

21世纪高等教育规划教材



电子技术基础

叶 勇 主编

南海出版公司

21 世纪高等教育规划教材

电子技术基础

叶 勇 主编

南海出版公司

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础/叶勇主编. —海口:南海出版公司,
2005. 7

ISBN 7-5442-2758-8

I. 电… II. 叶… III. 电子技术—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 013208 号

DIANZI JISHU JICHU

电子技术基础

主 编	叶 勇
责任编辑	张 辉
责任校对	邵 萍
封面设计	南海高教出版中心
出版发行	南海出版公司 电话 (0898)65350227
社 址	海口市蓝天路友利园大厦 B 座 3 楼 邮编 570203
电子信箱	nhcbgs@0898.net
经 销	新华书店
印 刷	安徽省蚌埠广达印务有限公司
开 本	787×960 1/16
印 张	24.5
字 数	440 千
版 次	2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5442-2758-8
定 价	32.00 元

南海版图书 版权所有 盗版必究

编审说明

《电子技术基础》是高等院校电类工科各专业的一门重要技术基础课。它是培养大学生获取现代电子技术理论和实践知识的入门性课程,也是从理论体系比较严密的基础课向工程性比较强的专业课过渡的桥梁。《电子技术基础》课程既具有较强的理论性,也具有较强的工程实践性,这就使本课程具有自己独特的特点。

现代电子技术飞速发展,新技术、新器件不断出现,特别是一些已经十分成熟的新技术和新器件,已经得到了广泛的应用。这些成熟的新技术和新器件十分有必要选择一些加以介绍,如果在《电子技术基础》课程中不介绍这些新技术和新器件,就很难满足后续课程对电子技术基础知识的需要。

为此,我们参考过去的教材,并总结多年来的教学实践经验,编写了这本《电子技术基础》教材。通过对电工电子系列课程改革的研究,本书对电子技术课程的基础内容也作了一些调整,在保证基础的前提下,增加了较多的实用新技术和新器件的内容。力求内容新颖,篇幅适当,文字流畅,图表清晰,便于自学。

本书由中国科学技术大学叶勇副教授主编(编写9~13章),郎文辉担任副主编(编写1~8章),刘锋、李旻参加了部分章节的编写和修改工作。对审稿及编写过程中给予帮助和支持的同志,在此表示诚挚的谢意。

经审定,本书适于普通高等院校理工科电子类专业本、专科教学使用,也可供广大函授大学、电大、夜大、自考等成人教育电子类专业使用;此外,还可供从事电子技术的工程技术人员学习参考使用。

由于编者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,热忱欢迎读者批评指正。

21 世纪高等教育规划教材编审指导委员会

2005 年 7 月

目 录

第 1 章 半导体及常用双极型分立器件	(1)
1.1 PN 结	(1)
1.2 半导体二极管	(7)
1.3 晶体管.....	(15)
思考练习题	(24)
第 2 章 晶体管单元放大电路	(29)
2.1 晶体管共射基本放大电路.....	(30)
2.2 工作点稳定的典型放大电路.....	(41)
2.3 射极输出器(共集电路).....	(43)
2.4 多级放大电路.....	(47)
2.5 功率放大电路.....	(50)
思考练习题	(57)
第 3 章 场效应管及其放大电路	(63)
3.1 结型场效应管.....	(63)
3.2 绝缘栅型场效应管.....	(68)
3.3 场效应管放大电路.....	(75)
思考练习题	(80)
第 4 章 直流放大器 and 模拟集成运放	(82)
4.1 直流信号放大的特殊性.....	(82)
4.2 差动放大电路.....	(85)
4.3 具有恒流源差动放大电路.....	(94)
4.4 模拟集成运算放大器(运放).....	(97)
思考练习题.....	(102)
第 5 章 负反馈放大电路	(106)
5.1 负反馈放大电路的组成(反馈的概念)	(106)
5.2 负反馈放大电路的四种组态	(108)
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	(114)
5.4 负反馈放大电路自激的简述	(118)
思考练习题.....	(118)

第 6 章 集成运放的应用电路	(123)
6.1 比例运算电路	(123)
6.2 加法运算器	(125)
6.3 减法运算器	(128)
6.4 积分和微分运算器	(129)
6.5 对数和反对数运算器	(133)
6.6 频率信号选择器(有源滤波器)	(135)
6.7 电压(信号)幅度判别器(电压比较器)	(138)
思考练习题	(143)
第 7 章 波形产生器	(152)
7.1 自激振荡概述	(152)
7.2 RC 正弦波振荡器	(154)
7.3 LC 正弦波振荡器	(158)
7.4 非正弦波产生器	(164)
思考练习题	(168)
第 8 章 半导体直流电源	(174)
8.1 单相整流电路	(175)
8.2 滤波电路	(179)
8.3 硅稳压管稳压电路	(184)
8.4 晶体管串联型稳压电路	(186)
8.5 稳压组件应用电路	(189)
思考练习题	(192)
第 9 章 数字电子技术基础	(197)
9.1 概 述	(197)
9.2 数制与编码	(199)
9.3 逻辑代数基础	(203)
9.4 逻辑函数的化简	(211)
9.5 逻辑函数的表示方法及其相互转换	(218)
9.6 门电路	(220)
思考练习题	(234)
第 10 章 组合逻辑电路	(242)
10.1 组合逻辑电路的分析与设计方法	(242)
10.2 加法器	(245)
10.3 数值比较器	(250)

10.4	编码器	(252)
10.5	译码器	(257)
10.6	数据选择器	(267)
10.7	数据分配器	(270)
10.8	组合电路中的竞争—冒险	(272)
	思考练习题	(275)
第 11 章	时序逻辑电路	(281)
11.1	触发器	(281)
11.2	时序逻辑电路的分析与设计方法	(297)
11.3	计数器	(308)
11.4	移位寄存器型计数器	(326)
11.5	顺序脉冲发生器	(329)
	思考练习题	(332)
第 12 章	脉冲信号的产生与整形	(339)
12.1	多谐振荡器	(339)
12.2	单稳态触发器	(344)
12.3	施密特触发器	(348)
	思考练习题	(351)
第 13 章	数模和模数转换	(356)
13.1	概 述	(356)
13.2	D/A 转换器	(357)
13.3	A/D 转换器	(360)
	思考练习题	(367)
附 录		(371)
参考文献		(381)

第 1 章 半导体及常用双极型分立器件

本章内容要点

- PN 结及其单向导电特性
- 半导体二极管的工作原理、特性曲线和主要参数
- 晶体管的工作原理、特性曲线和主要参数

常用的双极型半导体分立器件种类很多,应用广泛,但它们的基本结构都是 PN 结的组合,且参与导电的是电子载流子和空穴载流子两种极型的载流子,同时参与导电,故称为双极型器件。

1.1 PN 结

1.1.1 本征半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体。固体单质半导体有硅(Si)、锗(Ge)和化合物半导体砷化镓(GaAs)等。其中以硅和锗应用最多,且它们都是 4 价元素,原子核最外层有 4 个价电子。

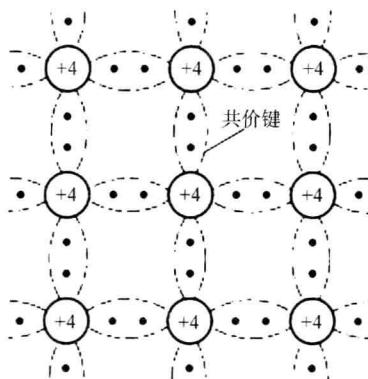


图 1-1 本征半导体结构示意图

完全纯净的半导体晶体,叫做本征半导体。以硅晶体为例,它们的原子排列得很有规律,并且每两个相邻原子共有一对价电子,这样的组合叫做共价键结构,如图 1-1 所示。共价键中的价电子受两个原子核的制约,如果没有足够的能量就无法挣脱共价键的束缚。因此,在热力学温度零度 $0\text{K}(-273.16^{\circ}\text{C})$,且无外界能量的激发,本征半导体无自由电子,和绝缘体一样不导电。在常温(热力学温度 300K)下,或者受到光照,将有少数价电子获得足够的能量,挣脱共价键的束缚,跳到键外,成为自由电子。值得注意的是,价电子挣脱共价键成为自由电子后,在共价键中就留下空位,有了这样一个空位,在外电场或其他能源作用下,邻近的价电子就会填补到这个空位上,这个电子原来的位置又留下新的空位,然后,其他价电子又会移至这个新的空位上,如此下去,形成价电子的运动,如图 1-2 所示。这种运动,好像一个带正电荷的空位在移动,叫做空穴(即空位)运动。

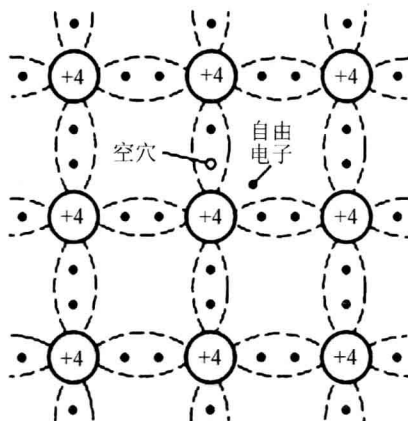


图 1-2 本征半导体中的自由电子和空穴

当这种半导体加上电压时,其电流由两部分组成:一是自由电子定向运动形成的电流(电子电流);二是价电子递补空位形成电流(空穴电流),其方向与电子电流相反。

由于热运动,使本征半导体不断产生自由电子,同时也出现相应数量的空穴,这种现象叫做本征激发。本征激发,自由电子和空穴总是相伴而生,成对出现,称之为电子空穴对。另外,自由电子在运动中又会与空穴重新结合而消失,这是一种相反的过程,叫做复合。在一定温度下,电子—空穴对既产生又复合,达到相对的动态平衡。这时,产生与复合过程虽然在进行,但是电子—空穴对却维持一定的数目。载流子(电子、空穴)的浓度不仅与半导体材料的性质有关,还对温度十分敏感。对于硅材料,温度每升高 8°C ,载流子的浓度大约增加 1 倍,对于锗材料,温度每升高 12°C ,载流子的浓度大约增加 1 倍。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量五价元素,如磷或砷(称为杂质)等,可使自由电子浓度大大增加,自由电子成为多数载流子(简称多子),空穴称为少数载流子(简称少子)。这种以电子导电为主的半导体称为 N 型半导体(电子型半导体)。

在本征半导体硅或锗中掺入微量三价元素,如硼或铟等,则空穴的浓度大大增加,空穴成为多子,而电子为少子。这种以空穴导电为主的半导体称为 P 型半导体(空穴型半导体)。

无论是 N 型半导体,还是 P 型半导体,虽然它们各自有一种载流子占多数,但是整个半导体仍然呈电中性。如图 1-3 所示为 N 型半导体和 P 型半导体的结构。

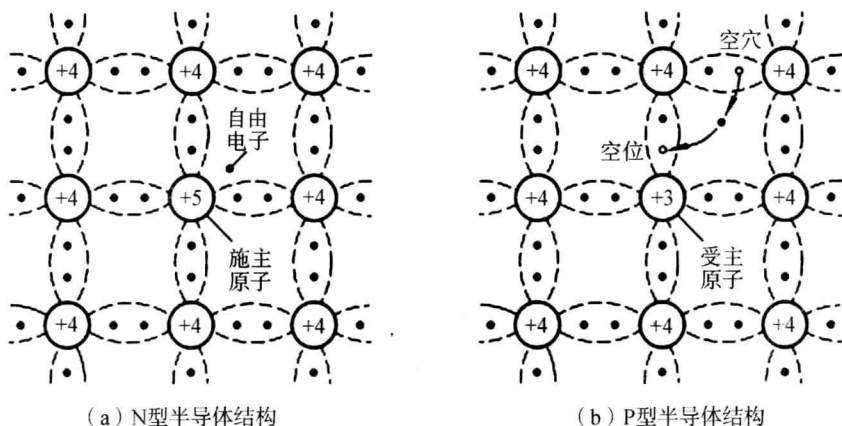


图 1-3 N 型半导体和 P 型半导体的结构

N 型半导体和 P 型半导体统称为杂质半导体。掺杂后的半导体的导电能力将显著增强,由理论计算可知,若在本征半导体中掺入 $\frac{1}{10}$ 的杂质,其载流子浓度将增加近 10 倍。在杂质半导体中,多子的浓度主要取决于杂质的含量;少子的浓度主要与本征激发有关,它对温度的变化非常敏感,其大小随温度的升高基本上按指数规律增大,因此,温度是影响半导体器件性能的一个重要因素。

1.1.3 PN 结的形成过程

单一的杂质半导体,通常只能用来制造电阻器件。如果采用某种掺杂工艺,在一块完整的半导体的一边形成 N 型半导体,另一边形成 P 型半导体,则

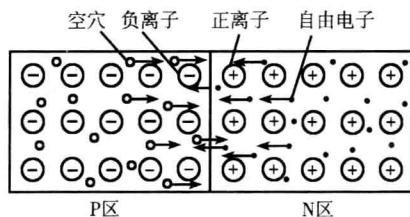
在它们的交界处形成一个具有特殊物理性能的薄层(其厚度为数微米),称为PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础。下面首先讨论PN结形成的物理过程。

1. 载流子的扩散运动

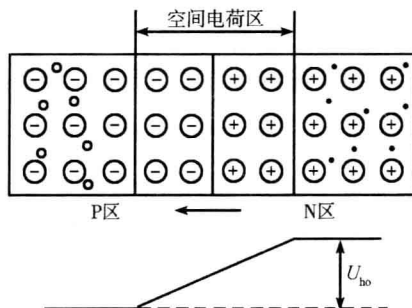
当P型和N型两种半导体结合在一起的时候,在交界面的两侧,P区的空穴(多子)浓度远大于N区的空穴(少子)浓度,因此,P区的空穴必然向N区运动,并与N区中的电子复合而消失;同理,N区的电子必然向P区运动,并与P区中的空穴复合而消失。这种由于浓度差而引起的载流子运动,称为扩散运动,如图1-4(a)所示。

2. 内电场的建立

载流子扩散运动的结果,使交界面P区一侧失去空穴而留下负离子,N区一侧失去电子而留下正离子。这些不能移动的带电离子称为空间电荷,而由这些正、负离子形成的薄层叫做空间电荷区,在这个区域内载流子已耗尽,故又称为耗尽层,并建立起一个电场,其方向由N区指向P区,如图1-4(b)所示。这个电场是由于多数载流子的扩散和复合而产生的,为区别由外加电压建立的电场,故称为内电场。空间电荷使交界面两侧的电中性被破坏了,但是,空间电荷区以外的P区和N区仍呈电中性。



(a) 载流子的扩散运动



(b) PN结和它的电场

图1-4 PN结的形成

3. 内电场对载流子运动的作用

随着载流子扩散运动的进行,空间电荷区加宽,内电场加强。但是,内电场是阻止多子扩散的,即阻止 P 区的空穴向 N 区、N 区的电子向 P 区继续扩散。所以,空间电荷区又称为阻挡层。

另一方面,内电场又推动 P 区的少子电子向 N 区、N 区的少子空穴向 P 区运动。这种在电场作用下的载流子的运动称为漂移运动,其结果使空间电荷区变窄,内电场削弱,这又将导致多子扩散运动的加强。

4. PN 结的形成

由以上分析可见,载流子在 P 区和 N 区的交界面发生着两种相反的运动——多子的扩散运动和少子的漂移运动。开始时,扩散运动占优势,尔后随着内电场的逐步加强,多子的扩散运动逐渐减弱,少子的漂移运动逐渐加强。最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡。即 P 区的空穴向 N 区扩散的数量与 N 区的空穴向 P 区漂移的数量相等;自由电子亦类似。此时,空间电荷不再变化,因而形成了宽度稳定的空间电荷区,即 PN 结。

在 PN 结内,由于载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说被耗尽了,所以空间电荷区又称耗尽区。

当 P 区和 N 区的掺杂浓度相同时,则交界面两侧的空间电荷区的宽度相等,其 PN 结称为对称 PN 结;若两个区域的掺杂浓度不同时,由于 PN 结两边的正、负离子数不相等,则掺杂浓度较高的一侧的空间电荷宽度大于掺杂浓度较低的一侧,这种 PN 结称为不对称 PN 结。实际半导体器件的 PN 结都是不对称结。下面以对称 PN 结为例讨论其特性,所得到的结论亦适用于不对称 PN 结。

1.1.4 PN 结的单向导电性

以上讨论了 PN 结无外加电压时的情况,这时载流子的扩散与漂移处于动态平衡,流过 PN 结的电流为零。

实际工作中的 PN 结总是加有一定的电压。当外加电压的极性不同时,PN 结的导电性能迥然不同,即呈现单向导电性。

1. PN 结正向偏置

通常将加在 PN 结上的电压称为偏置电压。若 PN 结外加正向电压(P 区接电源的正极,N 区接负极,或 P 区电位高于 N 区电位),称为正向偏置,简称正偏,如图 1-5(a)所示。这时外加电压 U 在 PN 结上形成外电场,其方向与内电场方向相反,使耗尽层(空间电荷区)变窄,于是多子的扩散运动增

强,形成较大的扩散电流,其方向由 P 区流向 N 区,称为正向电流 I 。在一定范围内,外加电压 U 越大,正向电流 I 越大,PN 结呈低阻导通状态,相当于开关闭合。为了限制过大的电流 I ,回路中串入了合适阻值的限流电阻 R 。

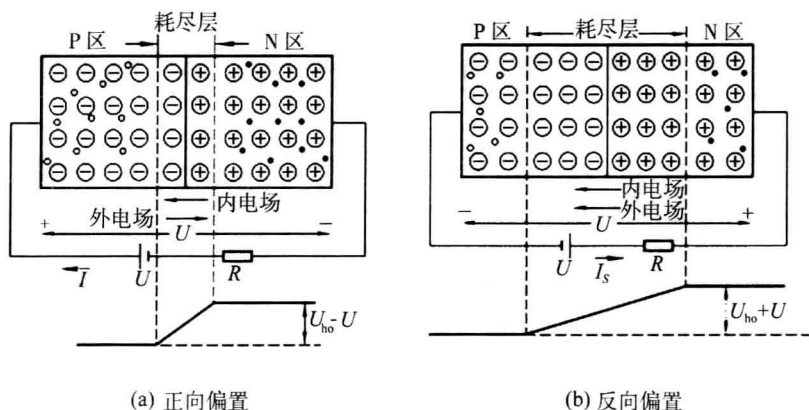


图 1-5 PN 结的单向导电特性

2. PN 结的反向偏置

若 PN 结加反向电压(P 区接电源负极,N 区接正极,或 P 区电位低于 N 区电位),称为反向偏置,简称反偏。如图 1-5(b)所示。这时外电场的方向与内电场的方向相同,使耗尽层(空间电荷区)变宽,于是多子的扩散运动难于进行,此时流过 PN 结的电流,主要由少子的漂移运动形成的,其方向由 N 区流向 P 区,称为反向电流 I_s 。当温度不变时,少数载流子的浓度不变,因此反向电流 I_s 几乎不随外加电压而变化,故又称为反向饱和电流。在常温下,少数载流子的浓度很低,所以反向电流很小,一般可以忽略,PN 结呈高阻截止状态,相当于开关断开。

1.1.5 PN 结的结电容

PN 结具有电容效应,按产生的原因不同,分为势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 。当 PN 结正偏时,扩散电容远大于势垒电容;而反偏时,主要是势垒电容,扩散电容很小,可以忽略。

1. 势垒电容 C_b

PN 结的空间电荷随外加电压变化而形成的电容效应,叫做势垒电容,记

为 C_b 。当外加正向电压增加时,由于空穴的扩散,中和一部分带电粒子,空间电荷量减少,就像一部分电子和空穴“存入”PN 结,相当于势垒电容充电,外加正向电压减少时,又有一部分电子和空穴离开 PN 结,好似电子和空穴从 PN 结中“取出”,相当于势垒电容放电。当外加电压不变时,空间电荷量保持不变,势垒电容无充放电现象。因此,势垒电容只在外加电压变化时才起作用,外加电压频率越高,其作用越显著。

2. 扩散电容 C_d

外加正向电压时,PN 结两边的载流子向对方区域作扩散运动,扩散到对方区域的载流子,并不立即复合,而是在扩散过程中,一边扩散,一边复合。这样 P 区就积累(存入)大量的电子,N 区积累(存入)大量的空穴,体现电容效应,即扩散电容 C_d 。

PN 结的电容效应称结电容 C_j ,就是上述两种电容的综合,即:

$$C_j = C_b + C_d$$

一般很小,在几到几百皮法。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和特性

1. 二极管的结构

二极管由一个 PN 结接上引出电极用管壳封装而成。P 区引出电极叫阳极(正极),N 区引出电极叫阴极(负极),图 1-6 示出了一些常见二极管的结构和符号。二极管的类型很多:按结构分,有点接触型、面接触型和平面型;按所用材料分,有硅二极管和锗二极管。

点接触型二极管 PN 结的结面积小,不允许通过较大的电流,但它的结电容小,可以在高频下工作,因此,适用于小电流整流、高频检波、混频和开关电路。

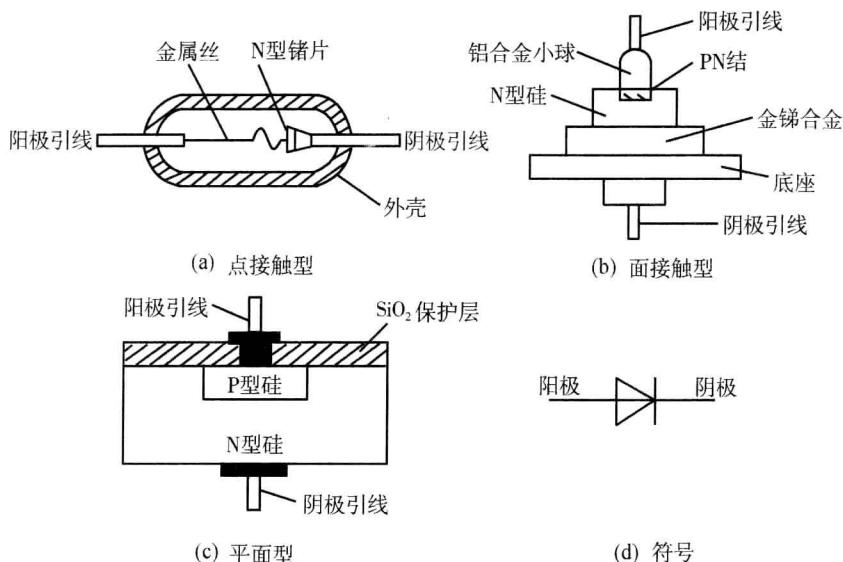


图 1-6 半导体二极管的结构和符号

面接触型和平面型二极管 PN 结的结面积大,可通过较大的电流,但结电容也大,宜作低频整流用。

2. 二极管的伏-安特性

二极管的伏-安特性曲线如图 1-7 所示,它是二极管两端电压 U 和通过管子的电流 I 之间的关系曲线。

(1) 正向特性

当正向电压比较小时,由于外电场还不足以克服内电场,扩散运动难以进行,正向电流几乎为零,二极管呈现较大的电阻,这个区域叫做死区。当正向电压超过某一数值时,二极管处于导通状态,正向电流随外加电压增加而迅速增大,该电压称为阈值电压(导通电压或死区电压),用 U_{TH} 表示。在室温下,硅管的 U_{TH} 约为 $0.4V$,锗管的 U_{TH} 约为 $0.1V$ 。在正常使用的电流范围内,二极管的正向压降很小,硅管的导通压降为 $0.6 \sim 0.8V$ (通常取 $0.7V$),锗管的导通压降为 $0.2 \sim 0.3V$ (通常取 $0.2V$)。

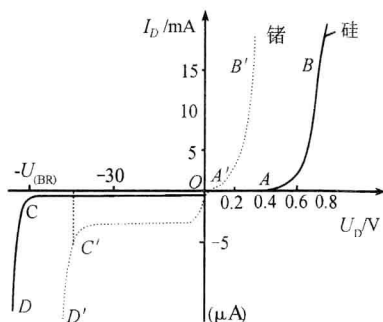


图 1-7 二极管伏-安特性曲线

(2) 反向特性

二极管两端加反向电压时,内电场加强,阻碍扩散而有利于漂移。由于少数子数量有限,形成很小的反向饱和电流。在室温下,硅管的反向饱和电流比锗管小得多,小功率硅管的反向饱和电流小于 $0.1\mu\text{A}$,锗管为几十微安。

(3) 反向击穿特性

当反向电压的绝对值增加到 $U_{(\text{BR})}$ 时,反向电流将突然剧增,这种现象叫反向击穿。 $U_{(\text{BR})}$ 叫反向击穿电压,一般为几十伏以上。

反向击穿有电击穿和热击穿。电击穿是可逆的,只要反向电压降低后,二极管仍可恢复正常。但是,电击穿时如果没有适当的限流措施,就会因电流大、电压高,使管子过热造成永久性损坏,这叫做热击穿。电击穿往往为人们利用(如稳压管),而热击穿必须避免。

(4) 二极管的温度特性

二极管的特性对温度变化很敏感。常温下,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 ,反向电流约增大一倍。

(5) 二极管伏安方程

理论分析指出,半导体二极管电流 I 与端电压 U 的关系可表示为

$$I = I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中 I_S 为反向饱和电流, $U_T = KT/q$ 为温度的电压当量,其中 K 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电量。在常温(300K)时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

由二极管伏安方程可知,正向偏置时,只要 $U \gg U_T$,则 $I \approx I_S e^{\frac{U}{U_T}}$,即电流 I 与电压 U 基本上成指数关系。反向偏置时,只要 $|U| \gg U_T$,则 $I = -I_S$ 。

1.2.2 二极管的使用常识

1. 二极管的型号

国家标准(GB249-74)规定,国产半导体器件的型号由五部分组成:

第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
· 用阿拉伯数字表示器件电极数目	用汉语拼音字母表示器件的材料和极性	用汉语拼音字母表示器件的类型	用阿拉伯数字表示序号	用汉语拼音字母表示规格号

(详见附录 A)

2. 二极管的主要参数

二极管的性能除了用伏安特性表示外,还可以用一些参数来描述。主要有:

1)最大整流电流 I_F 。指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流,它与PN结的材料、结面积和散热条件有关。如果在实际运用中流过二极管的平均电流超过 I_F ,则管子将会过热而烧坏。因此,二极管的平均电流不能超过 I_F ,并要满足散热条件。

2)最大反向工作电压 U_{RM} 。指二极管在使用时所允许加的最大反向电压。为了确保二极管安全运行,通常取二极管反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半作为 U_{RM} 。在实际运用时二极管所承受的最大反向电压不应超过 U_{RM} ,否则二极管就有发生反向击穿的危险。

3)反向电流 I_R 。指常温下二极管未击穿时的反向电流值。 I_R 越小,管子的单向导电性越好。由于温度升高时 I_R 将急剧增大,所以使用时要注意温度的影响。

4)最高工作频率 f_M 。这是由PN结的结电容大小决定的参数。当工作频率 f 超过 f_M 时,则结电容的容抗变小,高频电流将直接从结电容通过,管子将逐渐失去它的单向导电性。

应当指出,由于制造工艺的限制,即使是同一型号的管子,参数的分散性也很大。手册上给出的往往是参数的范围。另外,手册上的参数是在一定的测试条件下测得的,使用时要注意这些条件,若条件改变,则相应的参数值也会发生变化。实际选用中,往往通过实测来选择。

3. 二极管的选择

无论是设计电路,还是修理电子设备,我们都会面临一个如何选择二极管的问题。根据上面的介绍,可以得到选择二极管必须注意的几点:

1)设计电路时,根据电路对二极管的要求查阅半导体器件手册,从而确定选用的二极管型号。确定选用管子型号时,选用的二极管极限参数 I_F 、 U_{RM} 、 f_M 应分别大于电路对二极管相应参数的要求。并应注意:要求导通电压低时选锗管,要求反向电流小时选硅管,要求反向击穿电压高时选硅管,要求工作频率高时选点接触型管,要求工作环境温度高时选硅管。

2)在修理电子设备时,如果发现二极管损坏,则用同一型号的管子来替换。如果找不到同一型号的管子而改用其他型号二极管来替代时,则替代管子的极限参数 I_F 、 U_{RM} 、 f_M 应不低于原管,且替代管子的材料类型(硅管或锗管)一般应和原管相同。