



21世纪电气信息学科立体化系列教材

模拟电子技术

● 主编 陶桓齐 张小华 彭其圣



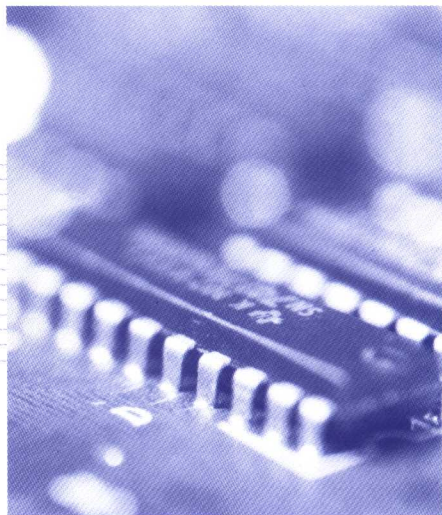
华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



21世纪电气信息学科立体化系列教材

模拟电子技术

主 编 陶桓齐 张小华 彭其圣
副主编 赵显红 王金庭 刘子泉



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/陶桓齐 张小华 彭其圣 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007年3月
ISBN 978-7-5609-3956-8

I. 模… II. ①陶… ②张… ③彭… 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(2007)第 020521 号

模拟电子技术

陶桓齐 张小华 彭其圣 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:余 涛

责任校对:刘 竣

封面设计:秦 茹

·责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×960 1/16

印张:22.75 插页:2

字数:455 000

版次:2007年3月第1版

印次:2007年3月第1次印刷

定价:34.80元(含1CD)

ISBN 978-7-5609-3956-8/TN·106

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



21世纪电气信息学科立体化系列教材

编审委员会

顾问：

潘 垣（中国工程院院士，华中科技大学）

主任：

吴麟章（湖北工业大学）

委员：（按姓氏笔画排列）

王 斌（三峡大学电气信息学院）

余厚全（长江大学电子信息学院）

陈铁军（郑州大学电气工程学院）

吴怀宇（武汉科技大学信息科学与工程学院）

陈少平（中南民族大学电子信息工程学院）

罗忠文（中国地质大学信息工程学院）

周清雷（郑州大学信息工程学院）

谈宏华（武汉工程大学电气信息学院）

钱同惠（江汉大学物理与信息工程学院）

普杰信（河南科技大学电子信息工程学院）

廖家平（湖北工业大学电气与电子工程学院）

内容简介

本书是高等学校“21 世纪信息学科立体化系列教材”之一。依据国家教育部颁布的电子技术基础课程教学基本要求,本着“保证基础,注重应用,精选内容,启发创新”的原则而编写。其主要内容包括:半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、集成运算放大电路、负反馈放大电路、信号运算电路、信号处理电路、波形发生和信号转换电路、功率放大电路和直流电源电路等。每章有内容提要、本章小结、自测题和大量的练习题。

本书适合作为高等学校电气信息类及相关专业的本科教材,也可供从事相关专业的工程技术人员阅读。

前言

模拟电子技术是高等学校机电类专业的重要课程,是电子信息和电气工程学科学生的必备知识,也是相关工程的应用基础和新兴边缘学科的发展基础。模拟电子技术作为电子信息和电气工程专业的一门核心基础课程,是学习后续专业课程以及今后从事实际工作必需的技术基础。

随着科学技术的高速发展和 21 世纪对高素质人才的新要求,高等教育及其课程建设也必将不断改革和更新。因此,本书在满足教育部颁布的《高等学校电子技术基础课程教学基本要求(模拟部分)》的前提下,根据教学改革与实践的需要而编写的。其目的是为了适应电子信息技术和电气工程类专业的学生拓宽专业口径的需要,适应专业课程需要、适应相关学科和工程技术日益交叉、融合发展的需要,从而起到既能不断提高教学质量,又有利于教学和方便学生自学的效果。编者在总结多年教学实践经验的基础上,参照多种教材样本,从结构和内容上作了相应的调整,尽量符合教学实践的要求。致力于体现以下特点。

一、指导思想:遵循教与学的规律,适应新的变化,坚持理论阐述的前沿性;按照“保证基础、注重应用、精选内容、启发创新”的原则,充分体现系统性、科学性、先进性和实用性。

二、教材内容:以器件为依托,以分立元件为基础,以集成电路为主线,适时引进新的技术、新的器件、新的软件介绍等。

三、表达形式:明确基本概念,强调思维方式和分析方法,注重内涵的表达与外延的联系;比较侧重电路结构的构思,突出定性讨论、分析,以使读者不仅知其然,也知其所以然;达到举一反三、触类旁通的目的。

四、课后训练与效果检验:每章配有自测题,以达到概念自测、引导思考的目的。习题的选择既有检测性,又有启迪性,加强基础训练,联系实际应用,选题形式多样灵活,提问具有启发性。

五、为了便于有效掌握知识要点,提高学习效率,每章的开始和结束分别设置有内容提要、本章小结等结构,以达到提出问题,理顺思路,突出主干,分清重点、难点的目的。

本教材的本科理论教学参考学时为 50~64 学时,标有 * 号的章节为选修内容。使用本教材的教师可自主选择章节及相关知识点讲授。为了方便教师授课和学生自学,本

书还配有电子光盘,其内容包括电子课件、习题及解答、教学大纲和授课教案等。

参加本书编写的院校有武汉科技学院、湖北工业大学、中南民族大学、湖北大学、湖北经济学院、河南科技大学。陶桓齐编写第1、4章王金庭编写第2章;张小华编写第3章;彭其圣编写第5、6章;赵显红编写第7、8章;刘子泉编写第9、10章;徐元杰编写附录A、B、C,并参与光盘制作。陶桓齐负责全书的统稿、校订和电子光盘的编辑。张小华负责电子光盘制作。黄志远、向阳、喻向东、贺章擎、王超参与了部分章节的编写、光盘制作、习题编写。

本书的出版,得到武汉科技学院学术著作出版基金资助,在编写过程中得到了武汉科技学院同事们的鼎力支持,在此表示衷心的感谢!编写中参阅了有关作者的教材和文献资料,得到华中科技大学出版社的大力帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,真诚欢迎读者批评指正。

21 世纪电气信息学科立体化系列教材编委会

《模拟电子技术》编写组

2007 年元月

目 录

1 半导体器件	(1)
1.1 半导体器件基础	(1)
1.2 半导体二极管	(8)
1.3 双极型三极管	(17)
1.4 场效应三极管	(26)
本章小结	(38)
自测题	(39)
习题 1	(40)
2 基本放大电路	(45)
2.1 放大电路的主要性能指标	(45)
2.2 三极管共射极基本放大电路的工作原理	(50)
2.3 放大电路的基本分析方法	(54)
2.4 晶体管放大电路的三种基本连接	(71)
2.5 放大电路的频率特性	(75)
2.6 场效应管放大电路	(79)
本章小结	(88)
自测题	(88)
习题 2	(90)
3 多级放大电路	(97)
3.1 多级电路的耦合方式	(97)
3.2 多级放大电路的分析方法	(99)
3.3 差分放大电路	(102)
本章小结	(107)
自测题	(108)
习题 3	(109)
4 集成运算放大电路	(113)
4.1 集成运算放大电路概述	(113)

4.2	集成运算放大器的种类和主要性能指标	(119)
4.3	集成运算放大电路的传输特性和理想模型	(124)
* 4.4	集成运放的频率响应和频率补偿	(128)
* 4.5	集成运算放大器的使用	(131)
	本章小结	(133)
	自测题	(134)
	习题 4	(135)
5	负反馈放大电路	(139)
5.1	反馈的基本概念	(139)
5.2	负反馈放大电路的分析	(144)
5.3	负反馈对放大电路性能的影响	(151)
5.4	负反馈放大电路自激振荡的消除方法	(156)
	本章小结	(160)
	自测题	(161)
	习题 5	(162)
6	信号运算电路	(169)
6.1	比例运算电路	(170)
6.2	加法运算和减法运算电路	(175)
6.3	积分运算和微分运算电路	(180)
* 6.4	对数运算和指数运算电路	(185)
* 6.5	模拟乘法器电路	(187)
	本章小结	(195)
	自测题	(195)
	习题 6	(197)
7	信号处理电路	(203)
7.1	有源滤波电路	(203)
7.2	模拟信号预处理放大电路	(214)
	本章小结	(216)
	自测题	(217)
	习题 7	(217)
8	波形发生和信号转换电路	(219)
8.1	正弦波振荡电路	(220)
8.2	电压比较器	(231)
8.3	非正弦波发生电路	(239)
* 8.4	集成运放实现的信号转换电路	(245)

8.5 锁相环及其信号转换电路	(248)
本章小结	(254)
自测题	(255)
习题 8	(256)
9 功率放大电路	(261)
9.1 功率放大电路概述	(261)
9.2 互补功率放大电路	(263)
9.3 集成功率放大电路	(271)
本章小结	(274)
自测题	(275)
习题 9	(276)
10 直流电源电路	(281)
10.1 直流电源电路的组成	(281)
10.2 整流电路	(282)
10.3 滤波电路	(288)
10.4 二极管稳压电路	(290)
10.5 串联型稳压电路	(292)
10.6 开关稳压电路	(303)
本章小结	(308)
自测题	(309)
习题 10	(310)
附录	(315)
附录 A 电路仿真软件 EWB-Multisim 简介	(315)
附录 B 部分模拟集成电路主要性能参数	(329)
附录 C 集成运算放大器国内外型号对照表	(331)
附录 D 本书部分文字、符号说明	(341)
附录 E 自测题和习题部分参考答案	(345)
参考文献	(352)

半导体器件

半导体器件是各种电子电路的基础元件,无论是数字电路还是模拟电路,集成电路还是分立元件电路都离不开半导体器件。本章首先介绍半导体材料的基本结构和导电特性,然后阐述PN结的形成及其单向导电性,在此基础上介绍半导体普通二极管、特殊二极管、双极性三极管和场效应三极管等半导体器件的基本结构、工作原理、伏安特性曲线和主要参数。

1.1 半导体器件基础

自然界的各种物质就其导电特性而言大致可分为导体、绝缘体、半导体三大类。通常将容易传导电流的物质(电阻率小于 $10^{-4} \Omega/\text{cm}$ ^①)称为导体,如铜、银、铁、铝等都是良好的导体;将不能传导电流的物质(电阻率大于 $10^9 \Omega/\text{cm}$ ^①)称为绝缘体;而导电性能介于导体与绝缘体之间的一类物质统称为半导体。通常半导体器件所用的主要材料是硅(Si)和锗(Ge)这两种物质。为什么物质的导电性会存在如此大的差别呢?这主要取决于物质的原子结构。导体一般为低价元素,且外层价电子受原子核的束缚力很小,如金属材料的大量外层电子极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子,这些自由电子称为运载电荷的载流子。它们在外电场的作用下,产生定向运动,从而形成电流。高价元素或高分子物质的最外层电子受原子核的束缚力很强,很难成为自由电子,所以导电性能很差,而成为绝缘体。半导体材料硅(Si)和锗(Ge)均为4价元素,它们的最外层电子既不像导体那样容易挣脱,也不像绝缘体那样束缚得很紧,因而其导电性能介于二者之间。此外,半导体还有另一些特性,如受外界光和热的激发或者参入微量的杂质时,其导电能力会

^① 参阅文献[2],第1页。

明显增强,这说明半导体的导电性能不同于其他物质。这些特性就决定了用半导体制成各类电子器件的可能性。因此,有必要了解半导体的结构和导电机理。

1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体及共价键

不含杂质、结构完整的单晶半导体称为本征半导体。

在本征半导体中,硅和锗的原子按一定的间距排列成很规则的空间点阵(又称晶格),原子之间靠得很近,其中每个原子最外的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影响。因此,一个价电子不仅要围绕自身原子核运动,同时也常出现在相邻原子所属的轨道上。相邻的两个原子各有一个价电子在同一轨道上,形成共有的一对价电子,这样的特殊组合称为共价键结构。如图 1-1 所示,图中标有“+4”的圆圈表示除去 4 个价电子后的正离子。

共价键中的电子受到原子核很强的吸引力,称为束缚电子。当热力学温度为零度(即绝对零度 $T=0\text{ K}$,或摄氏 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及无外界激发时,其共价键中的电子不能挣脱束缚而自由移动。因此,这时的半导体不能导电而成为绝缘体。

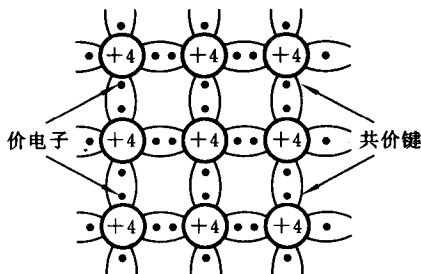


图 1-1 本征半导体结构示意图

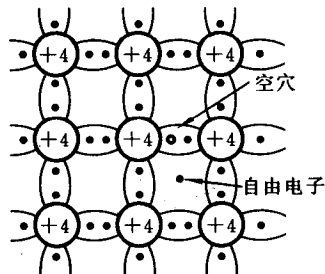


图 1-2 本征半导体中的自由电子与空穴

2. 本征半导体中的两种载流子

随着温度的升高,如在室温条件下,本征半导体内有少量的价电子,由于热运动而获得足够的能量,克服共价键的束缚而成为自由电子,即可以进行导电的载流子——带负电荷的电子载流子。同时,值得注意的是,由于在两个原子的共价键中,失去一个电子而留下了一个空位置,称为空穴。空穴是原子失去一个电子而形成的,所以具有空穴的原子成为正离子,或者说空穴是带正电荷的。在本征半导体中,自由电子与空穴总是成对出现的,故称为电子—空穴对,可见自由电子与空穴的数目相等。如图 1-2 所示,在外加电场的作用下,一方面自由电子在逆电场方向上产生定向移动形成电子电流;另一方面,共价键上的空穴吸引相邻价电子逆电场的方向依次(或者顺序)填补空穴。为了区别于自由电子的运动,将这种填补空穴的过程称为空穴运动,其运动结果是形成沿电场正方向的空穴电流,因此,可将空穴看成是带正电荷的载流子。这样本征半导体中的电流可

以认为是由两种极性相反的载流子形成的,即自由电子和空穴共同运动的结果,通常称为双极性电流。这就是半导体导电的特殊性质之一,而金属导体只有一种载流子,即自由电子参与导电。

3. 本征半导体中载流子的浓度

物质的热运动使半导体中的电子—空穴对不断产生,称为本征激发。同时,电子在运动过程中与空穴相遇填补了空穴,使电子—空穴对消失,这一过程称为复合。在一定的温度下,本征激发与复合这两种运动将达到动态平衡,使电子—空穴对的浓度保持一定。载流子的浓度对温度十分敏感,可以证明,半导体中载流子的浓度,除与半导体材料本身的性质有关外,还与温度密切相关,而且随着温度的升高,基本上按指数规律增加^①。半导体材料的这种对温度的敏感性,既是用来制作热敏器件和光敏器件的条件,又是影响半导体器件温度稳定性的直接因素。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中载流子的浓度很低,总的导电能力很差,但是通过扩散工艺在本征半导体中掺入某种特定的杂质元素,就将大大改善半导体的导电性能,从而形成杂质半导体。按照掺入杂质元素的性质不同,可以形成N型半导体和P型半导体;也可控制掺杂元素的浓度来控制杂质半导体的导电性能,使制造可控半导体器件成为可能。

1. N型半导体

在纯净的4价硅或锗的晶体中掺入少量的5价杂质元素,如磷、锑、砷等,即可使原来晶格中的部分硅原子被杂质原子取代。由于杂质原子的最外层有5个价电子,而它与周围的4个硅原子组成共价键时,将多出一个电子,这个电子不受共价键的束缚,而只受自身原子核的吸引,但吸引力很小,在室温下受热运动作用,即可成为自由电子。于是5价杂质原子因失去电子而成为正离子,如图1-3所示。由于5价杂质原子可以提供多余的电子,所以称为施主原子。在掺入5价杂质元素的半导体中主要依靠电子导电,故称为电子型半导体,或N型半导体^②。由于其中的自由电子浓度大大高于空穴的浓度,因此N型半导体中的电子称为多数载流子(简称多子),而对应的空穴则称为少数载流子(简称少子)。并且掺入的杂质数量越多,多子(自由电子)的浓度越高,导电能力也越强。

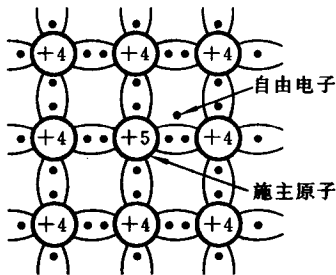


图 1-3 N型半导体示意图

① 参阅文献[1],第3页

② 电子带负电,故用N(Negative)表示。

2. P 型半导体

在纯净的硅或锗的晶体中,掺入少量的 3 价杂质元素,如硼、镓、铟等,由于此时杂质元素的最外层只有 3 个价电子,当它和周围的 4 个硅原子组成共价键时,因缺少一个电子而形成“空缺”(空缺为电中性),当硅原子的外层因热运动而填补空缺时,3 价杂质原子因多得一个电子而成为负离子,如图 1-4 所示。3 价杂质原子可以产生多余的空穴,起到接受电子的作用,故称为受主原子。在这种 3 价杂质半导体中主要依靠空穴导电,故称为空穴型半导体或 P 型半导体^①。由于空穴浓度大大高于自由电子的浓度,因此 P 型半导体中的空穴称为多数载流子,而自由电子则称为少数载流子,正好与 N 型半导体相反。

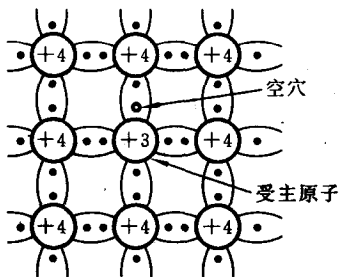


图 1-4 P 型半导体示意图

从以上分析可知,在杂质半导体中,无论是 N 型还是 P 型半导体,多数载流子的浓度主要取决于掺入杂质的浓度,受温度的影响较小。少数载流子主要由本征激发形成,所以受温度的影响较大,这也是影响半导体器件温度稳定性的基本原因。

综上所述,掺入杂质能使半导体的导电能力大大提高,但是仅仅提高导电能力不是最终目的,因为导体的导电能力比杂质半导体更强。其目的在于掺入不同性质、不同浓度的杂质,并将 N 型和 P 型半导体采用不同的方式组合起来,制造出特性不同、品种繁多、用途各异的半导体器件。

1.1.3 PN 结

1. PN 结的形成

如果采用特定的工艺,将 P 型半导体和 N 型半导体制作在一块硅片上,那么在它们的交界面上将形成一个 PN 结,如图 1-5 所示。下面来分析 PN 结中载流子的运动情况。

由物理学可知,在无外力作用时,物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方运动,这种由浓度差别而产生的运动称为扩散运动。在 P 型和 N 型半导体的交界面两侧,由于电子和空穴的浓度差别很大,因此, N 区的电子(多数载流子)要向 P 区扩散;同时, P 区的空穴(多数载流子)也要向 N 区扩散,如图 1-5(a)所示。为简单起见,图中 P 区内有负号的圆圈表示除去空穴后的负离子(受主原子),小圈表示带正电荷的空穴。N 区有正号的圆圈表示除去自由电子后的正离子(施主原子),小黑点表示带负电荷的自由电子。当扩散使得电子和空穴在两侧相遇时,两侧的电子和空穴将发生复合而消失。

在 P 区因复合掉空穴而出现负离子区;在 N 区因复合掉电子而出现正离子区。于是在交界面的两侧只留下了一个不能移动的空间电荷区,从而形成了由带电离子组成的

^① 空穴带正电,故用 P(Positive)表示。

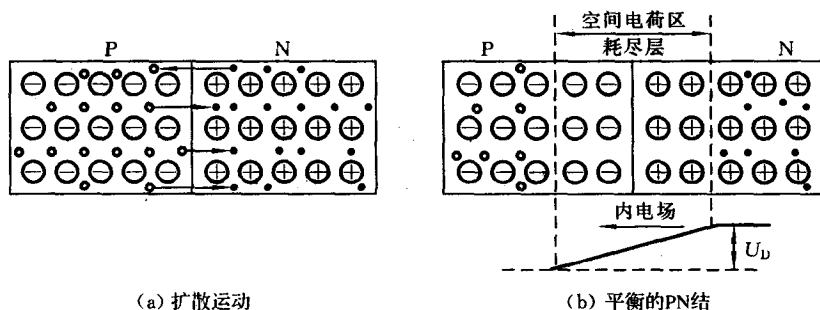


图 1-5 PN 结的形成

空间内电场,方向由 N 区指向 P 区,这就是 PN 结。两侧的电荷区具有一定的宽度,电位差为 U_D ,称为电位壁垒,如图 1-5(b)所示。随着扩散运动的进行,空间电荷区不断加宽,内电场增强,这也正好阻止多数载流子的扩散运动(N 区的电子不能向低电位处运动,P 区的空穴不能向高电位处运动)。所以,空间电荷区又称为阻挡层或高阻区。但是在内电场力的作用下,N 区的空穴(少子)将向 P 区运动,P 区的电子(少子)将向 N 区运动,这种少子在电场作用下的定向运动称为漂移运动。在无外电场和温度一定的条件下,多数载流子的扩散运动与少数载流子的漂移运动在数量上相等,从而达到一个动态平衡,空间电荷区的宽度也处于稳定状态,PN 结中的总电流也为零,故称空间电荷区为耗尽层。一般稳定状态下电位壁垒的大小,根据材料不同而异,硅材料约为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$,锗材料约为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

2. PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加一个电压,则将打破空间电荷区原来的平衡状态,也就是扩散运动与漂移运动的载流子数量不再相等,PN 结将有电流流通。

(1) PN 结外接正向电压时导通

在 PN 结上外加一个正向电压,即电源的正极接 P 区,电源的负极接 N 区,一般称这种连接方式为正向接法或正向偏置(简称正偏),如图 1-6 所示。

正向偏置时,一方面外电场的方向与 PN 结的内电场方向相反,削弱了内电场的强度;另一方面在外电场的作用下,P 区中的空穴向右移动,与空间电荷区的一部分负离子中和(或复合),N 区中的电子向左移动,与空间电荷区的一部分正离子中和(或复合)。结果多子移向耗尽层,使得空间电荷区的宽度变窄,电位壁垒降低,这样有利于多数载流子的扩散运动,而不利于少数载流子的漂移运动。因而电路中的扩散电流将大大超过漂移电流,综合后形成一个较大的正向电流 I ,其方向是从 P 区流向 N 区,这一

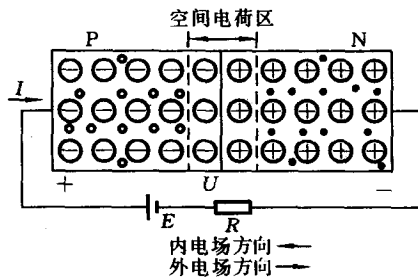


图 1-6 正向偏置的 PN 结

状态称为PN结正向导通,如图1-6所示。正向偏置时,由于PN结导通的正向压降只有零点几伏,为了防止电路中电流过大而损坏PN结,一般应接入一个限流电阻。

(2) PN结外接反向电压时截止

在PN结的两端外加一个反向电压,即电源的正极接N区,而电源的负极接P区,称这种连接方法为反向接法或反向偏置(简称反偏),如图1-7所示。

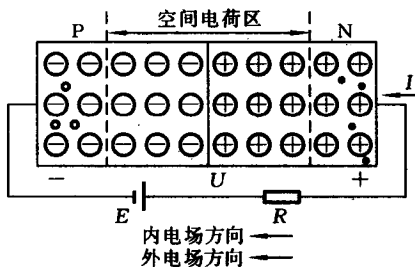


图1-7 反向偏置的PN结

反向偏置时,一方面外电场与内电场的方向一致,增强了内电场的作用,从而加强漂移运动,减少扩散运动;另一方面,外电场使P区中的空穴和N区中的电子,各自向着远离耗尽层(交界面)的方向移动,即向电源两端移动,从而增加了电荷区的宽度,同时也使电位壁垒增高。其结果不利于多数载流子的扩散运动,而有利于少数载流子的漂移运动。因而漂移电流将超过扩散电流,于是,回路中将产生一个基于少数

载流子运动的反向电流 I ,方向如图1-7所示。因为少数载流子的浓度很低,所以反向电流的数值非常小。通常忽略不计,故称PN结反向偏置时截止。但在一定温度下当外加反向电压超过某个值(约零点几伏)后,反向电流将不再随着反向电压的增加而增大,这时的电流称为反向饱和电流,通常用 I_s 表示。正是因为反向饱和电流是由少数载流子产生的,所以对温度的敏感性很强,随着温度的升高, I_s 将急剧增大。

综上所述,当PN结正向偏置时,回路中将产生一个较大的正向电流,PN结处于导通状态;当PN结反向偏置时,回路中的反向电流非常小,几乎等于零,PN结处于截止状态。因此,PN结具有单向导电特性。

3. PN结的伏安特性

(1) PN结的电流方程

根据半导体的物理原理,从理论上分析可知,PN结所加端电压 u 与流过它的电流 i 的关系为^①

$$i = I_s(e^{qu/kT} - 1) = I_s(e^{u/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, I_s 为PN结反向饱和电流; q 为电子的电量; k 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度(K); $U_T = \frac{kT}{q}$, 其中 k 和 q 为常量,故 U_T 是热力学温度 T (K) 的函数,称 U_T 是 T 的电压当量。在常温下, $T = 300\text{ K}$ 时, $U_T \approx 26\text{ mV}$ 。

(2) PN结的伏安特性

由PN结的电流方程式(1-1)可知,给PN结外加一个正向电压 $u > 0$, 且 $u \gg U_T$, 则

① 参阅文献[1],第7页。

式(1-1)中的 $e^{u/U_T} \gg 1$, 可得 $i \approx I_S e^{u/U_T}$, 表示 PN 结正向电流 i 与电压 u 基本上呈指数函数关系; 若给 PN 结外加一个反向电压, 即 $u < 0$, 而且 $|u| \gg U_T$, 则 $e^{u/U_T} \ll 1$, 可得 $i \approx -I_S$, 表示 i 在一定范围内基本不变。由式(1-1)画出 i 与 u 的关系曲线, 如图 1-8 所示(图中常用物理量单位从略), 称为 PN 结的伏安特性。其中 $u > 0$ 的部分称为正向特性, $u < 0$ 的部分称为反向特性。

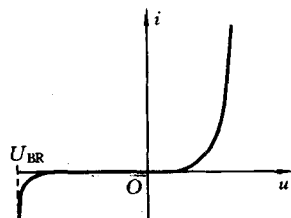


图 1-8 PN 结的伏安特性

(3) PN 结的反向击穿特性

从 PN 结的伏安特性曲线可知, 当 PN 结的反向电压在一定的范围, 即 $u < U_{BR}$ 时, 仅有很小的饱和电流, 而当反向电压增大到一定数值后, 反向电流将急剧增加, 这一现象称为反向击穿(电击穿)。发生反向击穿所需要的电压称为 PN 结的反向击穿电压, 记为 U_{BR} 。根据反向击穿产生的机理不同, 可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种情况。在掺入杂质的浓度较低, 耗尽层宽度较宽时, 低的反向电压不会产生电击穿。只有当反向电压增加到较大值时, 耗尽层电场(内电场)将使少数子加快漂移速度, 从而与共价键中的电子相碰撞, 把电子撞出共价键, 产生电子—空穴对。这一新产生的电子—空穴对在电场作用下又撞击其他价电子, 使载流子雪崩式地倍增, 致使电流剧增, 这种击穿称为雪崩击穿, 其击穿电压较高, 一般大于 6 V。如果掺入杂质的浓度较高, 耗尽层宽度很小, 则不太大的反向电压就可以在耗尽层形成很强的电场, 从而直接破坏共价键, 拉出价电子而产生电子—空穴对, 这种不是通过碰撞而致使电流急剧增加的击穿称为齐纳击穿, 其击穿电压较低, 一般小于 6 V。无论哪种击穿, 若对其电流不加限制, 都可造成 PN 结永久性损坏。另外, PN 结击穿后, 在有限的反向电流范围内, 其两端电压基本不变, 利用这一特性, 可做成稳压管。

必须注意, PN 结除了会发生反向电击穿外, 还会发生反向热击穿。例如, 虽然反向电压不太高, 但反向电流和反向电压的乘积超过了 PN 结允许的耗散功率时, 也会因热量来不及散发使 PN 结温度上升而烧毁击穿, 这一现象称为热击穿。热击穿使 PN 结永久损坏, 所以必须避免。

(4) PN 结的电容效应

由于 PN 结存在空间电荷区, 所以在一定的条件下, PN 结具有电容的特性。根据产生电容的不同, PN 结电容分为势垒电容和扩散电容两类。

1) 势垒电容。当 PN 结外加电压变化时, 空间电荷区的宽度将随电压变化而变化, 即耗尽层的电荷量随外加电压的变化而增加或者减少, 这一现象与电容器的充电放电过程相似, 如图 1-9(a) 所示。空间电荷区(也称势垒区)宽窄的变化而形成的电容效应称为势垒电容, 记为 C_b 。 C_b 与电压具有非线性关系, 它与 PN 结面积、空间电荷区的宽度、半导体的介电常数及外加电压有关。对于一个定型的 PN 结, C_b 与外加电压的关系如图 1-9(b) 所示。从图 1-9(b) 可知, 当 PN 结外加反向电压时, C_b 随着 u 的变化而明显改变。因此, 利用这一特性可制成各种变容二极管。