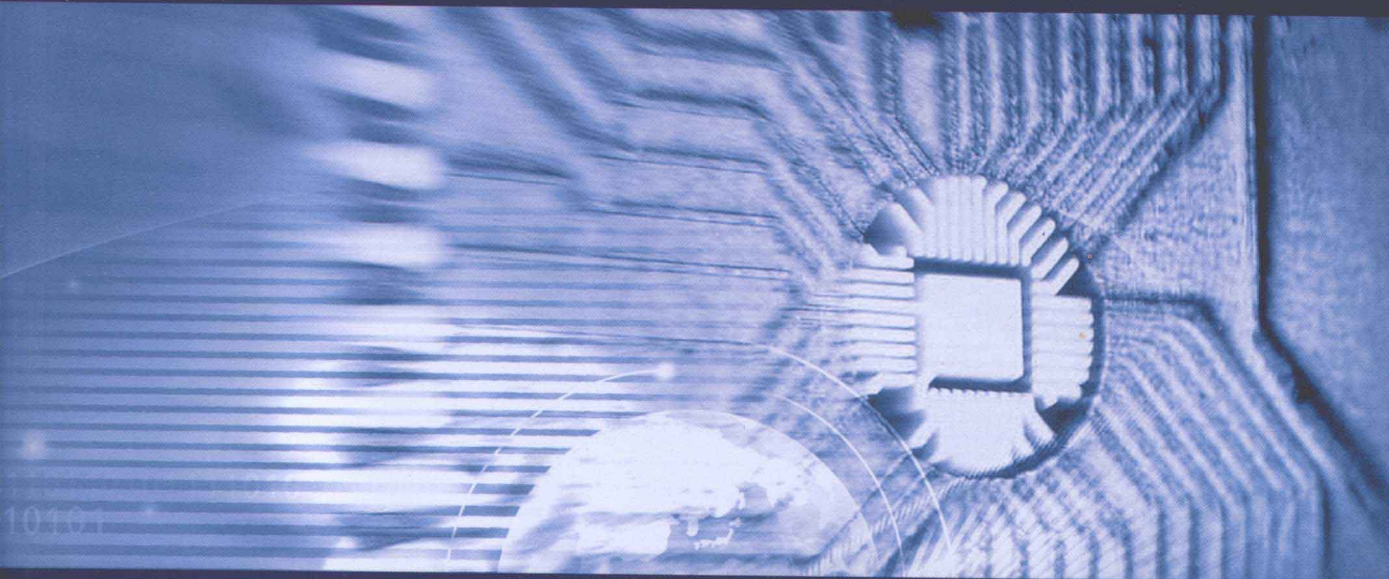




普通高等教育“十二五”规划教材



电子技术基础 (模拟部分)

房 晔 主 编

张玉峰 周亚滨 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

电子技术基础

(模拟部分)

主 编 房 晔
副主编 张玉峰 周亚滨
编 写 康 涛 宋国义
厉 谨 李凤霞
主 审 刘 晔



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书是根据高等院校电子技术基础课程教学基本要求,结合高等院校工科二类院校的具体特点和培养方向而编写的。本书按照承上启下、循序渐进的原则,系统地介绍了电子技术基础(模拟部分)基本原理及应用,将新的课程体系、教学内容与教学改革的需要、学生今后在电子技术方面的进一步需求融为一体。本书还对Multisim 10 电子线路仿真软件进行了介绍。

本书可作为高等院校本科模拟电子技术基础课程的教材,也可供从事电子技术方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础. 模拟部分/房晔主编. —北京:中国电力出版社, 2011. 11

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2322-3

I. ①电… II. ①房… III. ①电子技术-高等学校-教材②模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 229742 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 11 月第一版 2011 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 446 千字

定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

本书根据原国家教委 1995 年颁发的“高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求”,结合高等学校工科二类院校的具体特点和培养方向,将新的课程体系和教学内容与改革的需要、学生今后在电子技术方面的进一步需求融为一体。本书共分 10 章,按照承上启下、循序渐进的原则,系统地介绍了常用半导体器件,放大电路的基本构成、工作原理及分析方法,模拟集成电路中的基本单元电路、集成运算放大器,反馈的基本概念、负反馈放大电路的分析及性能指标的计算方法,有源滤波器等信号处理电路、模拟乘法器及应用,正弦和非正弦信号产生电路,功率放大电路的特点及电路构成和工作原理,直流稳压电源的构成及工作原理,电子线路中常见的实际问题, Multisim 10 电子线路仿真软件。

本书在内容体系上,具有自身的完整性和系统性;在叙述方法上,物理概念准确、分析过程简明,便于学生理解和记忆;在语言文字上,深入浅出、通俗易懂和简明扼要。

本书可作为高等学校电气信息类等专业的模拟电子技术基础课程的教材,也可供从事电子技术方面工作的工程技术人员参考和学习。

本书是由西安工程大学与佳木斯大学联合编写的。参加本书编写的人员都是长期从事教学工作,具有丰富教学经验的教师。其中房晔、周亚滨负责统稿、审定及全书图片的制作和整理工作。西安交通大学刘晔教授担任本书主审。编写分工为:房晔、厉谨编写第 2、4 章,房晔编写附录,张玉峰编写第 6、7 章,康涛编写第 1、3、5 章,宋国义编写第 9、10 章,李凤霞编写第 8 章。

限于编者的水平和经验,在本书的编审工作中可能存在不少缺点和不足,希望使用本书的教师、学生以及广大读者提出批评和建议,以便今后的修订,使本书质量不断提高。

编 者

2011 年 11 月

目 录

前言

第1章 常用半导体器件	1
1.1 半导体导电特性	1
1.2 PN结	3
1.3 二极管及其应用电路	7
1.4 双极型三极管	15
1.5 场效应晶体管	25
思考题和习题	34
第2章 放大电路分析基础	38
2.1 基本放大电路	38
2.2 放大电路直流工作状态的分析和计算	40
2.3 放大电路交流工作状态的分析和计算	43
2.4 三种基本组态放大电路的分析	50
2.5 静态工作点的稳定及其偏置电路	56
2.6 场效应管放大电路	62
2.7 多级放大电路	68
2.8 放大电路的频率特性	73
思考题和习题	87
第3章 集成运算放大器	95
3.1 集成运算放大器的基本结构	95
3.2 电流源电路	97
3.3 差动放大电路	101
3.4 集成运算放大器举例	107
3.5 集成运算放大器的主要性能参数	110
3.6 集成运算放大器的选用原则及使用中应注意的问题	112
思考题和习题	115
第4章 负反馈放大电路	118
4.1 反馈的基本概念	118
4.2 负反馈的四种组态	120
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	125
4.4 负反馈放大电路的计算方法	131
4.5 负反馈放大电路的稳定性问题	135
思考题和习题	137
第5章 信号运算电路	142

5.1 集成运放在信号运算方面的应用	142
5.2 模拟乘法器及其应用	147
思考题和习题	150
第6章 信号产生与处理电路	154
6.1 自激振荡的条件	154
6.2 正弦波振荡器	156
6.3 非正弦信号产生电路	168
6.4 单片集成多功能函数发生器	179
6.5 有源滤波电路	182
思考题和习题	189
第7章 功率放大电路	197
7.1 功率放大电路的特点及分类	197
7.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	199
7.3 甲乙类双电源互补对称功率放大电路	202
7.4 大功率三极管输出特性曲线的分区与选择	204
7.5 无输出变压器功率放大电路	205
7.6 集成功率放大电路	206
7.7 功率半导体器件的二次击穿与散热问题	211
思考题和习题	214
第8章 直流稳压电源	221
8.1 小功率整流电路	221
8.2 滤波电路	225
8.3 直流稳压电路	229
思考题和习题	240
第9章 电子线路的实际问题	244
9.1 接地	244
9.2 电子线路中常见的干扰及其抑制方法	246
第10章 Multisim 10 电子线路仿真软件简介	249
10.1 Multisim 10 操作界面介绍	250
10.2 Multisim 10 创建电路的基本操作	257
10.3 Multisim 10 在模拟电子线路基础中的仿真	268
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	275
附录 B 常用半导体分立器件的参数	276
附录 C 半导体集成器件型号命名方法	279
附录 D 常用半导体集成电路的参数和符号	280
附录 E 部分国内外集成运算放大器型号对照及索引	281
参考文献	285

第1章 常用半导体器件

多数现代电子器件是由性能介于导体与绝缘体之间的半导体材料制造而成的。为了从电路的观点理解这些器件的性能,首先必须从物理的角度了解它们是如何工作的。这里着重从半导体材料的特殊物理性质以及这些性质对形成电子器件的伏安($U-I$)特性的原理来讨论。

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、质量轻、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础知识,接着讨论半导体器件的基础——PN结,并重点讨论二极管、三极管和场效应管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数,以及二极管基本电路及其分析方法与应用。

1.1 半导体导电特性

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

物质按导电能力的不同,可分为导体、绝缘体和半导体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,在常态下更接近于绝缘体,但它在掺入杂质或受热、受光照后,其导电能力明显增强而接近于导体,利用半导体的这些特性,主要将它制成具有特殊功能的元器件,如晶体管、集成电路、整流器、激光器以及各种光电探测器件、微波器件等。半导体元素有锗、硅、硒、硼、碲、铋等。硅(Si)和锗(Ge)是主要的半导体材料,其中硅(Si)占据了90%以上的半导体材料份额。

半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外,它还具有不同于其他物质的独特性质。这些独特的性质集中体现在它的电阻率可以因某些外界因素的改变而明显的变化,具体体现在以下三个方面。

(1) 热敏性:一些半导体对温度的反应很灵敏,其电阻率随着温度的升高而明显下降,利用这种特性很容易制成各种热敏器件,如热敏电阻、温度传感器等。

(2) 光敏性:有些半导体的电阻率随着光照的增强而显著地下降,利用这种特性可以做成各种光敏器件,如光敏电阻和光电管等。

(3) 掺杂性:半导体的电阻率受掺入“杂质”的影响极大,在半导体中即使掺入的杂质十分微量,也能使电阻率大大下降,而导电能力显著增加。利用这种独特的性质可以制成各种各样的半导体器件。

为了理解以上这些特点,必须了解半导体的结构。

1.1.2 本征半导体

常用于制作半导体器件的材料是硅(Si)和锗(Ge)。它们都是四价元素,其原子核的最外层轨道上有四个电子,称为价电子。为了制作半导体器件,它们都被提纯而制成单晶体。

所以,我们把完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。

在本征硅或锗的单晶体中，它们的原子都按一定间隔排列成有规律的空间点阵（称为晶格）。

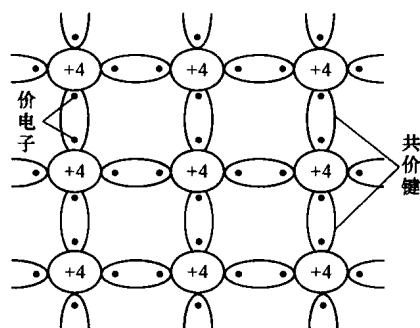


图 1.1 单晶硅或锗的共价键结构平面示意图

由于原子间相距很近，价电子不仅受到自身原子核的约束，还要受到相邻原子核的吸引，使得每个价电子为相邻原子所共有，从而形成共价键。这样四个价电子与相邻的四个原子中的价电子分别组成四对共价键，依靠共价键使晶体中的原子紧密地结合在一起。图 1.1 是单晶硅或锗的共价键结构平面示意图。

本征半导体的价电子虽受共价键的束缚而使每个原子的最外层电子数为 8 个，处于较为稳定的状态，然而和绝缘体相比，这种束缚却是比较弱的。当温度为绝对零度时，晶体不呈现导电性。当温度升高时，本征半导体的共价键结构中的价电子获得一定的能量

就可挣脱共价键的束缚，成为自由电子，而在这些自由电子原有的位置上留下一个空位置，称为空穴。空穴因失去电子而带正电荷。空穴是不能移动的，但由于正负电荷的相互吸引，空穴附近的电子会填补这个空位置，于是又产生新的空穴，该空穴又会有相邻的电子来递补。如此继续下去，就相当于空穴在运动。空穴运动的方向与价电子的运动方向相反，因此空穴运动相当于正电荷的运动。空穴做定向运动，也能使半导体导电。

半导体中的空穴和自由电子均能参与导电，是运载电流的粒子，故称为载流子。半导体的重要物理特性是它的电导率，电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子的数目有关。电荷载流子的浓度越高，其电导率越高。而半导体内载流子的浓度又取决于许多因素，包括材料的基本性质、温度值以及杂质的存在等。在半导体中两种载流子同时参与导电，是半导体导电和导体导电的重要区别之一。

本征半导体中，外界激发所产生的自由电子和空穴总是成对出现，称为电子—空穴对，这种现象称为本征激发，本征激发产生的自由电子和空穴的数量是十分有限的。实际上，自由电子和空穴成对产生的同时，还存在复合，即自由电子和空穴相遇而释放能量，电子—空穴对消失。

在本征半导体中，随着温度的升高或光照的增强，电子—空穴对的数量将大大增加，导电能力也将大大增加，这就是半导体具有光敏性和热敏性的基本原理。

1.1.3 杂质半导体

常温下，本征激发产生的电子—空穴对数目极少。故本征半导体的导电能力很低。为了提高半导体的导电性能，就必须提高载流子的浓度，为此只要在本征半导体中掺入微量三价元素（如硼、镓）或五价元素（如磷、砷），就能使半导体的导电性能发生明显变化。我们把掺入的元素称为杂质，掺杂后的半导体称为杂质半导体。

根据掺入杂质的性质不同，可将杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素（如磷）后，就可形成 N 型半导体，如图 1.2 所示。此时半导体的晶体结构中，磷原子在顶替掉一个硅原子而与周围的四个硅原子以共价键结合起来后，还多余了一个价电子，该价电子因为不在共价键中，而受磷原子核的束缚十分脆弱，极易摆脱原子核束缚而成为自由电子。故使原来的中性磷原子成为不能移动的正离

子。五价元素给出多余的价电子，被称为施主杂质。施主杂质在提供自由电子的同时不产生新的空穴，这是它与本征激发的区别。

在加入施主杂质产生自由电子的同时，虽然不产生新的空穴，但原来的本征晶体由于本征激发仍会产生少量的电子—空穴对。所以控制掺入杂质的多少，便可控制自由电子数量。故在 N 型半导体中，自由电子数远大于空穴数，在这种半导体中，以自由电子导电为主，因而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少量的三价元素（如硼），可形成 P 型半导体，如图 1.3 所示。此时半导体的晶体结构中，硼原子最外层的三个价电子在和相邻的四个硅原子组成共价键时因缺少一个价电子而产生一个空位。当邻近的电子填补该空位时，使硼原子成为不能移动的负离子。三价元素能够接收电子，被称为受主杂质。受主杂质在提供空穴的同时不产生新的自由电子。

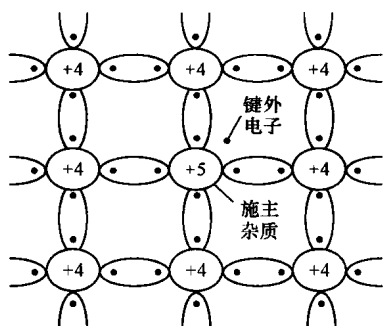


图 1.2 N 型半导体的内部结构平面示意图

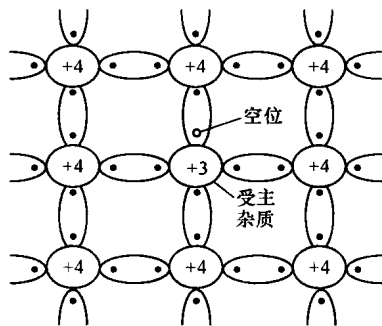


图 1.3 P 型半导体的内部结构平面示意图

因此，在 P 型半导体中，总的载流子数目（空穴）大为增加，导电能力增强，其空穴是多数载流子（简称多子），自由电子是少数载流子（简称少子）。

综上所述，半导体掺入杂质后，载流子的数目都有相当程度的增加。N 型半导体和 P 型半导体中的多子主要由杂质提供，与温度几乎无关，多子浓度由掺杂浓度决定；而少子由本征激发产生，与温度和光照等外界因素有关。

必须强调，不论何种类型的杂质半导体，它们对外都显示电中性；不同的是，在外加电场的作用下，N 型半导体中电流的主体是电子，P 型半导体中电流的主体是空穴。

1.2 PN 结

通过掺杂工艺，把本征硅（或锗）片的一边做成 P 型半导体，另一边做成 N 型半导体，这样在它们的交界面处会形成一个很薄的特殊物理层，称为 PN 结。PN 结是构造半导体器件的基本单元。其中，普通晶体二极管就是由 PN 结构成的。

1.2.1 PN 结的形成

物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方运动，这种由于浓度差而产生的运动称为扩散运动。当 P 型半导体和 N 型半导体有机地结合在一起时，因为 P 区一侧空穴是多子、自由

电子是少子, 而 N 区一侧电子是多子、空穴是少子, 所以在它们的交界面处存在空穴和电

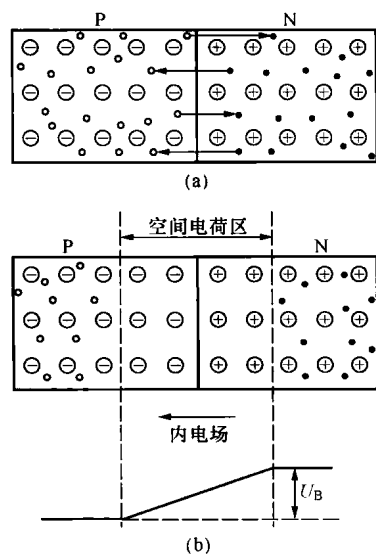


图 1.4 PN 结的形成

(a) P 区与 N 区中载流子的运动;
(b) 平衡状态下的 PN 结

子的浓度差, 且两种载流子的浓度差很大。浓度差的存在使载流子由高浓度区域向低浓度的区域进行扩散运动, 形成的电流称为扩散电流。于是 P 区中的多子空穴会向 N 区扩散, 并在 N 区被电子复合; 而 N 区中的多子电子也会向 P 区扩散, 并在 P 区被空穴复合。上述过程如图 1.4 (a) 所示。这样在 P 区和 N 区的交界面处分别留下了不能移动的受主负离子和施主正离子。结果是在交界面的两侧形成了由等量正、负离子组成的空间电荷区, 在这个区域内, 多数载流子已扩散到对方并复合掉了, 或者说消耗尽了。因此空间电荷区有时又称为耗尽区。它的电阻率很高, 扩散越强, 空间电荷区越宽。

空间电荷区出现以后, 正负离子的相互作用, 在空间电荷区形成了一个电场, 其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。由于这个电场是在空间电荷区内部形成的, 而不是外加电压形成的, 故称为内电场。显然, 这个内电场的方向是阻止载流子扩散运动的, 故又称阻挡层。

在内电场的作用下, 内部载流子将受力做定向移动。对于空穴而言, 其移动方向与电场方向相同, 而电子则是逆着电场的方向移动。这种由于电场作用而导致载流子的运动称为漂移运动, 即在内电场作用下, P 区少子电子向 N 区漂移, N 区少子空穴向 P 区漂移。多子扩散运动形成的扩散电流和少子漂移运动形成的漂移电流的方向是相反的。

从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区失去的空穴, 而从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子, 这就使空间电荷减少。因此, 漂移运动是使空间电荷区变窄, 其作用与扩散运动相反。扩散运动和漂移运动既互相联系又互相对立。扩散运动使空间电荷区加宽, 电场增强, 使多数载流子扩散的阻力增大, 但使少数载流子的漂移增强; 而漂移运动使空间电荷区变窄, 电场减弱, 又使扩散容易进行。当漂移运动和扩散运动相等时, 空间电荷区便处于动态平衡状态。一旦二者达到动态平衡时, 空间电荷区的宽度保持相对稳定, 正负离子数也不再变化。这个处于动态平衡的空间电荷区被称为 PN 结。为了强调 PN 结的某种特性, 空间电荷区也称为势垒区, 势垒电压 U_B 描述内电场的大小, 如图 1.4 (b) 所示。

1.2.2 PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加电压, 就将破坏原来的平衡状态。此时, 扩散电流不再等于漂移电流, 因而 PN 结将有电流流过。当外加电压极性不同时, PN 结表现出截然不同的导电性能, 即呈现出单向导电性。

1. PN 结外加正向电压时处于导通状态

PN 结加正向电压时的导电情况如图 1.5 所示。外加的正向电压有一部分降落在 PN 结区, 方向与 PN 结内电场方向相反, 削弱了内电场。内电场对多子扩散运动的阻碍减弱, 扩散电流加大。扩散电流远大于漂移电流, 可忽略漂移电流的影响, PN 结呈现低阻性。

其物理过程是在外加电场作用下, PN 结的平衡状态被打破, P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向 PN 结移动, 即 P 区空穴进入 PN 结后, 就要和原来的一部分负离子中和, 使 P 区的空间电荷量减少。同样, 当 N 区电子进入 PN 结时, 中和了部分正离子, 使 N 区的空间电荷量减少, 结果 PN 结变窄。耗尽区变薄, 耗尽区中载流子增加, 因而电阻的阻值减小。所以外加电压使 PN 结的电场减弱。PN 结电场强度的减小, 有利于 P 区和 N 区中多数载流子的扩散运动, 形成扩散电流。这时扩散运动将胜过漂移运动, N 区电子不断扩散到 P 区, P 区空穴不断扩散到 N 区。PN 结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定, 在外电路上形成一个流入 P 区的电流, 称为正向电流。当外加电压升高, PN 结电场便进一步减弱, 扩散电流随之增加, 在正常工作范围内, PN 结上外加电压只要稍有变化 (如 0.1V), 便能引起电流的显著变化, 其电流 I 是随外加电压呈现指数规律上升的。这样, 正向的 PN 结表现为一个阻值很小的电阻, 此时称 PN 结导通, 也称 PN 结正向偏置。

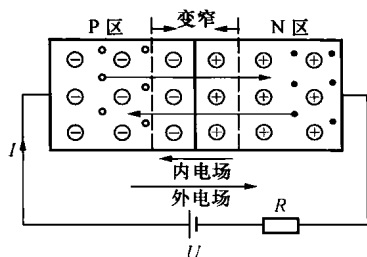


图 1.5 PN 结加正向电压时的导电情况

2. PN 结加反向电压时处于截止状态

PN 结加反向电压时的导电情况如图 1.6 所示。外加的反向电压有一部分降落在 PN 结区, 方向与 PN 结内电场方向相同, 加强了内电场。内电场对多子扩散运动的阻碍增强, 扩散电流大大减小。此时 PN 结区的少子在内电场的作用下形成的漂移电流大于扩散电流, 可忽略扩散电流, 由于漂移电流本身就很很小, PN 结呈现高阻性。反向电压使 N 区和 P 区中的少数载流子更容易产生漂移运动, 因此在这种情况下, PN 结内的电流由起支配地位的漂移电流所决定。漂移电流的方向与扩散电流相反, 表现在外电路上有一个流入 N 区的反向电流 I , 它是由少数载流子的漂移运动形成的。由于少数载流子的浓度很小, 所以 I 是很微弱的, 一般硅管为微安数量级。由于 I 很小, PN 结呈现为一个阻值很大的电阻, 此时可认为它基本上是不导电的, 称 PN 结截止, 也称 PN 结反偏。

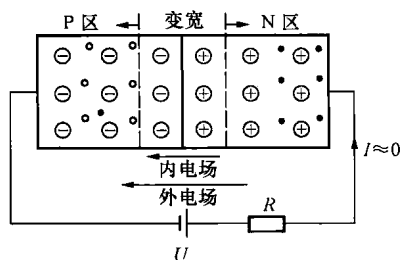


图 1.6 PN 结加反向电压时的导电情况

3. PN 结 $U-I$ 特性的表达式

在 PN 结的两端施加正、反向电压时, 通过结区的电流与外加电压的关系曲线如图 1.7 所示。根据理论分析, PN 结的 $U-I$ 特性可表达为

$$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1.1)$$

$$U_T = kT/q$$

式中: i 为通过 PN 结的电流; u 为 PN 结两端的外加电压; U_T 为温度的电压当量, 常温 (300K) 下 $U_T \approx 26\text{mV}$; k 为玻耳兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$); T 为热力学温度, 即绝对温度 (单位为 K, $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$); q 为电子电荷量 ($1.6 \times 10^{-19}\text{C}$); e 为自然对数的底; I_S 为

反向饱和电流, 对于分立器件, 其典型值约在 $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{ A}$ 的范围内。

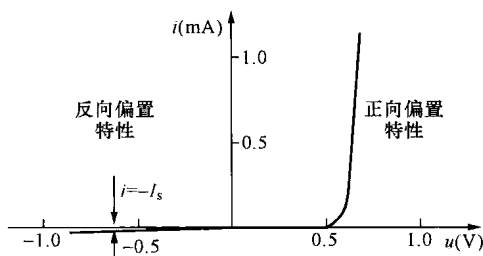


图 1.7 PN 结的 $U-I$ 特性

关于式 (1.1), 可分析如下:

(1) PN 结两端加正向电压时, 电压 u 为正值。当 $u \gg U_T$ 时, 式 (1.1) 中 $e^{\frac{u}{U_T}}$ 的值远大于 1, 括号中的 1 可以忽略, $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$, 即电流 i 与电压 u 成指数关系, 如图 1.7 中的正向电压部分所示。

(2) 当 PN 结两端加反向电压时, u 为负值。当 $|u|$ 比 U_T 大几倍时, 指数项趋近于零, 因此 $i = -I_S$, 如图 1.7 中的反向电压部分所示。可见

当温度一定时, 反向饱和电流 I_S 是个常数, 基本不随外加反向电压的大小而变化。

4. PN 结的反向击穿

当加到 PN 结两端的反向电压增大到一定数值时, 反向电流突然增加, 这个现象就称为 PN 结的反向击穿 (电击穿), 如图 1.8 所示。发生击穿所需的反向电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。PN 结电击穿后电流很大, 容易使 PN 结发热, 这时 PN 结的电流、温度又进一步升高, 最终烧毁 PN 结。反向击穿电压的大小与 PN 结的制造参数有关。

PN 结电击穿主要有两种情况。

(1) 当 PN 结反向电压增加时, 空间电荷区中的电场随着增强。产生漂移运动的少数载流子通过空间电荷区时, 在很强的电场作用下获得足够的动能, 与晶体原子发生碰撞, 从而打破共价键的束缚, 形成更多的自由电子—空穴对, 这种现象称为碰撞电离。新产生的电子和空穴与原有的电子和空穴一样, 在强电场作用下获得足够的能量, 继续碰撞电离, 再产生电子—空穴对, 这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后, 载流子的倍增情况就像在陡峭的积雪山坡上发生雪崩一样, 载流子增加得多而快, 使反向电流急剧增大, 于是 PN 结被击穿, 这种击穿称为雪崩击穿。

(2) 当 PN 结空间电荷区中的正、负离子分布密度大而且很薄的时候, 外加不太高的反向电压就可以产生很强的电场, 它能够破坏共价键的束缚, 直接将电子分离出来产生电子—空穴对, 在电场作用下直接形成较大的反向电流, 这种击穿现象称为齐纳击穿。发生齐纳击穿需要的电场强度约为 $2 \times 10^5 \text{ V/cm}$, 这只有在杂质浓度特别高而空间电荷区很窄的 PN 结中才能达到。

齐纳击穿的物理过程和雪崩击穿完全不同。一般整流二极管掺杂浓度没有这么高, 它在电击穿中多数是雪崩击穿造成的。齐纳击穿多数出现在特殊的二极管中, 如齐纳二极管 (稳压管)。

必须指出, 上述两种电击穿过程是可逆的, 当加在稳压管两端的反向电压降低后, 管子仍可以恢复原来的状态。但它有一个前提条件, 就是反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率, 超过了就会因为热量散不出去而使 PN 结温度上升, 直到过热而烧毁, 这种现象就是热击穿。所以热击穿和电击穿的概念是不同的, 但往往电击穿与热击穿共存。

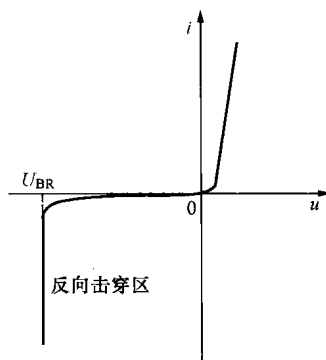


图 1.8 PN 结的反向击穿

电击穿可为人们所利用（如稳压管），而热击穿则是必须尽量避免的。

综上所述，PN 结具有单向导电性。加正向电压时，PN 结电阻很小，电流较大，是多数载流子的扩散运动形成的；加反向电压时，PN 结电阻很大，电流很小，是少数载流子漂移运动形成的。

1.2.3 PN 结的电容效应

在一定条件下，PN 结具有一定的电容效应，根据产生原因的不同分为势垒电容和扩散电容。

(1) 势垒电容 C_B 。势垒电容是由空间电荷区离子薄层形成的。当 PN 结外加电压发生变化时，空间电荷区的宽度也相应地随之变化，即耗尽层的电荷量随外加电压变化而增大或减小，这种现象与电容器的充放电过程相同，此时 PN 结呈现出的电容效应称为势垒电容 C_B 。势垒电容具有非线性，它与结面积、耗尽层宽度、半导体的介电常数以及外加电压有关。

(2) 扩散电容 C_D 。扩散电容是由多子扩散后，在 PN 结的另一侧积累而形成的。当 PN 结处于正向偏置时，如前所述，P 区的空穴将向 N 区扩散，其结果导致在 N 区靠近结的边缘有高于正常情况时的空穴浓度，这种超量的空穴浓度可视为电荷存储到 PN 结的邻域。存储电荷量的大小，取决于 PN 结上所加正向电压值的大小。离结越远，空穴浓度将随之减小，形成一定的空穴浓度梯度分布曲线。这是因为空穴在 N 区与多数载流子—电子产生复合所致。N 区的电子向 P 区扩散的情况与上述情况类似，在 P 区内也形成类似的浓度梯度分布曲线。当外加正向电压不同时，扩散电流即外电路电流的大小也就不同。所以 PN 结两侧堆积的多子的浓度梯度分布也不相同，这就相当电容的充放电过程。PN 结在正向偏置时，积累在 P 区的电子和 N 区的空穴随正向电压的增加而很快增加，扩散电容较大；反向偏置时，载流子数目很少，因此反向偏置对应的扩散电容数值很小，一般可以忽略。

由以上分析可见，PN 结的电容效应是扩散电容 C_D 和势垒电容 C_B 的综合反映，由于 C_D 和 C_B 一般都很小，对于低频信号呈现出很大的容抗，其作用可忽略不计。但在高频运用时，必须考虑 PN 结电容的影响。PN 结电容的大小除了与本身结构和工艺有关外，还与外加电压有关。当 PN 结处于正向偏置时，结电容较大（主要取决于扩散电容 C_D ）；当 PN 结处于反向偏置时，结电容较小（主要取决于势垒电容 C_B ）。

1.3 二极管及其应用电路

1.3.1 二极管的结构和类型

将 PN 结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了半导体二极管，简称二极管。接在二极管 P 区的引出线称为二极管的阳极，接在 N 区的引出线称为二极管的阴极。二极管有许多类型。从工艺上分，有点接触型、面接触型和平面型。点接触型二极管是由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面相接形成 PN 结，因而结面积很小，其极间电容很小，工作频率可达 100MHz 以上，它不能承受高的反向电压和大的电流，故适用于高频电路和数字电路。面接触型和平面型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法做成的，这种二极管的 PN 结面积大，可承受较大的电流，但极间电容也大，这类器件适用于整流，而不宜用于高频电路中。

图 1.9 所示为不同结构的二极管。

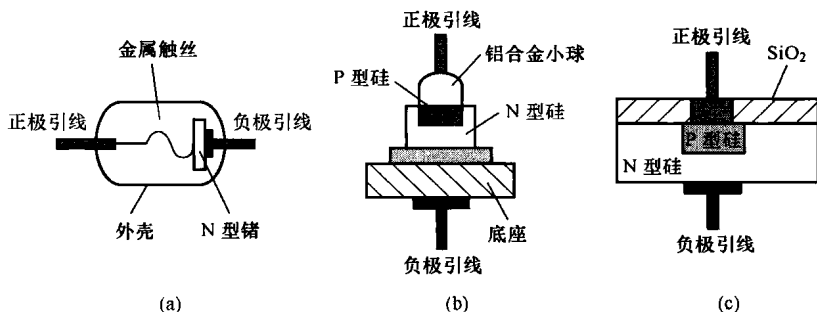


图 1.9 不同结构的二极管

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 平面型

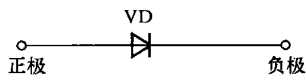


图 1.10 二极管的符号

图 1.10 所示为二极管的符号。其正极对应 PN 结的 P 区，负极对应 N 区，箭头的方向表示正向电流的方向，VD 是二极管的文字符号。

常见的二极管有金属、塑料和玻璃三种封装形式。按照应用的不同，二极管分为整流、检波、开关、稳压、发光、光电、快恢复和变容二极管等。根据使用的不同，二极管的外形各异，图 1.11 所示为几种常见的二极管外形及实物。

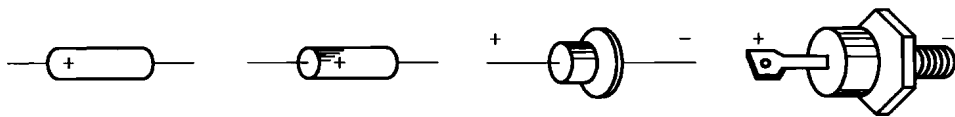


图 1.11 常见的二极管外形及实物

1.3.2 二极管的特性

1. 伏安特性

一般用伏安特性曲线来表示二极管特性。伏安特性是指二极管两端的电压与流过二极管的电流之间的关系。二极管既然是一个 PN 结，当然就具有单向导电性，其伏安特性曲线如图 1.12 所示。

由图 1.12 可见，二极管外加正向电压时，电流和电压的关系称为二极管的正向特性。如图 1.12 所示，当二极管所加正向电压比较小时 ($0 < u_{VD} < U_{th}$)，二极管上流经的电流为 0mA，管子仍截止，此区域称为死区， U_{th} 称为死区电压 (门槛电压)。当二极管承受的正向电压小于死区电压时，外加电压的电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子运动的阻挡作用，导致这一区域二极管正向电流很小。死区电压的大小与二极管的材料有关，并受环境温度影响。通常，硅材料二极管的死区电压约为 0.5 V，锗材料二极管的死区电压约为 0.2V。当正向电压超过死区电压值时，外电场抵消

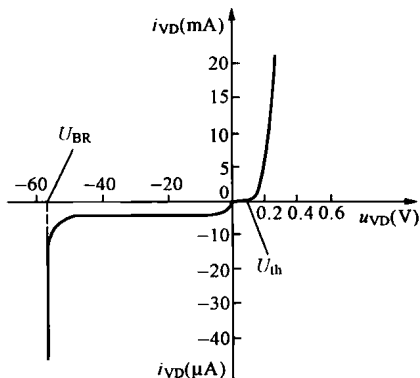


图 1.12 二极管的伏安特性曲线

了内电场,正向电流随外加电压的增加呈指数增长,二极管正向电阻变得很小。当二极管完全导通后,正向压降基本维持不变,称为二极管正向导通压降,硅管约为 $0.6\sim 0.8\text{V}$,锗管约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

二极管外加反向电压时,电流和电压的关系称为二极管的反向特性。由图 1.12 可见,二极管外加反向电压时,反向电流很小,而且在相当宽的反向电压范围内,反向电流几乎不变,因此称此电流值为二极管的反向饱和电流。当二极管承受反向电压时,外电场与内电场方向一致,所以反向饱和电流是由少数载流子的漂移运动而形成的,一般硅管的反向电流为几微安以下,锗管反向电流较大,为几十到几百微安。这时二极管因通过电流极小而处于反向截止。当反向电压增大到某一数值 U_{BR} 时,反向电流将随反向电压的增加而急剧增大,这种现象称为二极管反向击穿。普通二极管发生反向击穿后,会造成二极管的永久性损坏,失去单向导电性。虽然利用二极管的反向击穿特性,可以做成稳压二极管,但一般的二极管是不允许工作在反向击穿区的。

2. 主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,还可用一些数据来说明,这些数据就是二极管的参数。二极管参数是正确选择和使用二极管的依据。其主要参数有:

(1) 最大整流电流 I_{F} 。它是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流,其值与 PN 结面积及外部散热条件有关。使用时正向平均电流若超过此值会导致 PN 结过热而损坏。

(2) 最大反向工作电压 U_{RM} 。为防止二极管被击穿而规定的最大反向工作电压,一般为反向击穿电压 U_{BR} 的 $1/2$ 或 $2/3$ 。

(3) 反向饱和电流 I_{R} 。它是指在规定的反向电压和室温下二极管未击穿时的反向电流值。其值越小,二极管的单向导电性能越好。由于 I_{R} 对温度非常敏感,所以其值越小,二极管的温度稳定性越好。

(4) 最高工作频率 f_{M} 。它是指二极管正常工作时的上限频率值。它的大小与 PN 结的结电容有关。当二极管的工作频率超过 f_{M} 时,其单向导电性能变差。

应当指出,由于制造工艺所限,半导体器件参数具有分散性,同一型号管子的参数值也会有相当大的差距,因而手册上往往给出的是参数的上限值、下限值或范围。此外,使用时应特别注意手册上每个参数的测试条件,当使用条件与测试条件不同时,参数也会发生变化。

在实际应用中,应根据管子的使用场合,按其承受的最高反向电压、最大正向平均电流、工作频率、环境温度等条件,选择满足要求的二极管。

3. 二极管的温度特性

二极管是对温度非常敏感的器件。实验表明:随温度升高,二极管的正向特性曲线向左移,正向压降会减小,即二极管的正向压降具有负的温度系数;温度升高,反向饱和电流会增大,反向伏安特性下移。在室温附近,温度每升高 1°C ,正向压降减小 $2\sim 2.5\text{mV}$;温度每升高 10°C ,反向电流大约增加一倍。可见二极管的特性受温度影响很大。

1.3.3 半导体二极管的等效电路

工程上,通常在一定条件下,利用简化模型代替二极管非线性特性,来分析二极管电路,可使分析大为简化。简化模型分析方法是非常简单有效的工程近似分析方法。它是在一定条件下近似用线性电路来等效实际的二极管,这种电路称为二极管等效电路。本书仅介绍

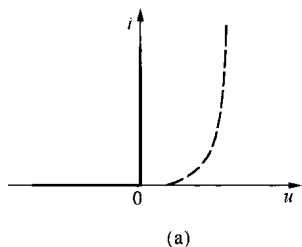
理想二极管等效电路和考虑二极管正向压降后的等效电路。

1. 理想二极管等效电路

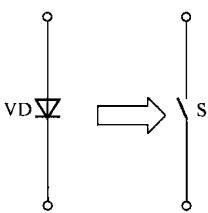
图 1.13 (a) 所示为理想二极管的伏安特性曲线, 其中的虚线表示实际二极管的伏安特性曲线, 图 1.13 (b) 是它的等效电路。由图可见, 对于理想二极管而言, 在正向偏置时, 理想二极管的管压降为零, 相当于开关闭合; 而在反向偏置时, 可认为二极管等效电阻为无穷大, 电流为零, 相当于开关断开。这种等效电路实际上忽略了二极管的正向压降和反向饱和电流, 而将二极管等效为一个理想开关。在实际的电路中, 当电源电压远比二极管的管压降大时, 利用此模型来近似分析是可行的。

2. 考虑二极管正向压降的等效电路

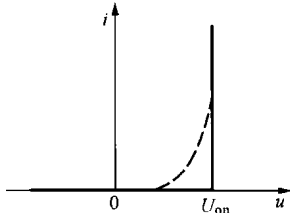
图 1.14 (a) 所示为考虑二极管正向导通压降时的伏安特性曲线, 其中的虚线表示实际二极管的伏安特性曲线, 图 1.14 (b) 是它的等效电路。由图可见, 当外加正向电压大于 U_{on} 时, 二极管导通, 开关闭合, 二极管两端的压降为 U_{on} ; 当外加电压小于 U_{on} 时, 二极管截止, 开关断开。其基本思想是当二极管导通后, 其管压降认为是恒定的, 且不随电流而变, 典型值为 0.7V (硅管) 或 0.3V (锗管)。该等效电路适合于二极管充分导通且工作电流不是很大的场合。



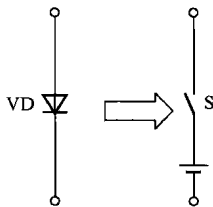
(a)



(b)



(a)



(b)

图 1.13 二极管的理想模型

(a) 伏安特性曲线; (b) 等效电路

图 1.14 二极管的恒压降模型

(a) 伏安特性曲线; (b) 等效电路

1.3.4 半导体二极管的应用

二极管是电子电路中最常用的半导体器件。利用其单向导电性及导通时正向压降很小的特点, 可用来进行整流、钳位、电平选择、限幅以及元件保护等各项工作。

1. 整流

整流电路是把交流电能转换为直流电能的电路。大多数整流电路由变压器、整流主电路和滤波器等组成。下面介绍单相半波整流电路。

单相半波整流电路是一种最简单的整流电路。单相半波整流电路如图 1.15 (a) 所示, 图中 T 为电源变压器, 用来将市电 220V 交流电压变换为整流电路所要求的交流低电压, 同时保证直流电源与市电电源有良好的隔离。

若二极管为理想二极管, 当输入为一正弦波时, 根据二极管的单向导电性可知: 正半周时, 二极管导通 (相当于开关闭合), $u_o = u_2$; 负半周时, 二极管截止 (相当于开关断开), $u_o = 0$ 。其输入、输出波形如图 1.15 (b) 所示。由于流过负载的电流和加在负载两端的电压只有半个周期的正弦波, 故称为半波整流。半波整流电路效率低, 一般只是作为原理性电路加以介绍。

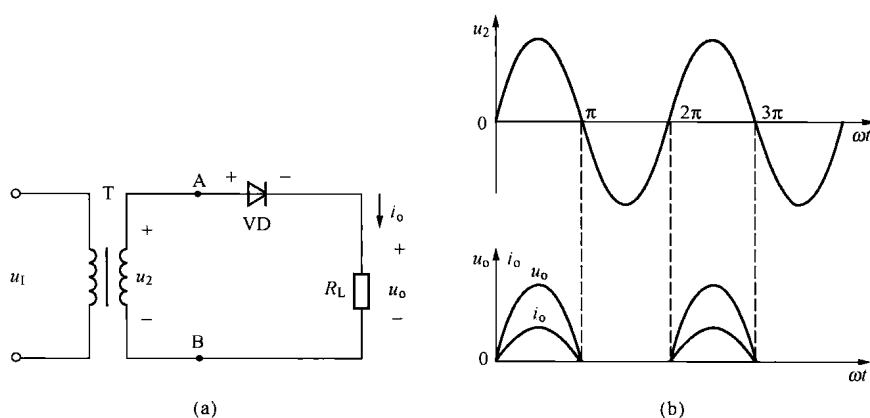


图 1.15 单相半波整流电路

(a) 电路结构; (b) 输入、输出波形

2. 钳位

利用二极管正向导通时压降很小的特性,可组成钳位电路,如图 1.16 所示。若 A 点所加电压 $U_A=0$,二极管 VD 可正向导通,其压降很小,F 点的电位也被钳制在 0V 左右,即 $U_F \approx 0$ 。

3. 电平选择电路

从多路输入信号中选出最低或最高电平,称为电平选择电路。

图 1.7 (a) 所示为一种二极管低电平选择电路。设两路输入信号 u_1 、 u_2 均小于 E 。表面上看似乎 VD1、VD2 都能导通,实际上若 $u_1 < u_2$,则 VD1 优先导通而把 u_o 限制在低电平 u_1 上,至使 VD2 截止。反之,若 $u_2 < u_1$,则 VD2 优先导通而把 u_o 限制在低电平 u_2 上,至使 VD1 截止。只有当 $u_1 = u_2$ 时,VD1、VD2 才能同时导通。

可见,该电路能选出任意时刻两路信号中的低电平信号。图 1.17 (b) 画出了当 u_1 、 u_2 为方波时,输出端选出的低电平波形。

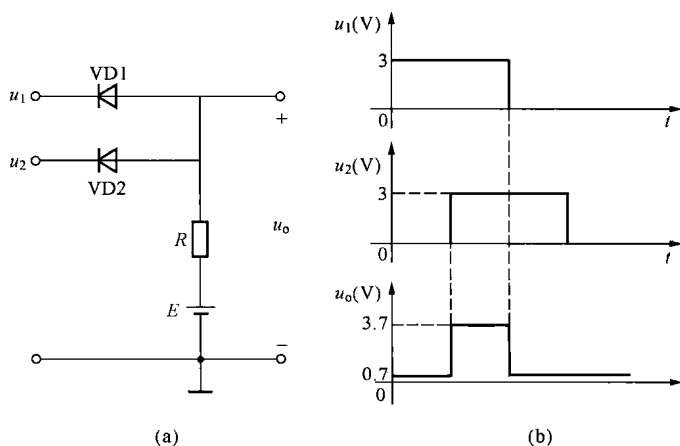


图 1.17 二极管构成的电平选择电路

(a) 电路结构; (b) 输入、输出波形

若将图 1.17 (a) 所示电路中的 VD1、VD2 反接, E 改为负值,则电路就变为高电平选择电路。

4. 限幅

利用二极管正向导通后其两端电压很小且基本不变的特性,可以构成各种限幅电路,使输出电压幅度限制在某一电压值以内。二极管限幅电路的原理可由图 1.18 来说明。设输入电压 $u_i = 10\sin\omega t$ (V), $U_{s1} = U_{s2} = 5$ V。当 $-U_{s2} < u_i < U_{s1}$ 时,VD1、VD2 都处于反向偏置而截止,因此 $i = 0$, $u_o =$