性。在P型半导体一边,由于失去空穴,只剩下由受主杂质形成的负离子;同样,在N型半导体一边,只剩下

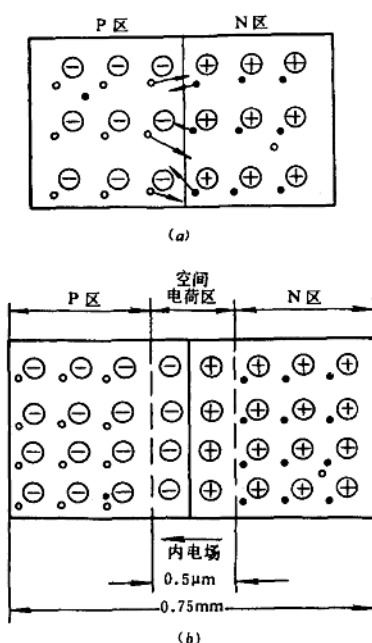


图 1-2-1 PN 结的形成
(a) 载流子的扩散; (b) 空间电荷区

内电场在多数载流子的扩散运动一开始出现时就形成了, 而内电场的形成马上要引起少数载流子的漂移运动, 即少数载流子的漂移运动是和多数载流子的扩散运动同时产生的。但是, 漂移运动和扩散运动的方向却是相反的。

多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动是PN结中矛盾运动的两个方面。一开始, 多数载流子的扩散运动占优势, 随着扩散的进行, 空间电荷区逐渐加宽, 内电场逐渐增强, 漂移运动也越来越强, 当漂移运动和扩散运动相等时, 达到动态平衡状态, 空间电荷区的宽度就保持不变。在动态平衡状态下, 扩散运动和漂移运动仍在继续进行, 但由于两者大小相等、方向相反, 所以即使用一根导线把P型和N型半导体连接起来, PN结上也不会有电流流过。

二、PN 结的单向导电性

以上讨论的是PN结上没有外加电压的情况, 这时, 半导体内的扩散运动和漂移运动处于动态平衡状态, 故称这种情况下的PN结为平衡PN结。当我们搞清楚了PN结的形成和PN结中载流子的矛盾运动规律后, 就可以来讨论PN结上外加电压时的工作情况了。

1. 外加正向电压使PN结导通

如果在PN结上加一个正向电压, 即电源的正极接P区, 负极接N区, 如图1-2-2所示。这种接法称为PN结的正向接法, 它使PN结处于正向偏置状态。这时, 外加电压在PN结上产生一个外电场, 其方向正好与内电场相反, 它削弱了内电场, 破坏了多数载流子的扩散

由施主杂质形成的正离子。由于晶体中的正、负离子不能移动, 于是就在两种半导体的交界面处产生一个很薄的空间电荷区, 这个空间电荷区就称为PN结, 如图1-2-1(b)所示。由于在空间电荷区中多数载流子已扩散到对方并复合掉了, 即消耗尽了, 所以又把空间电荷区称为耗尽区。

空间电荷区一旦形成, 就会产生一个电场, 这个电场称为内电场(或自建电场), 其方向由N区指向P区。这个内电场会阻止P区中的空穴向N区继续扩散, 也会阻止N区中的自由电子向P区继续扩散, 即内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用。由于这个缘故, 常把空间电荷区称为阻挡层。

P型半导体中的少数载流子(自由电子)和N型半导体中的少数载流子(空穴), 在内电场的作用下却很容易向对方运动。我们把载流子在电场作用下产生的定向运动称为漂移运动。可见, 内电场对少数载流子的漂移运动起促进作用。很明显, 内电场越强, 少数载流子的漂移运动也越强。

运动与少数载流子的漂移运动间的动态平衡状态，使多数载流子的扩散运动超过少数载流子的漂移运动，有利于P区中的空穴和N区中的自由电子进一步向对方扩散。显然，这将使多数载流子形成的扩散电流大大超过少数载流子形成的漂移电流。此时，在PN结上有较大的正向电流流过，PN结处于正向导通状态，PN结呈现的电阻很低。在电路中，正向电流的方向从电源 U 的正极流出，再由P区流向N区，然后回到电源 U 的负极。

应该指出，外电场削弱内电场的过程，也是空间电荷区变窄的过程。因为在外电场的作用下，P区中的空穴和N区中的自由电子都会被排斥到PN结附近去，分别抵消一部分负电荷和正电荷，使空间电荷量减少，空间电荷区就变窄。

2. 外加反向电压使PN结截止

如果在PN结上加一个反向电压，即电源 U 的正极接N区，负极接P区，如图1-2-3所示。

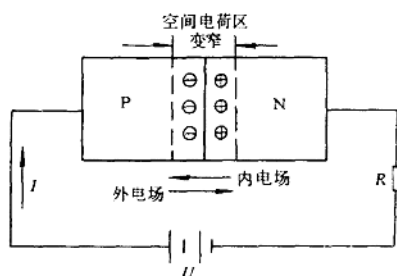


图 1-2-2 外加正向电压的PN结

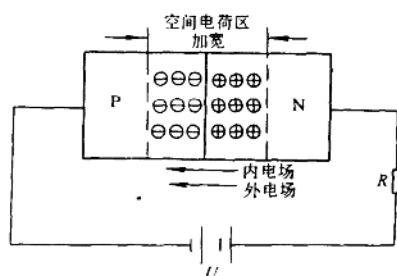


图 1-2-3 外加反向电压的PN结

这种接法称为PN结的反向接法，它使PN结处于反向偏置状态。这时，外电场的方向与内电场相同，使PN结上的电场加强，也破坏了许多载流子的扩散运动与少数载流子的漂移运动间的动态平衡状态，使少数载流子的漂移运动占优势，多数载流子的扩散运动则难以进行，PN结上只流过由少数载流子形成的很小的漂移电流。这个电流称为PN结的反向电流，它由电源 U 的正极流出，再从N区到P区，然后再回到电源 U 的负极。由于PN结的反向电流是很小的，PN结呈现高电阻，可以认为PN结处于截止状态。

在PN结上加反向电压来加强内电场的过程，也是空间电荷区变宽的过程。因为在外电场的作用下，P区中的空穴和N区中的自由电子将向离开空间电荷区的方向移动。此时，在空间电荷区左边，由于移走了空穴，将使负电荷量增多；在空间电荷区右边，由于移走了自由电子，将使正电荷量增多，从而导致空间电荷区变宽。

由以上讨论可知，PN结具有单向导电性。当PN结上加正向电压时，PN结呈现低电阻，正向电流较大，PN结处于导通状态；当PN结上加反向电压时，PN结呈现高电阻，反向电流很小，PN结处于截止状态。

第三节 半导体二极管

一、半导体二极管的结构

半导体二极管主要是由一个PN结组成的，另外再加上接触电极、引线和管壳。由P

型半导体引出的电极叫阳极。由N型半导体引出的电极叫阴极。半导体二极管的外形和图形符号如图1-3-1所示。图中符号的箭头表示正向电流的方向。根据结构的不同，半导体二极管可分为点接触型和面接触型两种。

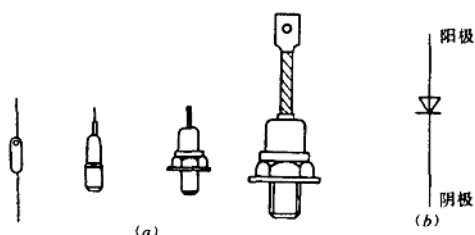


图 1-3-1 半导体二极管的外形和图形符号

(a) 外形；(b) 图形符号

1. 点接触型二极管

它是用一根由金、银或钨丝做成的触须压在一块N型半导体上，并用电形成工艺（在短时间内通过强大的电流）在触须处形成一个PN结而制成的，如图1-3-2(a)所示。和触须连接的引线为阳极，和N型半导体连接的引线为阴极。由于这种二极管的PN结的结面积比较小，故其结电容小，高频性能较好。但它允许通过的电流比较小，因此常用于高频和小电流的电路中。

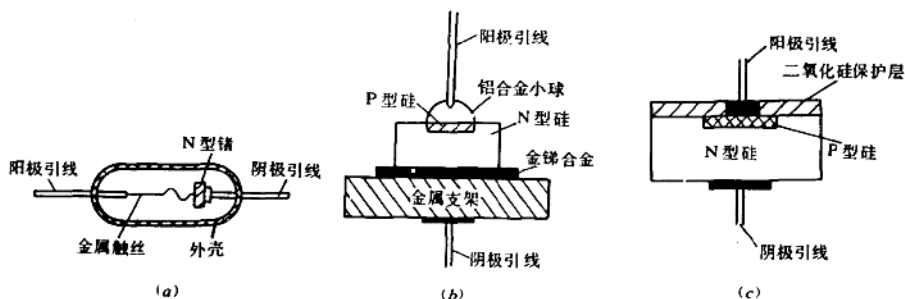


图 1-3-2 半导体二极管的结构

(a) 点接触型；(b) 合金法面接触型；(c) 扩散法面接触型

2. 面接触型二极管

面接触型二极管可用合金法或扩散法制成，它们的结构分别如图1-3-2(b)和(c)所示。由于面接触型二极管PN结的结面积大，故允许通过较大的电流。但因PN结的结电容较大，故常用于低频整流电路中。

根据所用半导体材料的不同，半导体二极管又可分为锗二极管和硅二极管两种。

二、半导体二极管的伏安特性

我们已经知道，半导体二极管在正向偏置时很容易导电，而在反向偏置时则很难导电。半导体二极管的这种单向导电性可以用它的伏安特性表达出来。

1. 什么叫半导体二极管的伏安特性

半导体二极管的伏安特性表示的是管子阳、阴极间所加的电压与流过管子的电流间的关系曲线。

2. 测试电路

用图1-3-3所示的电路可以测量半导体二极管的伏安特性。按图1-3-3(a)接线,可测量正向伏安特性(简称正向特性)。因为此时加在二极管上的是正向电压,二极管就流过正向电流。按图1-3-3(b)接线,半导体二极管加反向电压,流过反向电流,可测量反向伏安特性(简称反向特性)。图中,用电位器 R_w 调节正、反向电压; R 是限流电阻,用以防止正向电流太大和反向击穿时将管子烧坏。测量反向特性时所用的电源电压和限流电阻均比测量正向特性时大得多。

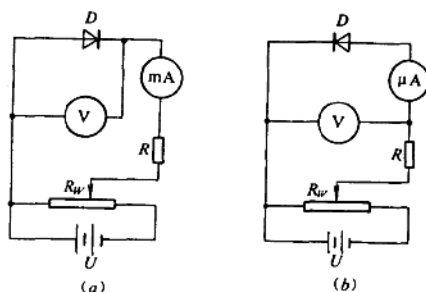


图 1-3-3 半导体二极管伏安特性的测试电路

(a)测正向伏安特性;(b)测反向伏安特性

典型的半导体二极管的伏安特性如图1-3-4所示。横坐标表示加在二极管上的电压,纵坐标表示流过二极管的电流。

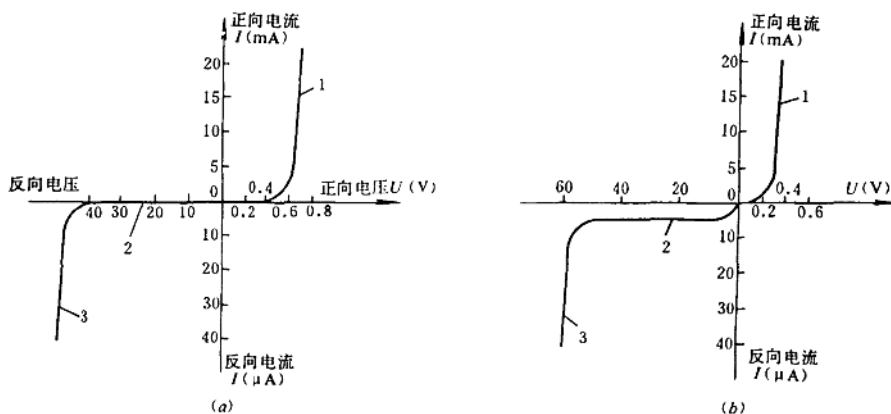


图 1-3-4 二极管的伏安特性

(a) 硅二极管的伏安特性;(b) 锗二极管的伏安特性

3. 正向特性

正向特性指的是加在二极管上的正向电压与流过管子的正向电流间的关系曲线,如图1-3-4的1段所示。正向特性的特点是,加于二极管上的正向电压只有零点几伏,但流过管子的正向电流却较大,即二极管所呈现的正向电阻很小。

在正向特性的起始部分有一个死区(又称不灵敏区),即当正向电压较小时,外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动造成的阻力,正向电流很小,基本上为零,二

极管呈现的正向电阻很大。硅二极管的死区电压（又称门槛电压）约为0.5V，锗二极管的死区电压约为0.1V。当正向电压大于死区电压后，外电场使内电场大大削弱，有利于多数载流子的扩散运动，正向电流就随正向电压的增加而很快上升，二极管的正向电阻变得很小，此时二极管的正向压降几乎为一常数。硅二极管的正向压降为0.6~0.7V，锗二极管的正向压降为0.2~0.3V。

4. 反向特性

反向特性指的是加在二极管上的反向电压与流过管子的反向电流间的关系曲线。因为反向电压所产生的外电场和内电场一起阻止多数载流子的扩散运动，而对少数载流子的漂移运动起促进作用，所以，在反向电压作用下，管子只流过很小的反向电流，如图1-3-4中的2段所示。反向电流有两个特点：一是随温度上升而很快增大；二是当反向电压在一定范围内变化时，反向电流基本上不随反向电压的变化而变化。硅管的反向电流比锗管小得多。

当反向电压增大到一定数值时，反向电流将急剧增大，这种现象称为二极管的反向击穿，如图1-3-4中的3段所示。产生反向击穿的原因是外加强电场破坏了共价键，把价电子拉出来，使自由电子-空穴对急剧增加；或强电场引起自由电子和空穴与晶体原子碰撞，产生新的自由电子-空穴对，使载流子数剧增。

三、半导体二极管的主要参数

半导体二极管的寿命很长，但若使用不当，则可能很快损坏。为了合理选择和正确使用半导体二极管，保证它在电路中安全可靠地工作，必须掌握二极管的参数。半导体二极管的主要参数有以下几个：

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指半导体二极管长期工作时，允许通过的最大正向平均电流。使用二极管时，如管子的正向平均电流大于最大整流电流，将会把PN结烧坏，导致管子的损坏。

2. 最高反向工作电压 U_R

最高反向工作电压是指半导体二极管允许施加的反向电压的最大值。二极管工作时，若所承受的反向电压值超过最高反向工作电压，管子就有可能因反向击穿而失去单向导电性。为了留有余地，通常取反向击穿电压的一半作为半导体二极管的最高反向工作电压。

3. 反向电流 I_R

反向电流是指二极管未反向击穿时反向电流的数值。其值越小，二极管的单向导电性越好。在使用时应注意温度对反向电流的影响。

4. 直流电阻 R_D

直流电阻指的是加在二极管上的直流电压与流过管子的直流电流之比。例如，当二极管工作于图1-3-5中的Q点时，它对应的直流电压和直流电流分别为 U_Q 和 I_Q ，则二极管在Q点的直流电阻为

$$R_D = \frac{U_Q}{I_Q}$$

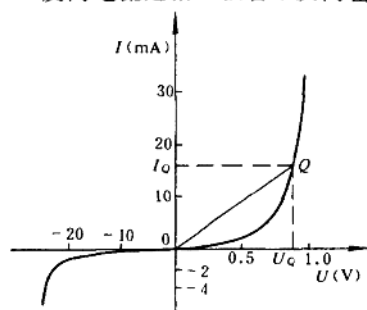


图 1-3-5 半导体二极管的直流电阻

应该指出，二极管直流电阻的大小是随工作点而变化