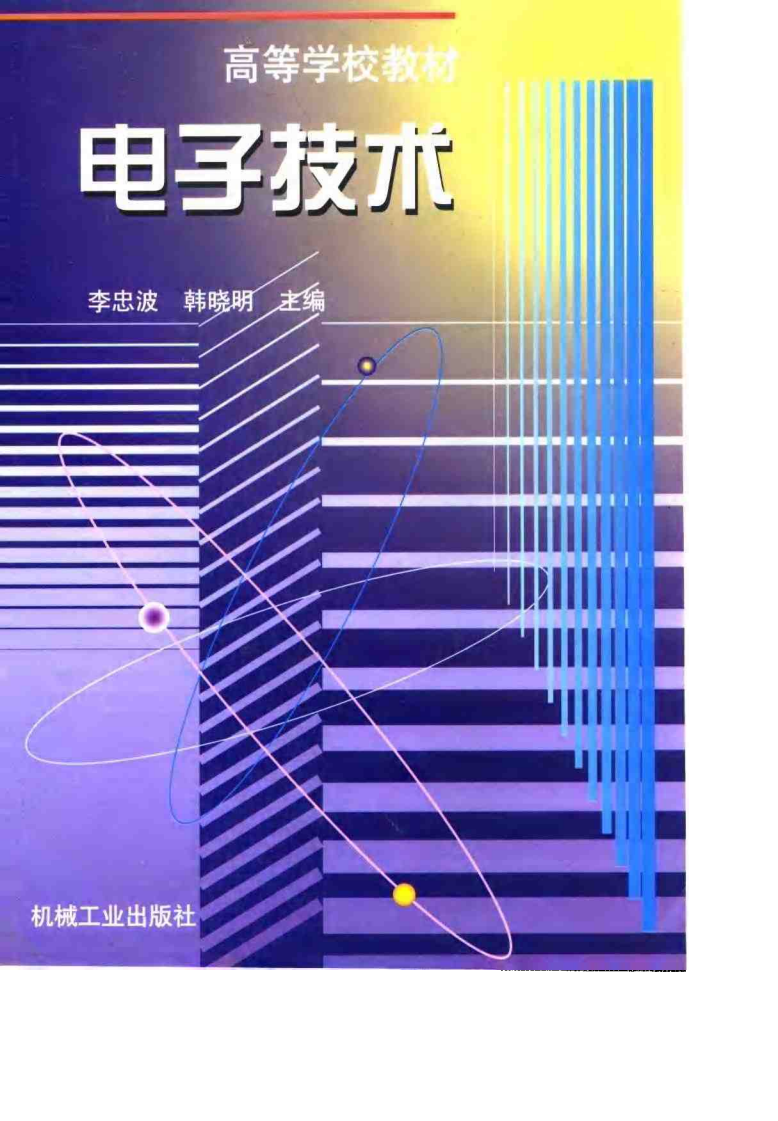


高等学校教材

电子技术

李忠波 韩晓明 主编

机械工业出版社



高等学校教材

电子技术

主编 李忠波 韩晓明
参编 龚淑秋 高有华
高荣善 李景荣
主审 郑世科

ND29/19



机械工业出版社

本书共分两篇十七章,第一篇模拟电子技术包括有双极半导体器件、放大电路基础、场效应晶体管及其放大电路、功率放大电路、差动放大电路、集成运算放大电路、反馈与振荡电路、直流稳压电源、晶闸管及其电路等内容;第二篇数字电子技术包括有逻辑函数及其化简、逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、波形产生与整形电路、数模(D/A)与模数(A/D)转换、半导体存储器与可编程逻辑阵列等内容。本书后有习题,节后有练习与思考题。书中编入较多的例题和应用实例。

本书可作为高等工科院校大学本科、专科机械类、材料类、经贸管理类、化工类、建筑类、机电一体化类、计算机类等有关专业“电子技术”课程的教材,也可作为职工大学、成人教育大学和电视大学同类专业的教材,还可供有关工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/李忠波,韩晓明主编. 北京:机械工业出版社,1998.5
ISBN 7-111-06087-3

I. 电… II. ①李… ②韩… III. 电子技术-高等学校-教材 IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第01022号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:页克勤 版式设计:霍永明 责任校对:肖新民

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年5月第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·24.5印张·602千字

0 001—6 000册

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

《电子技术》是与《电工技术》、《电子技术试题题型精选汇编》、《电工技术试题题型精选汇编》配套的系列教材。本教材是根据国家教育委员会电工学课程教学领导小组拟定的电子技术课程教学基本要求的精神编写的。本教材可供高等工科院校大学本科、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、经贸管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用。

“电子技术”是非电类专业的技术基础课程。通过本课程的学习，应使学生得到电子技术必要的基础理论、基本知识和基本技能，了解电子技术发展的概况，为学习后续课程、从事有关的工程技术和科学研究工作打好理论和实践基础。

为适应新技术发展和教育、教学改革的需要，本书在保证电子技术基础内容的前提下，加强了模拟集成电路和中、大规模数字集成电路的介绍、分析和应用。

《电子技术》是编者在多年教学实践中，经过多个教学过程，对课程体系、内容及教学方法不断研究和总结，并广泛吸取兄弟院校有关教师的意见和建议的基础上编写的。模拟电子技术（第一～九章）可供48～64学时教学使用、数字电子技术（第十～十七章）可供32～48学时教学使用。书中带*号内容属于加宽、加深内容，可由教师根据专业特点和学时多少决定取舍。为便于教学和学生自学，书中还编写了练习与思考、例题和习题。另外还有与之配套的《电子技术试题题型精选汇编》。

本书由沈阳工业大学李忠波（编写第七、十三、十四、十五、十六、十七章）和燕山大学韩晓明（编写第二、四章）担任主编。辽宁工学院李景荣编写第一、二章。沈阳工业大学龚淑秋编写第五、六章，高荣善编写第八、九章，高有华编写第十、十一、十二章。

本书由燕山大学郑世科副教授担任主审。在本书编审过程中，曾得到燕山大学王守宇教授和沈阳工业大学范振铎教授的热情关怀和悉心指导，在本书出版之际，谨向他们致以最诚挚的谢意。

由于编者能力有限，本书难免有不妥和错误之处，恳请使用本书的读者提出批评指正。

编 者
1997年8月

目 录

前言

第一篇 模拟电子技术

第一章 双极型半导体器件	1
第一节 半导体的导电特性	1
第二节 PN 结	4
第三节 半导体二极管	7
第四节 稳压管	14
第五节 半导体三极管	15
小结	23
习题	23
第二章 放大电路基础	26
第一节 基本放大电路的组成	26
第二节 放大电路的图解分析法	29
第三节 放大电路的等效电路分析法	35
第四节 工作点稳定的共射极放大电路	41
第五节 共集电极放大电路	49
*第六节 共基极放大电路	51
第七节 多级放大电路	53
*第八节 放大电路的频率特性	58
小结	64
习题	65
第三章 场效应晶体管及其放大电路	72
第一节 结型场效应晶体管	72
第二节 绝缘栅场效应晶体管	76
第三节 场效应晶体管放大电路	79
*第四节 功率场效应器件	85
*第五节 场效应晶体管应用电路	88
小结	89
习题	90
第四章 功率放大电路	92
第一节 功率放大电路的特点与分类	92
第二节 互补对称功率放大电路	93
*第三节 集成功率放大器	98
*第四节 大功率晶体管的散热与保护	101
小结	102

习题	102
第五章 差动放大电路	104
第一节 典型差动放大电路	104
第二节 具有恒流源的差动放大电路	110
小结	113
习题	114
第六章 集成运算放大电路	116
第一节 集成运算放大器芯片	116
第二节 集成运算放大器的线性应用	119
第三节 集成运算放大器的非线性应用	132
第四节 集成运算放大器应用实例	139
第五节 使用集成运算放大器应注意的 问题	141
小结	144
习题	144
第七章 反馈与振荡电路	149
第一节 反馈的基本概念	149
第二节 负反馈放大电路的一般表达式	158
第三节 负反馈对放大电路性能的影响	160
第四节 负反馈放大电路的近似估算	166
*第五节 负反馈放大电路的自激振荡及 消除方法简介	169
第六节 正弦波振荡的基础知识	171
第七节 RC 正弦波振荡电路	172
第八节 LC 正弦波振荡电路	175
第九节 石英晶体正弦波振荡电路	178
习题	181
第八章 直流稳压电源	186
第一节 单相桥式整流电路	186
*第二节 三相桥式整流电路	190
第三节 滤波电路	193
第四节 硅稳压二极管稳压电路	197
第五节 集成稳压电源	200
小结	205
习题	205
第九章 晶闸管及其电路	209
第一节 晶闸管	209

第二节 单相半控桥式整流电路	213
第三节 晶闸管的保护	221
第四节 单结晶体管触发电路	224
第五节 晶闸管集成触发电路	229
第六节 晶闸管电路应用举例	232
小结	236
习题	236

第二篇 数字电子技术

第十章 逻辑函数及化简	239
第一节 逻辑函数的公式化简法	239
第二节 逻辑函数的卡诺图化简法	243
小结	246
习题	247
第十一章 逻辑门电路	249
第一节 半导体元件的开关作用	249
第二节 常用逻辑门电路	252
第三节 典型集成门电路的结构与特性	253
第四节 集成逻辑门电路使用中的几个实际问题	260
小结	261
习题	262
第十二章 组合逻辑电路	266
第一节 组合电路的分析和设计	266
第二节 常用集成组合逻辑电路	268
第三节 组合电路的竞争冒险	279
小结	280
习题	280
第十三章 触发器	283
第一节 RS 触发器	283
第二节 JK 触发器	288
第三节 D 触发器	290
第四节 触发器功能的转换	292
小结	294
习题	294
第十四章 时序逻辑电路	297
第一节 寄存器	297
第二节 计数器	304
第三节 脉冲分配器	315
小结	317

习题	317
第十五章 脉冲信号的产生与整形	323
第一节 555 定时器	323
第二节 单稳态触发器	325
第三节 施密特触发器	327
第四节 多谐振荡器	329
小结	332
习题	333
第十六章 数模 (D/A) 与模数 (A/D) 转换	335
第一节 数模转换器 (DAC)	335
第二节 模数转换器 (ADC)	340
小结	347
习题	348
第十七章 半导体存储器与可编程逻辑阵列	349
第一节 随机存取存储器 (RAM)	349
第二节 只读存储器 (ROM)	357
第三节 可编程逻辑阵列 (PLA)	364
小结	369
习题	369
附录	371
附录 A 半导体器件型号命名方法	371
附录 B 常用半导体器件的参数	371
附录 C 集成电路型号命名方法	376
附录 D 国内外部分集成运算放大器同类产品型号对照表	378
附录 E 几种国产集成运算放大器参数规范表	379
附录 F 音频功率器件 D810 电路主要技术指标的典型值	380
附录 G 三端式集成稳压器性能参数	381
附录 H 功率场控器件的主要参数	381
附录 I 电气及电子元、器件新旧图形符号对照表	382
附录 J 二进制逻辑单元新、旧图形符号对照表	383
附录 K 555 定时器的主要性能参数	384
参考文献	386

第一篇 模拟电子技术

第一章 双极型半导体器件

用半导体制成的电子器件统称为半导体器件。半导体器件又分为单极型半导体器件和双极型半导体器件两种。

我们知道,物体导电是通过带电粒子的定向运动实现的,运载电荷的粒子称为载流子。单极型半导体器件中只有一种载流子参与导电,而双极型半导体器件中有两种载流子同时参与导电。

半导体器件具有耗电少、寿命长、体积小、重量轻、输入功率小、功率转换效率高等优点,因此在电子技术的各个领域获得了广泛地应用。

半导体的导电特性和PN结的构成是研究各种半导体器件的基础。本章首先研究半导体的导电特性和PN结的构成,然后介绍双极型半导体器件——二极管和稳压管,三极管。

第一节 半导体的导电特性

一、导体、半导体和绝缘体

存在于自然界中的一切物质,按其导电能力的强弱可以分为导体、绝缘体、半导体三大类。容易传导电流的物质称为导体。金属都是导体,如银、铜、铝、铁等。物质的导电能力通常用电阻率的大小来衡量,金属导体的电阻率较小,一般在 $(10^{-6} \sim 10^{-3}) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。

有的物质几乎不传导电流,这类物质称为绝缘体。如橡胶、陶瓷、石英、塑料等都是绝缘体。绝缘体的电阻率很大,一般在 $(10^8 \sim 10^{20}) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。

还有一类物质,其导电能力介于导体和绝缘体之间,称其为半导体。常用的半导体材料很多,如硅、锗、硒等元素以及硫化镉、砷化镓、碳化硅等化合物。半导体的电阻率介于导体、绝缘体之间,一般在 $(10^{-3} \sim 10^6) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。纯净的硅在常温时的电阻率约为 $230000 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体之所以能够得到广泛地应用,是因为它在导电性能上具有如下两个显著的特点:

1) 纯净的半导体受到加热或光照时,其电阻率都会有很大的下降,据此特性,人们制成了热敏元件和光敏元件。

2) 在纯净的半导体中加入微量的其它元素,可以使半导体的导电能力有明显地增加。半导体中含有 $1/10^7$ 的杂质时,其电阻率会下降到原来的 $1/16$,而金属中含有 $1/1000$ 的杂质时对其电阻率的影响还是微不足道的。

二、本征半导体

完全纯净、晶格完整的半导体叫本征半导体。这种半导体的纯度很高,对硅的纯度一般

要求在 99.99999% 以上。由于其含杂质极微，故本征半导体材料呈现出了其本身固有的特征。

(一) 半导体的原子结构和共价键

1. 原子结构 原子物理学指出，原子是由具有正电荷的原子核和带负电荷的电子组成，电子按一定的规律分布在核外的不同壳层上。处于不同壳层上的电子受原子核的引力不同，最外层电子受原子核的束缚力最弱，称为价电子。元素有几个价电子就叫做几价元素。物质的化学性质是由价电子数决定的。半导体的导电性能也与价电子有关。

常用的半导体材料硅和锗的原子结构示意图和简化模型示于图 1-1 中。

硅和锗最外层都有 4 个电子，所以这两种元素都是 4 价元素。

2. 共价键 半导体材料提纯，制成单晶体，其原子都按一定的规则整齐地排列，构成晶格点阵，整块晶体内部晶格排列完全一致。图 1-2 是硅单晶结构的平面示意图。

硅原子组成晶体后，晶体中原子之间的距离很近，这时原来分属于每个原子的 4 个价电子不仅受自身原子的束缚，而且还受到相邻 4 个原子的影响，从而使相邻两个原子的一对价电子为两个原子所共有，形成共有电子对。电子对中的任何一个电子不仅绕自身原子核运动，还会出现在相邻原子所属的轨道上。这种原子间电子共有化结构称为共价键。价键内的两个电子称为束缚电子。

共价键对原子有很强的结合力，没有足够的能量束缚电子是不易脱离公共轨道的。

上面介绍的是硅单晶，锗单晶具有与硅单晶类似的共价键结构。

(二) 本征半导体的导电特性

在绝对零度以下，无外界激发时，共价键中的价电子被束缚得很紧。这种情况下，本征半导体中无载流子存在，此时的本征半导体具有绝缘体的性能。物理学指出，在绝对零度以上，任何物质都处于热运动状态。室温下（300K），热运动的能量会破坏共价键，一些价电子由于获得了足够的能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子。自由电子是带负电荷的载流子。

价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子的同时在相应的共价键位置上留下一个空位，这个空位叫做空穴。在本征半导体内自由电子和空穴总是成对出现的，它使原来呈现电中性的硅原子变成一个带单位正电荷的正离子，这个单位正电荷就是空穴带的电荷量。

晶体中某处出现一个空穴，邻近原子具有较高能量的价电子可以较容易地填补这个空穴，

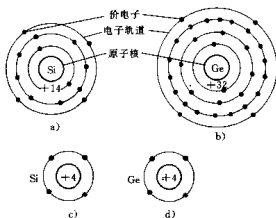


图 1-1 硅与锗的原子结构示意图和简化模型

a) 硅 (Si) 原子 b) 锗 (Ge) 原子
c) 硅原子简化模型 d) 锗原子简化模型

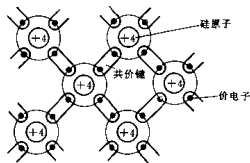


图 1-2 硅单晶结构平面示意图

这样就在邻近原子处留下一个新的空位，这相当于空穴的移动。可以把空穴看做是一个带正电荷的载流子。由热运动的能量使其共价键破坏，从而在晶体中产生电子载流子和空穴载流子的物理现象称为热激发（图 1-3）。

实践表明，在一定温度下，本征半导体内载流子的数量是一定的。这是因为在热激发过程的同时还存在着载流子的复合过程，即在热运动中电子与空穴相遇从而使电子和空穴同时消失的过程。在一定温度条件下，载流子的产生与复合可以达到动态平衡，此时晶体中的电子-空穴对就会维持在一定的数量上。

在无电场作用时，电子和空穴的运动是随机的，不规则的，因此不会形成电流。在电场作用下自由电子逆电场方向运动，形成电子电流；空穴顺着电场方向运动，形成空穴电流。流过半导体的总电流为电子电流和空穴电流的代数和。本征半导体在外加电场作用下产生的导电现象叫本征导电。

研究本征导电时应该注意下面几个问题：

1) 空穴电流就其本质而言，是在电场作用下，共价键上的束缚电子做递补空穴运动时形成的电流（图 1-4），不可把它与自由电子在电场作用下形成的电子电流混为一谈。

2) 金属中是自由电子导电，而半导体导电方式的最大特点是同时存在着电子导电和空穴导电，这也是金属导电和半导体导电的本质区别。

3) 本征半导体的导电能力取决于半导体内载流子的数目。环境温度愈高，热激发越强，半导体中的载流子数目愈多。因此半导体的导电能力随环境温度的升高会有明显的增加。这是半导体导电的又一重要特性。

三、杂质半导体

为增强半导体的导电性能，在半导体中可以人为地掺入微量的其它元素，这些被特定掺入的元素对半导体基体而言叫做杂质。掺有杂质的半导体叫做杂质半导体。掺入不可性质质的杂质可以获得不同导电类型的半导体。

（一）N 型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量的五价元素磷（P），由于掺入的杂质元素是微量的，晶体的晶格点阵结构未发生变化，只是半导体基体的个别原子被杂质原子所取代（图 1-5）。

磷原子最外层有 5 个价电子，其中 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子组成共价键，剩下一个价电子由于受原子核的束缚较弱，在常温下很容易成为自由电子。与此同时，磷原子因失去一个电子而成为正离子。每个杂质原子施舍一个自由电子，这就使得半导体中的自由电子数目大大地增加。杂质原子提供的自由电子数将远远超过由热激发产生的空穴数。这

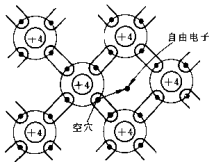


图 1-3 本征半导体热激发产生电子-空穴对

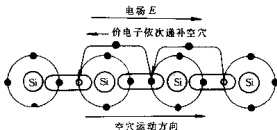


图 1-4 空穴电流

种杂质半导体以电子导电为主，故称其为电子型半导体或N型半导体。在N型半导体中，自由电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。

N型半导体中的杂质元素磷的原子在硅晶体中给出一个多余的电子，故称磷为施主杂质。

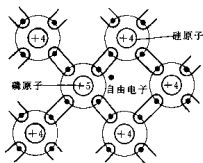


图 1-5 N 型半导体中的载流子

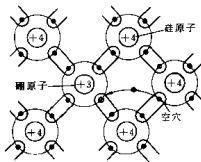


图 1-6 P 型半导体中的载流子

（二）P 型半导体

若在本征半导体硅中掺入微量的三价元素硼（B），就会产生另一种类型的半导体。硼原子最外层有 3 个价电子，这 3 个价电子在与相邻的 4 个硅原子组成共价键时还有一个空位未被填满，与其相邻的硅原子的价电子很容易填补这个空位，于是就产生了一个空穴（图 1-6）。硼原子在晶体中接受了一个电子后，硼原子多了一个电子而成为负离子。

由于掺杂，这种杂质半导体中的空穴数目增加了，空穴数目远远超过了自由电子数目，我们把这种以空穴导电为主的半导体叫做空穴型半导体或 P 型半导体。在 P 型半导体中，空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子。

由于硼原子在硅晶体中能接受电子，故称硼为受主杂质。

练习与思考

- 1-1-1 什么叫本征半导体和杂质半导体？
- 1-1-2 半导体在导电上具有哪些特点？金属导电和半导体导电有什么区别？
- 1-1-3 什么叫共价键？束缚电子和自由电子有什么区别？
- 1-1-4 半导体中空穴的物理意义是什么？
- 1-1-5 电子导电和空穴导电有什么区别？
- 1-1-6 什么叫 P 型半导体？什么叫 N 型半导体？P 型半导体和 N 型半导体的多子和少子各是什么？
- 1-1-7 什么叫施主杂质？什么叫受主杂质？
- 1-1-8 什么叫热激发？

第二节 PN 结

在本征硅或本征锗中掺入一定浓度的施主杂质，可以形成 N 型半导体，若再掺入浓度更高的受主杂质就会使 N 型半导体转变为 P 型半导体，这种现象叫杂质补偿。用杂质补偿的方法可将 N 型（或 P 型）半导体材料的某一部分转变为 P 型（或 N 型）半导体。用此工艺可以

制成 PN 结。

PN 结是半导体二极管和三极管最基本的结构，因此需要弄清它的形成过程和特性。

一、PN 结的形成

图 1-7 是 P 型和 N 型半导体的示意图。

图中○代表 P 型半导体的多数载流子空穴，⊖代表 P 型半导体中被晶格固定而不能移动的负离子。负离子是受主杂质的原子接受一个价电子形成的。

图中●代表 N 型半导体中的多数载流子自由电子，⊕代表 N 型半导体中被晶格固定而不能移动的正离子。正离子是施主杂质的原子失去一个电子形成的。

图中未画出半导体原子和少数载流子。

当用上述的工艺方法使 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，因界面两边存在多子的浓度差，于是就产生了多子的扩散运动（图 1-8）。

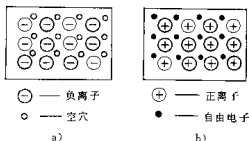


图 1-7 P 型和 N 型半导体示意图

a) P 型半导体 b) N 型半导体

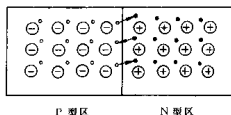


图 1-8 形成 PN 结时多数载流子的扩散

多子的扩散运动首先在界面附近进行。由 P 型区扩散到 N 型区的多子空穴与 N 型区界面附近的电子复合；由 N 型区扩散到 P 型区的多子电子与 P 型区界面附近的空穴复合。多子扩散的结果是在界面两侧分别暴露出很薄一层不能移动的负离子和正离子。这样在 P-N 界面两侧就形成了一边带正电荷，而另一边带负电荷的“空间电荷区”。在空间电荷区内产生了方向由正电荷区指向负电荷区的电场。这个电场是 PN 结内部电荷产生的，所以叫“内建电场”。内建电场出现后对两区多子的扩散起阻碍作用，正是由于这个原因也常把空间电荷区叫做阻挡层。

内建电场阻止两区多子继续扩散的同时，却推动了两区的少子越过空间电荷区进入对方区内。少数载流子在内建电场作用下有规则地运动称为漂移运动。

PN 结形成之初，多子扩散运动占绝对优势，随着内建电场的形成、增强，多子扩散运动逐渐减弱，而少子漂移运动却逐渐增强。最终实现了多子扩散运动和少子漂移运动的动态平衡，这时空间电荷区的宽度最终稳定下来。在空间电荷区内载流子极少，所以空间电荷区内的电阻率很高。在这里原属 P、N 两区的多数载流子被复合掉了，或者说被“消耗殆尽”，所以空间电荷区也叫耗尽区，这就是所说的 PN 结（图 1-9）。

内建电场的形成使得空间电荷区内存在电势差，称为 PN 结的“内建电势差”或称为“势垒”。内建电势差用 U_D 表示：

硅制成的 PN 结， $U_D = (0.6 \sim 0.8) \text{ V}$

锗制成的 PN 结， $U_D = (0.2 \sim 0.3) \text{ V}$

二、PN 结的单向导电性

在 PN 结两端施以外电压称为给 PN 结以偏置。如果所加的外电压是 P 端的电位高于 N 端的电位,称为正向偏置(简称正偏),反之称为反向偏置(简称反偏)。

PN 结上未加外电压时,由多子扩散所形成的扩散电流和由少子漂移所形成的漂移电流相平衡,PN 结内无宏观电流。在 PN 结上外加电压后这种平衡状态被破坏,加不同的偏置会使 PN 结表现出完全不同的导电性能。

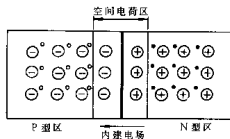


图 1-9 PN 结的形成

(一) PN 结的正向偏置

PN 结上加正向偏置电压(即外电源正极接 P 区,负极接 N 区),如图 1-10 所示。

此时外加电场的方向与内建电场的方向相反,外加电场削弱了内建电场,空间电荷区变窄。原来处于平衡状态的多子扩散运动和少子漂移运动失去了平衡,致使多子扩散运动的规模超过了少子漂移运动的规模。由于参与扩散的是多数载流子,所以形成了较大的扩散电流,这就是流过 PN 结的正向电流。PN 结正向偏置时呈现了很小的电阻,即 PN 结导通。正向电流包括空穴电流和电子电流,总电流 I 是二者的代数和。外电源源源不断地向半导体提供电荷,从而在外电路获得了持续不断地电流。

(二) PN 结的反向偏置

PN 结上加反偏电压(即外电源正极接 N 区,负极接 P 区),如图 1-11 所示。

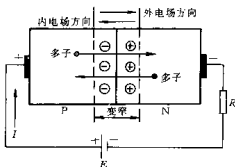


图 1-10 PN 结加正向偏置

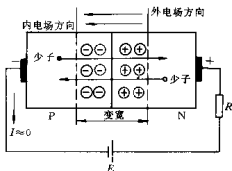


图 1-11 PN 结加反向偏置

此时外加电场的方向与内建电场的方向一致,外电场使 PN 交界面两侧的空穴和自由电子移走,从而使空间电荷区变宽,内建电场增强。增强了的内建电场阻止两区多子的扩散运动,致使扩散电流几乎为零。增强了的内建电场在阻止多子扩散的同时却极力地推动两区少子的漂移,形成漂移电流(即反向电流)。由于漂移电流是少数载流子定向运动形成的,而少数载流子的数量又很少,因此反向电流很小,这时 PN 结呈现很高的电阻,即 PN 结截止。

必须指出,因为少数载流子是热激发产生的,随着环境温度的升高,少数载流子的数量随之增多。即使是在相同的反向电压作用下,反向电流也会因温度升高而增大,也就是说温度对反向电流的大小影响很大。

综上所述,PN 结正向偏置时呈现低阻性,正向电流较大,此时 PN 结处于正向导通状态;

当PN结反向偏置时呈高阻性,反向电流很小,此时PN结处于反向截止状态。可见PN结具有单向导电性。

练习与思考

1-2-1 什么是载流子的扩散和漂移?

1-2-2 内建电场形成后使得空间电荷区内存在电势差。请问,将二极管短路后是否有电流产生?

1-2-3 怎样将PN结正向偏置、反向偏置?

1-2-4 PN结正向偏置时为什么会产生较大的正向电流?PN结反向偏置时为什么产生的反向电流却很小?

1-2-5 反向电流为什么会随环境温度而变化?

第三节 半导体二极管

在PN结上加欧姆接触电极,做出引线,外加管壳就制成了二极管。二极管是电子线路中最常用的电子器件。按所用材料,二极管可分为硅二极管和锗二极管;按PN结的结构,可分为点接触型二极管和面结合型二极管。

(1) 点接触型二极管 点接触型二极管的结构如图1-12所示。

这种二极管的结构特点是,PN结的结面积小,因而结电容小。由于结面积小,允许通过的电流也小(十几或几十毫安以下)。由于结电容小,很适用于高频电路。点接触型二极管常用于小电流整流和高频时的检波。

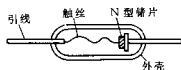


图 1-12 点接触型二极管结构

(2) 面结合型二极管 面结合型二极管的结构如图1-13所示。

这种二极管的PN结结面积大,因而结电容也大。由于结面积大,管内允许通过较大的正向电流(几百毫安,甚至几百安)。由于结电容大,只适用于在较低的频率下工作。面结合型二极管主要用于大功率整流。

电路图中,二极管用图1-14所示的图形符号表示。

符号箭头一端是二极管的正极(内接P型半导体),另一端是二极管的负极(内接N型半导体)。箭头所指的方向是二极管正向导通时正向电流的方向。

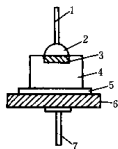


图 1-13 面结合型二极管的结构

1—阳极引线 2—P型再结晶层
3—PN结 4—N型硅 5—接触座
6—底座 7—阴极引线

为了更深刻地了解二极管的单向导电特性,下面研究二极管的伏安特性曲线和近似模型。

一、二极管的伏安特性曲线

把加在二极管两端的电压 U 与流过二极管电流 I 之间的数量关系画成曲线,画在直角坐标系中,电压与电流之间的关系曲线叫做二极管的伏安特性曲线(图1-15)。

图中两条曲线分别是锗二极管和硅二极管的伏安特性曲线。曲线可分为三部分:正向特

性；反向特性；反向击穿特性。

(一) 正向特性

当加在二极管两端的电压为 0V 时，流过二极管的电流为 0A，所以特性曲线通过坐标原点。这是因为当 PN 结上未加外电压时 PN 结的多子扩散和少子漂移处于动平衡状态，此时扩散电流等于漂移电流，二者方向相反，流过 PN 结的总电流为零。

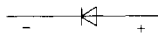


图 1-14 二极管的图形符号

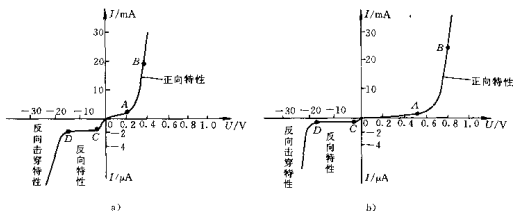


图 1-15 二极管的伏安特性曲线

a) 锗二极管的伏安特性曲线 b) 硅二极管的伏安特性曲线

在正向特性起始的一段 (0A) 虽然正向电压增加，但正向电流却增加缓慢。这是因为当正向电压比较小时，外加电场还不足以克服 PN 结内电场对多子扩散运动的阻力，因此还不能形成较大的扩散电流。这时正向电流很小，二极管呈现很高的电阻。

当正向电压超过一定数值后，随着正向电压的增加，正向电流增长很快。这个一定数值的正向电压叫做死区电压。通常锗管的死区电压为 0.2V，硅管的死区电压为 0.5V。死区电压的大小与半导体材料及环境温度有关。

对应特性曲线的 AB 段，由于外加电压的升高，内电场被削弱了，这为多子的扩散创造了条件，出现了正向电流随正向电压升高很快增大的情况。

比较图 a、图 b 两条曲线可知，锗管电流上升段曲线比较缓，而硅管电流上升段曲线陡。这说明硅管正向导通后电流迅速增长，而管压降基本不变。

(二) 反向特性

当二极管两端加反向电压时，起始随着反向电压的增大 (0~1V 范围内) 反向电流也随之增大 (OC 段)。这是由于外加反向电压时外加电压方向与内电场方向一致，因此多子扩散必将受到更大的阻力，由前面的分析知：

$$\text{反向电流} = \text{漂移电流} - \text{扩散电流}$$

加反向电压之初，反向电流随扩散电流的减小而有所增大。当外加反向电压超过 -1V 时反向电流则不再增加。这是因为外加反向电压大到一定程度时多子形成的扩散电流完全被截止，此时的反向电流就是由少子漂移运动形成的漂移电流。在一定温度下少子的数目是固定的，所

以反向电压再增加, 反向电流仍保持一定的数值, 无大的变化 (CD 段)。这时的反向电流称为反向饱和电流。

应该指出, 由于少子是热激发产生的, 所以少子的多少与温度有关, 显然反向饱和电流的大小也与温度有关。不同材料制成的二极管, 其反向饱和电流在数值上也不相同。室温下硅管的反向饱和电流约为 $1\mu\text{A}$ 到几十 μA , 锗管可达几百微安。反向特性如图中的 OD 段。

(三) 反向击穿特性

当二极管两端所加的反向电压超过一定数值时, 反向电流急剧增大, 这一现象叫反向击穿。对应电流突变点 (图中 D 点) 的电压称为二极管的反向击穿电压。二极管被反向击穿时流过 PN 结的反向电流很大, 二极管的功率损耗也很大, 这将导致 PN 结的损坏, 一般不允许出现这种情况。图中曲线 D 点以下为反向击穿特性。

二、含二极管的电路分析

二极管是非线性元件。从二极管的正向伏安特性曲线可以看出, 随正向电压数值的不同, 二极管的等效电阻随之改变。含有非线性元件的电路叫做非线性电路, 分析非线性电路常采用图解法及等效电路法。

(一) 图解法 (静态分析)

图 1-16 是一个含二极管的直流电路, E 为产生偏置电压的电源电动势, R_L 为负载电阻。

电路中, 端钮 A、B 左边是由线性电阻 R_L 和电压源 E 串联构成的线性电路。根据基尔霍夫电压定律, 可列出其电压方程:

$$U_D = E - I_D R_L \quad (1-1)$$

在 U - I 平面上, 可作出由式 (1-1) 所决定的直线:

- 1) 当 $U_D = 0$ 时 $I_D = E/R_L$
- 2) 当 $I_D = 0$ 时 $U_D = E$

由式 (1-1) 所决定的直线, 斜率为 $-1/R_L$, 此斜率仅与直流负载电阻有关, 称该直线为直流负载线 (图 1-17)。式 (1-1) 就是直流负载线方程。

电路中, 端钮 A、B 右边是一个二极管, 这是一个非线性元件。加在二极管上的电压 U 和流过二极管的电流 I 之间的函数关系由该二极管的伏安特性曲线确定。图 1-17 中画出了二极管的伏安特性曲线。

直流负载线和伏安特性曲线的交点 Q 叫做电路的直流工作点或静态工作点。该点的横坐标为 U_Q , 纵坐标为 I_Q , 这两个值表明了二极管的直流工作状态。

用上述图解的方法对电路进行的分析叫做静态分析, 静态分析的目的是确定静态工作点。

(二) 静态电阻

二极管在某一静态工作点下的直流电压 U_Q 与直流电流 I_Q 之比定义为静态电阻 R (又叫直流电阻)。

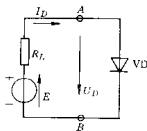


图 1-16 含二极管的直流电路

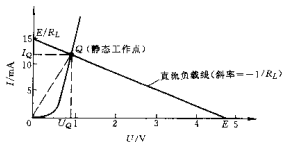


图 1-17 含二极管电路的图解法

$$R = \frac{U_Q}{I_Q} \quad (1-2)$$

割线 OQ 斜率的倒数就是正向直流电阻 R 。直流电阻 R 不是常数，它与工作点 Q 的位置有关。

二极管加反向电压时，电流很小，其反向直流电阻很大。

(三) 动态电阻

二极管常工作在交流电压下，在图 1-18 中设静态工作点为 Q ，过 Q 点作一条切线，动态电阻 r （又叫交流电阻）定义为：

$$r = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \quad (1-3)$$

r 的确定方法：

首先在正向伏安特性曲线上选定静态工作点 Q ，过 Q 点作切线，求出切线的斜率 $\tan \beta$ ， Q 点的动态电阻为：

$$r = \frac{1}{\tan \beta}$$

理论和实验都已证明：

$$r = \frac{26\text{mV}}{I_Q(\text{mA})} \quad (1-4)$$

不同工作点 Q 具有不同的动态电阻。在一定的静态电流下，当二极管上叠加一个微小的交变电压 u 时，可以认为二极管中电流的交变分量 i 与电压交变分量 u 成正比，即

$$i = \frac{u}{r} \quad (1-5)$$

动态电阻又叫做二极管的微变等效电路，可用其对二极管进行动态分析。

(四) 二极管的近似模型和特性

在工程计算中为简化计算，常用折线代替二极管的实际伏安特性曲线。对应不同的计算精度有下面几种折线近似模型。

1. 理想特性和模型 图 1-19 为理想二极管模型。

理想二极管正向导通时电压降为零；反向截止时电阻为无穷大，反向电流为零。实际上

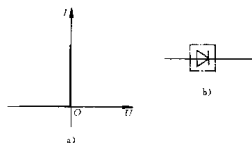


图 1-19 理想特性和模型

a) 特性 b) 模型

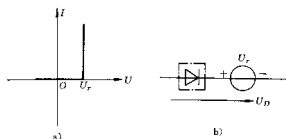


图 1-20 近似特性和模型

a) 特性 b) 模型

这种理想二极管相当于一个开关。

2. 近似特性和模型 在二极管的近似特性和模型中(图 1-20),考虑了二极管的正向管压降 U_r 。硅材料二极管的正向管压降 $U_r=0.7\text{V}$; 锗材料二极管的正向管压降 $U_r=0.3\text{V}$ 。

3. 折线近似特性和模型 折线近似特性就是图 1-21 中的折线 $O-M-Q$ 。用折线代替二极管伏安特性曲线分析工作点 Q 处微变电压 Δu 和微变电流 i 之间的关系不会产生很大的误差(图 1-22)。

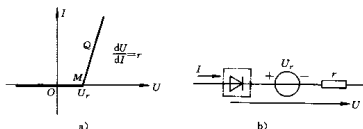


图 1-21 折线近似特性和模型

a) 特性 b) 模型

折线 $O-M-Q$ 的方程:

$$U = Ir + U_r \quad (1-6)$$

式中 U_r 是过工作点 Q 的切线在横轴上的截距。根据式 (1-6) 可画出二极管的电路模型, 如图 1-21b 所示。

(五) 等效电路法

若在图 1-16 含二极管的直流电路中引入一个交流电源 e , 对该电路进行分析时, 可用二极管的电路模型代替二极管, 得到如图 1-23 所示的等效电路。

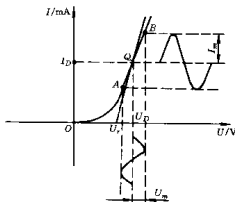


图 1-22 动态分析

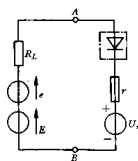


图 1-23 含二极管电路模型的等效电路

为求取电路中的电流, 画出它的直流通路和交流通路(图 1-24)。

在直流通路中求得电路的静态电流为:

$$I_Q = \frac{E - U_r}{R_L + r} \quad (1-7)$$