

高职高专电子类、自动化类系列教材

Analogy Electronic Technology

模拟电子技术

++主编 ++ 胡桃生

合肥工业大学出版社

模拟电子技术

主 编 胡桃生
副主编 李 蓉 黄双根 向 楠
编 委 (以姓氏笔画为序)
孔令军 李 蓉 向 楠
仲济艳 聂 凯 徐 非
黄双根 胡桃生

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/胡桃生主编. —合肥:合肥工业大学出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-81093-853-2

I. 模… II. 胡… III. 模拟电路—电子技术—高等学校:技术学校—教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 213918 号

模 拟 电 子 技 术

主 编 胡桃生

责任编辑 陆向军

出 版 合肥工业大学出版社

地 址 合肥市屯溪路 193 号

邮 编 230009

电 话 总编室:0551—2903038

发行部:0551—2903198

网 址 www.hfutpress.com.cn

E-mail press@hfutpress.com.cn

版 次 2009 年 1 月第 1 版

印 次 2009 年 1 月第 1 次印刷

开 本 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 14.5

字 数 273 千字

印 刷 合肥现代印务有限公司

发 行 全国新华书店

ISBN 978-7-81093-853-2

定价: 24.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

本书依据教育部制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》，结合高职培养技能型、应用型人才的特点编写而成。

本书紧密结合高职教育特点，充分考虑学生文化基础等实际情况，本着“以应用为目的，以必需、够用为度”的原则，博采各家之长。本书汇集了全体编写人员多年的教学实践，书中大量案例都来自于生产和教学实际，既通俗易懂，又有很强的指导性和实用性。本书每章有小结并结合需要掌握的知识点配有习题和自测题，便于教师课堂教学和学生课外自学。

本书第1章由江西农大黄双根、安徽工业职业技术学院胡桃生编写；第2章由淮南职业技术学院李蓉编写；第3章由安徽工商职业技术学院聂凯、仲济艳编写；第4章由宣城职业技术学院孔令军编写；第5章由安徽国防职业技术学院向楠编写；第6章由胡桃生编写；第7章由安徽工商职业技术学院徐非编写；附录由胡桃生编写。全书由胡桃生进行统稿。

在本书编写过程中，得到合肥工业大学出版社的大力支持和帮助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处和错误难免存在，敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年元月

目 录

第 1 章 半导体二极管	(1)
1.1 半导体基本知识	(1)
1.2 P N 结	(4)
1.3 半导体二极管	(6)
1.4 特殊二极管	(16)
1.5 实践环节	(19)
本章小结	(21)
习题	(22)
自测题	(23)
第 2 章 半导体三极管	(26)
2.1 双极型三极管	(26)
2.2 场效应管	(36)
2.3 实践环节	(46)
本章小结	(48)
习题	(48)
自测题	(49)
第 3 章 基本放大电路	(51)
3.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标	(51)
3.2 三种基本组态放大电路	(53)
3.3 差分放大电路	(67)
3.4 功率放大电路	(70)
本章小结	(77)
习题	(78)
自测题	(81)
第 4 章 集成运算放大器与电子电路中的反馈	(86)
4.1 集成运算放大电路简介	(86)
4.2 电子电路中的反馈	(90)
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	(94)
* 4.4 深度负反馈简介	(96)

本章小结	(97)
习题	(98)
自测题	(99)
第5章 信号的运算与处理	(101)
5.1 集成运算放大器的三种基本电路	(101)
5.2 集成模拟乘法器在运算电路中的应用	(112)
5.3 无源滤波器	(113)
5.4 有源滤波器	(127)
本章小结	(133)
习题	(134)
自测题	(136)
第6章 信号产生电路	(142)
6.1 正弦波信号发生器	(142)
6.2 非正弦波信号产生电路	(149)
本章小结	(156)
习题	(158)
自测题	(161)
第7章 直流稳压电源	(163)
7.1 整流电路	(163)
7.2 滤波电路	(170)
7.3 线性集成稳压器	(174)
7.4 开关集成稳压电源	(186)
本章小结	(190)
习题	(191)
自测题	(194)
附录	(196)
1. 半导体分立器型号命名方法	(196)
2. 常用半导体分立器件的参数	(197)
3. 半导体集成器件型号命名方法	(200)
4. 常用半导体集成电路的参数和符号	(201)
5. 通用示波器	(202)
习题参考答案	(214)
参考文献	(225)

第1章 半导体二极管

半导体器件,以其体积小、质量轻、功耗小、寿命长、可靠性高等优点,而获得了迅速发展,在计算机、工业自动检测、通信、汽车、航天等方面得到了广泛的应用。本章首先介绍半导体中的载流子和半导体的导电规律,再讨论PN结的原理、特性,然后介绍半导体二极管的工作原理、特性和主要参数。在半导体基础知识方面,着重阐述一些基本概念。对于半导体二极管,要了解它的结构和工作原理,重点掌握它们的特性和参数,以便能正确使用和合理选择二极管,为以后学习各种电子线路打下基础。

1.1 半导体基本知识

1.1.1 半导体的特点

在生产实践和日常生活中,有些物质(如银、铜、铁)很容易导电,叫做导体。另一些物质(如塑料、橡皮)很不容易导电,叫做绝缘体。而半导体则是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质(如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体),其中硅和锗是两种主要的半导体材料。

半导体材料之所以备受关注,并且得到广泛的应用,不是源于它们的电阻率,而是在于它们具有独特的区别于导体和绝缘体的物理特性。具体表现在以下三个方面:第一,半导体的电阻率具有热敏性,随温度的升高而明显地降低(负温度系数),而一般金属的电阻率随温度的升高而增加,例如热敏电阻。第二,半导体的电阻率具有光敏性,即光照可改变半导体的导电特性,光照越强,电阻率越低,这是半导体区别于导体和绝缘体的另一特性,例如硫化铝薄膜电阻。第三,半导体的电阻率受杂质的影响很大,在半导体晶体中掺入极微量的杂质,就能使其导电性能大幅度地改变。不仅如此,选择不同类型的杂质,还可以改变半导体的类型。利用这个特性,可制造出各种不同的半导体器件。

1.1.2 本征半导体

用得最多的半导体是锗和硅。它们各有四个价电子,都是四价元素。将锗或硅材料提纯(去掉无用杂质)并形成单晶体后,所有原子便基本上整齐排列,结构完全对称,具有晶体结构,所以半导体也称为晶体,这就是晶体管名称的由来。

本征半导体就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。在本征半导体的晶体结构中,每一个原子与相邻的四个原子结合。每一原子

的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对。这对价电子是每两个相邻原子共有的,它们把相邻的原子结合在一起,构成所谓共价键的结构。如图 1-1 所示。

在共价键结构中,原子最外层虽然具有八个电子而处于较为稳定的状态,但是共价键中的电子还不像在绝缘体中的价电子被束缚的那样紧,在获得一定能量(温度增高或受光照)后,即可挣脱原子核的束缚(电子受到激发),成为自由电子。温度愈高,晶体中产生的自由电子便愈多,如图 1-2 所示。

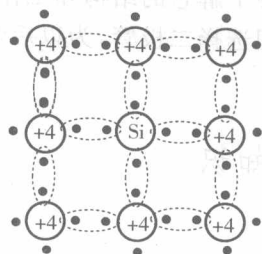


图 1-1 单晶硅共价键结构示意图

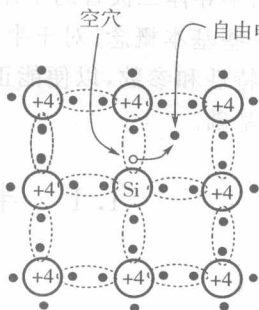


图 1-2 热激发产生的电子空穴对

在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,称为空穴。在一般情况下,原子是中性的。当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,原子的中性便被破坏,而显出带正电。

在外电场的作用下,有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子,填补这个空穴。同时,在失去了一个价电子的相邻原子的共价键中出现另一个空穴,它也可以由另一个相邻原子中的价电子来递补,而在该原子中又出现一个空穴。如此继续下去,就好像空穴在运动。而空穴运动的方向与价电子运动的方向相反,因此空穴运动相当于正电荷的运动。

因此,当半导体两端加上外电压时,半导体中将出现两部分电流:一是由自由电子作定向运动所形成的电子电流,一是仍被原子核束缚的价电子(注意,不是自由电子)递补空穴所形成的空穴电流。在半导体中,同时存在着电子导电和空穴导电,这是半导体导电方式的最大特点,也是半导体和金属在导电原理上的本质差别。

自由电子和空穴都称为载流子。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,同时又不断复合。在一定温度下,载流子的产生和复合达到动态平衡,于是半导体中的载流子(自由电子和空穴)便维持一定数目。温度愈高,载流子数目愈多,导电性能也就愈好。所以,温度对半导体器件性能的影响很大。

1.1.3 杂质半导体

由于本征半导体导电性能极差,如果在本征半导体中掺入微量杂质,它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。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。利用这种特性就可做成各种不同用途的半导体器件,如半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管等,从而开辟了半导体的广泛用途。

在杂质半导体中,因掺入的杂质不同,可分为N型半导体(电子型半导体)和P型半导体(空穴型半导体)两大类。

1. N型半导体

在硅或锗的晶体中掺入磷(或其他五价元素),磷原子的最外层有五个价电子。由于掺入硅晶体的磷原子数比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本上不变,只是某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子参加共价键结构只需四个价电子,多余的第五个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子(图1-3)。于是半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为电子半导体或N型半导体。例如在室温 27°C 时,每立方厘米纯净的硅晶体中约有自由电子或空穴 1.5×10^{10} 个,掺杂后成为N型半导体,其自由电子数目可增加几十万倍。由于自由电子增多而增加了复合的机会,空穴数目便减少到每立方厘米 2.3×10^5 个以下。故在N型半导体中,自由电子是多数载流子,而空穴则是少数载流子。

2. P型半导体

在硅或锗晶体中掺入硼(或其他三价元素)。每个硼原子只有三个价电子,故在构成共价键结构时,将因缺少一个电子而产生一个空位。当相邻原子中的价电子受到热或其他的激发获得能量时就有可能填补这个空位,而在该相邻原子中便出现一个空穴(图1-4)。每一个硼原子都能提供一个空穴,于是在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体称为空穴半导体或P型半导体,其中空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。

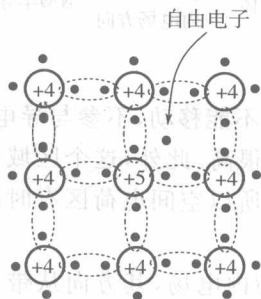


图1-3 硅晶体中掺入磷出现自由电子

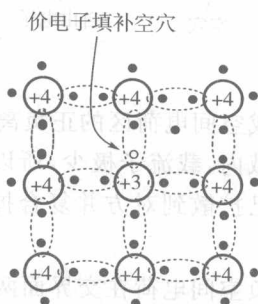


图1-4 硅晶体中掺入硼出现空穴

应注意,不论是N型半导体还是P型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但是整个晶体仍然是不带电的。

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

P型或N型半导体的导电能力虽然大大增强,但并不能直接用来制造半导体器件。通常是在一块N型(P型)半导体的局部再掺入浓度较大的三价(五价)杂质,使其变为P型(N型)半导体。在P型半导体和N型半导体的交接面就形成PN结。它是构成各种半导体器件的基础。

图1-5所示的是一块晶片,两边分别形成P型和N型半导体。图中 $\ominus$ 代表得到一个电子的三价杂质(例如硼)离子,带负电; $\oplus$ 代表失去一个电子的五价杂质(例如磷)离子,带正电。由于P区有大量空穴(浓度大),而N区的空穴极少(浓度小),因此空穴要从浓度大的P区向浓度小的N区移动,由浓度大的向浓度小的载流子的运动,称扩散运动。首先是交界面附近的空穴扩散到N区,在交界面附近的P区留下一些带负电的三价杂质离子,形成负空间电荷区。同样,N区的自由电子要向P区扩散,在交界面附近的N区留下带正电的五价杂质离子,形成正空间电荷区。这样,在P型和N型半导体交界面的两侧就形成了一个空间电荷区,这个空间电荷区就是PN结。

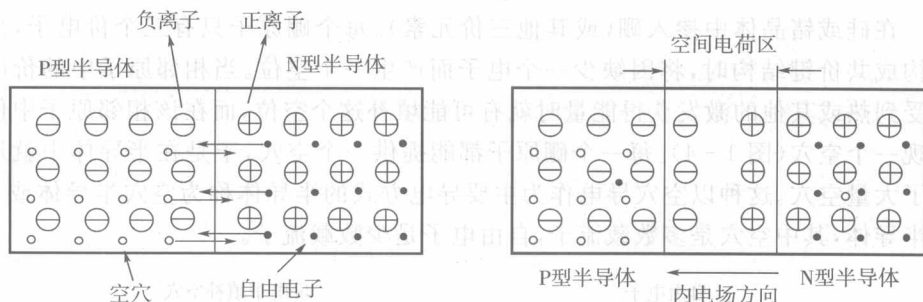


图 1-5 PN 结的形成

形成空间电荷区的正负离子虽然带电,但是它们不能移动,不参与导电,而在这个区域内,载流子极少,所以空间电荷区的电阻率很高。此外,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,所以空间电荷区有时称为耗尽层。

正负空间电荷在交界面两侧形成一个电场,称为内电场,其方向从带正电的N区指向带负电的P区,如图1-5所示。由P区向N区扩散的空穴在空间电荷区

将受到内电场的阻力,而由N区向P区扩散的自由电子也将受到内电场的阻力,即内电场对多数载流子(P区的空穴和N区的自由电子)的扩散运动起阻挡作用,所以空间电荷区又称为阻挡层。

空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用,这是一个方面。但另一个方面,内电场对少数载流子(P区的自由电子和N区的空穴)则可推动它们越过空间电荷区,进入对方。少数载流子在内电场作用下有规则的运动称为漂移运动。

扩散和漂移是互相联系,又是互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时,多数载流子的扩散运动占优势。但在扩散运动进行过程中,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐步加强。于是,在一定条件下(例如温度一定),多数载流子的扩散运动逐渐减弱,而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡。达到平衡后,空间电荷区的宽度基本上稳定下来,PN结就处于相对稳定的状态。

1.2.2 PN结的单向导电性

上面讨论的是PN结在没有外加电压时的情况,这时半导体中的扩散和漂移处于动态平衡。下面讨论在PN结上加外部电压的情况。将PN结上的外部电压也叫偏置。

如果在PN结上加正向电压,即外电源的正端接P区,负端接N区(图1-6)。由图可见,外电场与内电场的方向相反,因此扩散与漂移运动的平衡被破坏。外电场驱使P区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷,同时N区的自由电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷。于是,整个空间电荷区变窄,内电场被削弱,多数载流子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流(正向电流)。在一定范围内,外电场愈强,正向电流(由P区流向N区的电流)愈大,这时PN结呈现的电阻很低,正向电流包括空穴电流和电子电流两部分。空穴和电子虽然带有不同极性的电荷,但由于它们的运动方向相反,所以电流方向一致。外电源不断地向半导体提供电荷,使电流得以维持。

若给PN结加反向电压,即外电源的正端接N区,负端接P区(图1-7),则外电场与内电场方向一致,也破坏了扩散与漂移运动的平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使得空间电荷增加,空间电荷区变宽,内电场增强,使多数载流子的扩散运动难于进行。但另一方面,内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动,在外电场的作用下,N区中的空穴越过PN结进入P区,P区中的自由电子越过PN结进入N区,在电路中形成了反向电流(由N区流向P区的电流)。由于少数载流子数量很少,因此反向电流不大,即PN结呈现的反向电阻很高。又因为少数载流子是由于价电子获得热能(热激发)挣脱共价键的束缚而产生的,环境温度愈高,少数载流子的数量愈多。所以,温度对反向电流的影响很大。

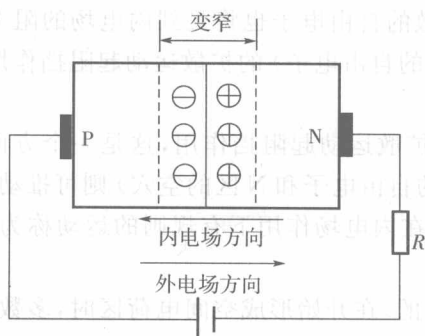


图 1-6 PN 结加正向电压

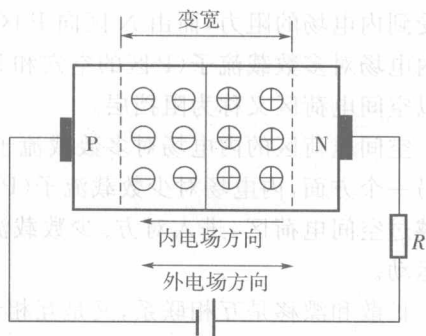


图 1-7 PN 结加反向电压

由以上分析可知:PN 结具有单向导电性。即在 PN 结上加正向电压时,PN 结电阻很低,正向电流较大(PN 结处于导通状态);加反向电压时,PN 结电阻很高,反向电流很小(PN 结处于截止状态)

1.3 半导体二极管

一个 PN 结加上相应的外引线,然后用塑料、玻璃或铁皮等材料做外壳封装就成为最简单的二极管。二极管按材料不同分为硅管和锗管。

1.3.1 基本结构

将 PN 结加上相应的电极引线和管壳,就成为半导体二极管。按结构分,二极管有点接触型和面接触型两类。点接触型二极管(一般为锗管)如图 1-8(a)所示。它的 PN 结结面积很小(结电容小),因此不能通过较大电流,但其高频性能好,故一般适用于高频和小功率的工作,也用作数字电路中的开关元件;面接触型二极管(一般为硅管)如图 1-8(b)所示,它的 PN 结结面积大(结电容大),故可通过较大电流,但其工作频率较低,一般用作整流。图 1-8(c)是二极管的表示符号。

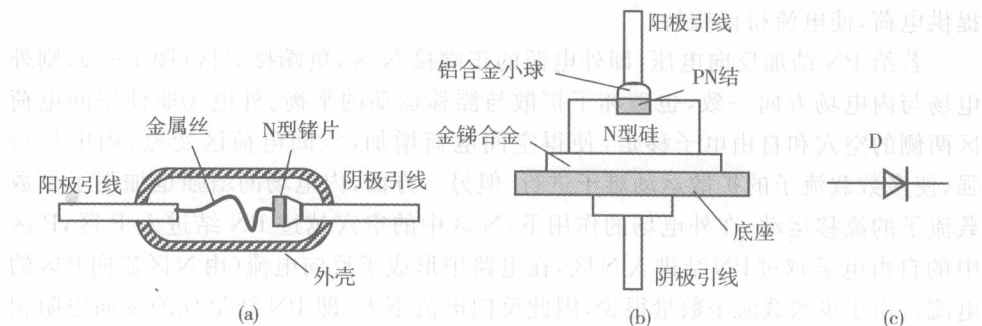


图 1-8 半导体二极管

(a) 点接触型 (b) 面接触型 (c) 表示符号

1.3.2 伏安特性

二极管既然是一个PN结,它当然具有单向导电性,其伏安特性曲线如图1-9所示。其数学表达式为

$$i_D = I_S(e^{u_D/U_T} - 1)$$

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

式中, I_S 为二极管的反向饱和电流,单位为 A; k 为玻尔兹曼常数 $k = 1.380 \times 10^{-23}$ J/K, T 为热力学温度,单位为 K, q 为电子电量 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C; U_T 为温度电压当量,在常温下, $U_T \approx 26$ mV。

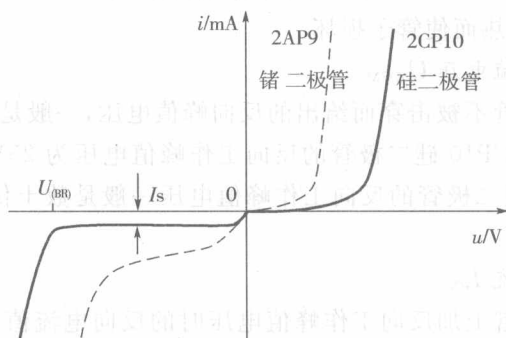


图1-9 二极管的伏安特性曲线

由图可见,当外加正向电压很低时,由于外电场还不能克服PN结内电场对多数载流子(除少量能量较大者外)扩散运动的阻力,故正向电流很小,几乎为零。当正向电压超过一定数值后,内电场被大大削弱,电流增长很快。这个一定数值正向电压称为死区电压,其大小与材料及环境温度有关。通常,硅管的死区电压约为 0.5V,锗管约为 0.1V。导通时的正向压降,硅管约为 0.6V ~ 0.8V,锗管约为 0.2V ~ 0.3V;温度升高正向曲线左移。

在二极管上加反向电压时,由于少数载流子的漂移运动,形成很小的反向电流。反向电流有两个特点:一是它随温度的上升增长很快;二是在反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本恒定,而与反向电压的高低无关,故通常称它为反向饱和电流。而当外加反向电压过高时,反向电流将突然增大,二极管失去单向导电性,这种现象称为击穿。二极管被击穿后,一般不能恢复原来的性能,便失效了。击穿发生在空间电荷区。发生击穿的原因,一种是处于强电场中的载流子获得足够大的能量碰撞晶格而将价电子碰撞出来,产生电子空穴对,新产生的载流子在电场作用下获得足够能量后又通过碰撞产生电子空穴对,如此形成连锁反应,反向电流愈来愈大,最后使得二极管反向击穿,这种击穿称为雪崩击穿。另一种原因是强电场直接将共价键的价电子拉出来,产生电子空穴对,形成较大的反向电

流,这种击穿称为齐纳击穿(稳压管原理)。产生击穿时,加在二极管上的反向电压称为反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。

1.3.3 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。二极管的主要参数有下面几个:

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长时间使用时,允许流过二极管的最大正向平均电流。点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下。面接触型二极管的最大整流电流较大,如 2CP10 型硅二极管的最大整流电流为 100mA。当电流超过允许值时,将由于 PN 结过热而使管子损坏。

2. 反向工作峰值电压 U_{RWM}

它是保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压,一般是反向击穿电压的一半或三分之二。如 2CP10 硅二极管的反向工作峰值电压为 25V,而反向击穿电压约为 50V。点接触型二极管的反向工作峰值电压一般是数十伏,面接触型二极管可达数百伏。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

它是指在二极管上加反向工作峰值电压时的反向电流值。反向电流大,说明二极管的单向导电性能差,并且受温度的影响大。硅管的反向电流较小,一般在几个微安以下;锗管的反向电流较大,约为几十倍到几百倍。

1.3.4 二极管的应用举例

二极管的应用范围很广,主要都是利用它的单向导电性。它可用于整流、检波、钳位、限幅、元件保护以及在数字电路中作为开关元件等。

1. 整流

将交流电变成单向脉动直流电的过程称为整流。利用二极管的单向导电性能可获得各种形式的整流电路。

图 1-10 所示的就是由一个二极管构成的单相半波整流电路。正半周时二极管 D 导通,负半周时二极管 D 截止,把输入的正弦交流电压变换为单向脉动电压,起到整流作用。这种整流方式称为单相半波整流电路。

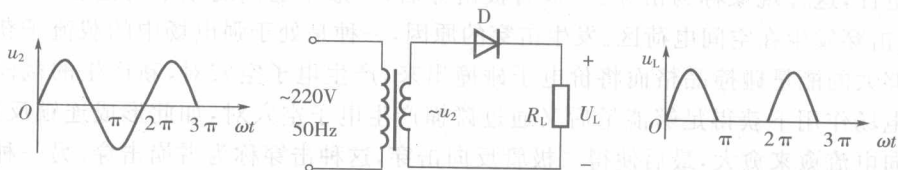


图 1-10 单相半波整流电路

2. 检波电路

检波电路如图 1-11 所示,常用于半导体收音机等电路中。利用二极管的单向导电性,将变频后的中频交流信号变换为单向的半波信号,而后利用电容 C 高频阻抗小,低频阻抗高的特性,输出 u_i 为音频信号,起到了检波作用。

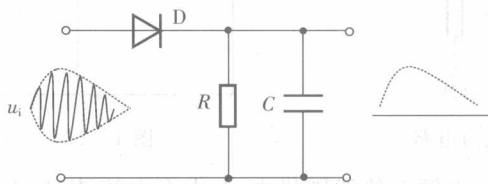


图 1-11 检波电路

3. 限幅电路

限幅电路又称削波电路,其作用是把输出信号的幅值限制在某一数值之下,使后续电路能正常工作。限幅电路如图 1-12 所示。设 $U_1 = U_2 = 5V$, $u_i = 10\sin\omega t V$, D_1 、 D_2 均为理想二极管(不考虑管压和二二极管的正向导通电阻)。当 u_i 为正半周且 $u_i < +5V$ 时, D_1 、 D_2 均截止, $u_o = u_i$; 当 $u_i > +5V$ 时, D_1 导通, D_2 仍然截止,输出 u_o 保持在 $+5V$,直到 u_i 小于 $+5V$ 为止;当 u_i 在 $+5V \sim -5V$ 之间时, D_1 、 D_2 均反向偏置而截止, $u_o = u_i$; 当 $u_i < -5V$ 时, D_2 导通, D_1 仍然截止,输出 u_o 保持在 $-5V$,直到 u_i 大于 $-5V$ 为止,起到限制输出信号幅度的作用。

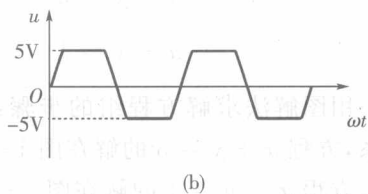
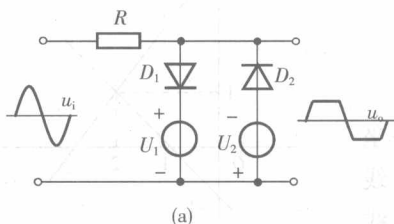


图 1-12 限幅电路

4. 二极管的开关和钳位作用

理想二极管加正向电压时导通,相当于电路中开关闭合;加反向电压时截止,相当于电路中开关断开。

图 1-13 所示电路就是利用二极管的开关作用构成的或门电路。设输入端 A 的电位 $V_A = +3V$, B 的电位 $V_B = 0V$, 因 A 点电位比 B 点高,所以 D_A 优先导通, D_B 而截止,输出端 $V_Y = +3V$ 。在这里, D_A 起钳位作用,把 Y 端电位钳制在 $+3V$; D_B 起隔离作用,把输入端 B 和输出端 Y 隔离开来。

5. 电路中的元件保护

在电子电路中,常用二极管来保护其他元器件免受高电压的损害,如图 1-14 所示的电路, L 和 R 是线圈的电感和电阻。

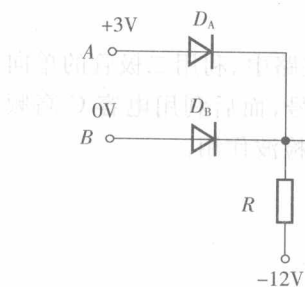


图 1-13 或门电路

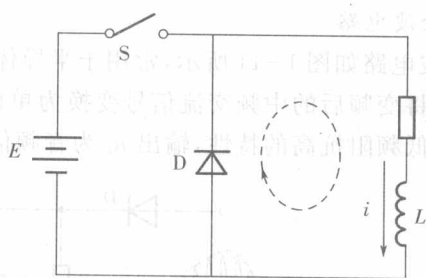


图 1-14 二极管保护电路

在开关S接通时,电源E给线圈供电, L 中有电流流过,存储了电场能量。在开关S由接通到断开的瞬间,电流突然中断, L 中将产生一个高于电源电压很多倍的自感电动势 e_L , e_L 与E叠加作用,在开关S的端子上产生电火花放电,这将影响设备的正常工作,使开关S寿命缩短。接入二极管 V_D 后, e_L 通过二极管 V_D 后产生放电电流 i 使 L 中存储的能量不经过开关S放掉,从而保护了开关S。

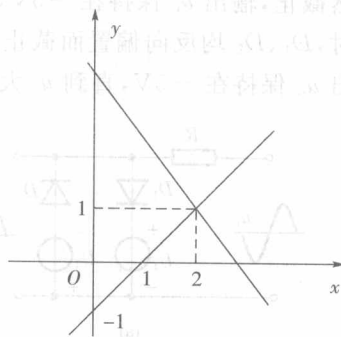
1.3.5 二极管电路的分析方法

1. 图解法的数学基础

图解法在求解方程组时经常用到如求解方程组

$$\begin{cases} x + y = 3 \\ x - y = 1 \end{cases}$$

用图解法求解方程组的步骤:建立 xoy 坐标系,方程 $x + y = 3$ 的解在图1-15中为直线(1),方程 $x - y = 1$ 的解在图1-15中为直线(2)。显然同时满足两个方程的解即方程组的解。方程组的解就是图1-15中直线(1)和直线(2)的交点坐标 $x = 2, y = 1$ 。

图 1-15 用图解法
求方程组

2. 用图解法求二极管电路的方法与步骤

举例说明用图解法求解二极管电路的方法与步骤。

【例 1.3.1】 二极管电路及二极管特性曲线如图1-16所示。图中 $E = 1V$, $R = 100\Omega$, 求流过二极管的电流 I 及二极管两端的电压 V 。

解: 将电路分为两部分,一部分为非线性元件二极管,其余部分由电源及电阻组成,如图1-17所示。

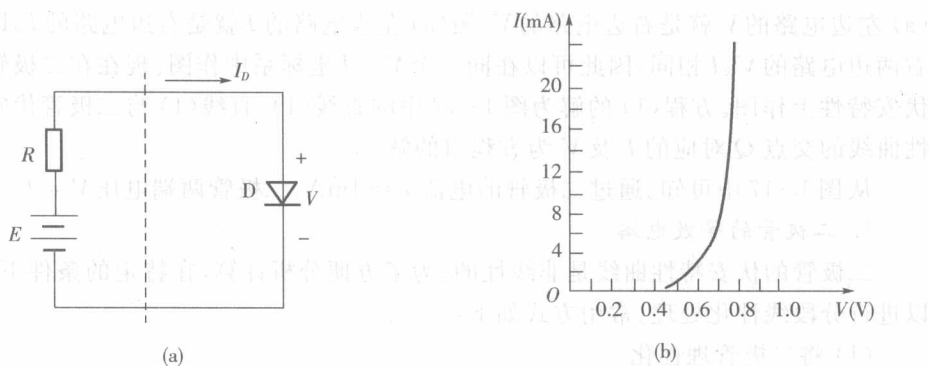


图 1-16 二极管电路及特性曲线

(a) 二极管电路 (b) 伏安特性

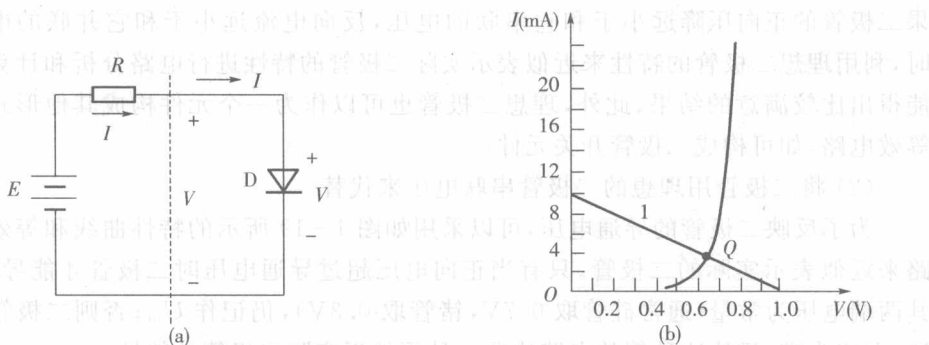


图 1-17 例 1.3.1 的解

(a) 二极管电路 (b) 直线和二极管 $V-I$ 特性图(a) 左边电路中的 V 、 I 满足方程

$$V = E - IR \quad (1)$$

图(b) 电路中的 V 、 I 满足伏安特性方程, 即

$$I = I_S(e^{V/V_T} - 1) \quad (2)$$

从数学上讲, 现在就是要求解方程组

$$\begin{cases} V = E - IR \\ I = I_S(e^{V/V_T} - 1) \end{cases}$$

因为方程 $I = I_S(e^{V/V_T} - 1)$ 中 V 与 I 的关系不是直线, 所以用图解法求解比较方便。方程 $I = I_S(e^{V/V_T} - 1)$ 的解就是图 1-16 中给出二极管伏安特性曲线, 实际工作可查晶体管手册, 也可以用实验的方法测出。总之, 二极管的伏安特性曲线认为是已知的, 即二极管的伏安特性曲线。方程 $V = E - IR$ 的解是一条直线。图