

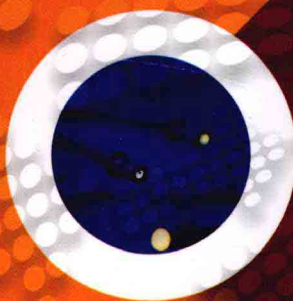


电子与通信工程学科精品教程

模拟电子线路

张友纯 主编

MONI



DIANZI XIANLU

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



电子与通信工程学科精品教程

模拟电子线路

MONI DIANZI XIANLU

主 编 张友纯

副主编 沈俐娜 郝国成 张晓峰

闻兆海 冯 杰

参 编 李爽正

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路/张友纯 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年6月
ISBN 978-7-5609-5408-0

I. 模… II. 张… 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(2009)第 084043 号

模拟电子线路

张友纯 主编

策划编辑:张毅

责任编辑:刘勤

责任校对:朱霞

封面设计:潘群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:华中科技大学印刷厂印刷

开本:787mm×960mm 1/16

印张:15.75 插页:1

字数:326 000

版次:2009年6月第1版

印次:2009年6月第1次印刷

定价:27.00元

ISBN 978-7-5609-5408-0/TN·145

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书根据模拟电子技术的发展,在系统地介绍模拟电子电路基本理论和基本分析方法的前提下,加大了集成运算放大器等集成器件的应用电路及基本分析方法的介绍。本书共分9章,分别介绍了半导体器件、放大器基础、放大器的频率特性、放大电路中的负反馈、功率放大器、集成运算放大器、模拟运算电路、模拟信号处理电路及直流稳压电源。每章后面都配有一定量的习题,可供读者学习时练习。

本书既可作为高等学校电子通信类本科专业和相关专业的教材,也可作为成人教育的教材和相关科技人员的参考书。

前 言

模拟电子线路是通信与电子类专业的一门主干技术基础课程,是联系公共基础课程与专业课程的一个重要纽带,也是通信与电子类专业学生进入工程领域的第一门课程。本课程的基本作用和任务是:通过对常用电子器件、模拟电路及其系统的分析和设计的学习,使学生系统地掌握模拟电子线路的基本原理、基本概念及各种功能单元电路的工作原理和分析设计方法,为电子系统的工程实现和后续课程学习打下必备的基础。

本课程的主要特点:一是学科发展快;二是工程实践性强。

学科发展快主要是指电子科学技术的发展日新月异,新技术、新器件不断涌现,集成化、功能化、智能化器件的研制和应用代表着模拟电子线路发展的趋势。工程实践性强不仅强调本课程具有很强的实际应用意义,而且强调本课程的学习必须是在实践教学中加深对理论知识的理解。因此,本课程不仅介绍了模拟电路基本原理、基本分析和计算方法,还注重加大集成器件、功能模块等新器件的电路理论和分析方法的讨论,并注重工程计算和集成器件应用的介绍,力求使本课程适应模拟电路领域国内外的发展趋势的需要和满足培养学生实际动手能力和创新能力的要求。

全书共分9章。第1章半导体器件,介绍了半导体的物理基础知识,PN结的形成,二极管、特殊二极管的特性、参数和典型应用电路;三极管、场效应管的基本工作原理、特性和主要参数;集成运算放大器的基本特点、主要参数和理想运算放大器的主要特征。第2章放大器基础,介绍了放大器的主要性能指标,放大电路分析方法,静态工作点的概念,并结合基本放大电路介绍了放大器主要性能指标的计算方法。第3章放大器频率特性,介绍了放大电路频率分析方法,晶体三极管、场效应管和运算放大器的高频等效电路,典型放大电路的频率分析,以及宽带放大电路和宽带集成放大器件。第4章放大电路中的负反馈,提出了用等效放大器的概念进行反馈类型的判别,使反馈的判别变得相对容易;介绍了负反馈的工程计算和反馈放大器的稳定性分析。第5章功率放大器,介绍了功率放大器的主要指标,着重介绍了互补推挽功率放大器的工作原理和分析计算。第6章集成运算放大器,介绍了集成运算放大器的差动放大器、电流源等单元电路,以及通用集成运放和典型专用集成运放器件的基本组态和工作原理。第7章模拟运算电路,介绍了模拟信号线性运算电路、对数和指数运算电路,以及乘法器集成器件的工作原理和典型应用。第8章模拟信号处理电路,介绍了电压比较器、波形变换和波形产生电路、有源滤波器和开关电容滤波器的工作原理。第9章直流稳压电源,主要介绍了三端稳压电源和开关电源的工作原理及典型应用电路。

本书的主要特点是:将集成运放作为器件与三极管、场效应管等半导体器件一起介绍,这样,在后面的基本放大电路、频率响应、负反馈、功率放大器等章节中均可介绍集成运放在相应应用中的分析,从而加大了集成运放等集成器件应用电路的介绍,适应了模拟电子技术发展的需要。

本书由张友纯主编。沈俐娜编写了第1章和第2章;张友纯、冯杰编写了第3章、第4章;郝国成编写了第5章、第6章和第7章;闻兆海编写了第8章;张晓峰编写了第9章。张友纯完成全书统稿工作。甘明认真地审阅了全稿,并提出了许多宝贵意见。李爽正做了大量资料整理工作并参与了部分章节的编写。本书的编写参考了许多参考资料,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免出现疏漏和错误,殷切希望读者批评指正,也敬请各位专家给予指教。

编者

2009年3月

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体基础	(1)
1.2 PN 结与晶体二极管	(4)
1.3 特殊二极管	(11)
1.4 晶体三极管	(14)
1.5 场效应管	(20)
1.6 集成运算放大器	(28)
习题	(31)
第 2 章 放大器基础	(35)
2.1 放大电路的主要性能指标和电路组成	(35)
2.2 放大器的分析方法	(39)
2.3 放大电路性能指标的分析	(49)
2.4 多级放大电路	(57)
习题	(30)
第 3 章 放大器的频率特性	(65)
3.1 基本概念与分析方法	(65)
3.2 放大器频率分析	(74)
3.3 宽带放大器	(83)
习题	(88)
第 4 章 放大电路中的负反馈	(90)
4.1 负反馈的基本概念	(90)
4.2 负反馈对放大器性能的影响	(95)
4.3 深度负反馈的工程计算	(100)
4.4 反馈放大电路的稳定性分析	(103)
习题	(108)

第 5 章 功率放大器	(112)
5.1 概述	(112)
5.2 互补推挽功率放大器(OCL)	(117)
5.3 功率放大器的其他电路	(124)
5.4 集成功放应用电路	(128)
习题	(130)
第 6 章 集成运算放大器	(138)
6.1 集成运算放大器概述	(138)
6.2 差分放大器	(141)
6.3 电流源电路	(149)
6.4 通用集成运算放大器简介	(154)
6.5 专用型运算放大器	(156)
习题	(161)
第 7 章 模拟运算电路	(167)
7.1 运算放大器的线性运用特性分析	(167)
7.2 模拟信号线性运算电路	(169)
7.3 对数运算电路和反对数(指数)运算电路	(173)
7.4 集成模拟乘法器及其应用	(176)
习题	(186)
第 8 章 模拟信号处理电路	(192)
8.1 电压比较器	(192)
8.2 波形产生与波形变换电路	(198)
8.3 有源滤波电路	(204)
8.4 开关电容滤波器	(209)
习题	(214)
第 9 章 直流稳压电源	(220)
9.1 整流与滤波	(220)
9.2 稳压电路	(228)
9.3 开关型稳压电源	(236)
习题	(242)
参考文献	(246)

第1章 半导体器件

1.1 半导体基础

物质按其导电能力可分为三种,即导体、绝缘体和半导体。所谓导体,就是容易导电的物质,如金、银、铜、铝等;绝缘体,就是很难导电的物质,如陶瓷、云母、塑料、橡胶等;而导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,如硅和锗等。严格地说,导体、半导体和绝缘体的划分是以物质的电阻率 ρ 来确定的,电阻率小于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 的为导体;电阻率大于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 的为绝缘体;电阻率在这两者之间的为半导体。

半导体之所以得到人们的高度重视,并得到广泛应用,不是它的导电性能在导体和绝缘体之间,而是它的导电性能在外界某种因素作用下会发生显著变化。这种变化具体表现在以下三个方面。

(1) 掺杂性 半导体可以因掺入十分微量的杂质而使其电阻率发生显著的变化,人们正是利用这种特性来改变和控制半导体的电阻率,制成各种半导体器件。

(2) 热敏性 一些半导体对温度的变化非常敏感,温度的变化可以使其电阻率发生明显的变化,人们利用这种特性可以做成各种热敏元件,如热敏电阻、温度传感器等。

(3) 光敏性 在光照下,一些半导体的电阻率可以发生明显变化,有的甚至可以产生电动势,人们利用这种特性可以做成各种光电晶体管、光电耦合器和光电池。

半导体为何有如此奇妙的特性呢? 这些问题属于半导体理论研究的范围。半导体理论是一门专门的学问,下面介绍一些最基本的知识。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是指不含杂质的、纯净的半导体。硅和锗是用得最多的半导体,它们都是四价元素,原子最外层有四个价电子。由原子理论得知,当原子的外层有八个价电子时才处于稳定状态。因此,硅或锗在组成单晶时,每个原子都要从四周相邻原子取得四个价电子,以组成稳定状态。这样每两个原子都共用一对价电子,形成共价电子对,这种结构称为共价键

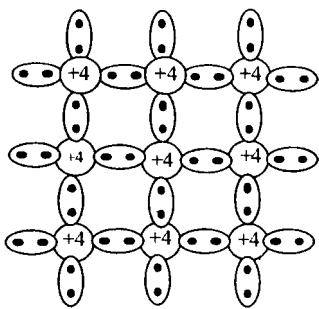


图 1-1 共价键的二维结构示意图

结构。图 1-1 所示为共价键的二维结构示意图。

共价键内的两个电子称为束缚电子,在绝对温度 $T=0$ K 和无外界其他因素激发时,价电子全部束缚在共价键内,随着温度的上升,少数价电子受热激发得到能量,当价电子获得的能量足够大时,便能挣脱原子束缚,而成为自由电子。在没有外加电场的情况下,自由电子作无规律的运动;另一方面,价电子离开共价键后,在该共价键处留下一个空位,这一空位称为空穴,如果相邻共价键中的价电子移动到有空位的共价键中,在原来的位置上产生一个新的空穴,这种情况相当于空穴在移动,在没有外加电场的情况下,这种

移动也是杂乱无章的。

在有外加电场时,自由电子和空穴都在电场的作用下在宏观上作定向运动,这种运动叠加在原来无规则运动的基础上,对外部就显现出电流。自由电子和空穴的运动方向相反,但由于它们的电性也相反,因此对外部显现的电流是相加的。

不难看出,在本征半导体中,每出现一个自由电子就必然伴随着出现一个空穴,两者是成对产生的,称为电子-空穴对。实际上,除了电子-空穴对的产生外,还存在一个逆过程,就是电子-空穴对的复合。因为自由电子也会释放能量而进入有空位的共价键,这时将同时消失一个自由电子-空穴对。也就是说,半导体中电子-空穴对的产生和复合是同时存在的,在一定的温度下,产生和复合数相等,达到动态平衡。

自由电子和空穴都是载运电流的粒子,统称为载流子。理论和实验证明:随着温度的升高,电子-空穴对激剧增加,其增加的速度比指数率还要快。因此,温度对本征半导体的导电能力有显著的影响。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中,人为地掺入少量其他元素(杂质),可以使半导体的导电性能发生显著改变。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同,可将杂质半导体分为两种:电子型半导体和空穴型半导体,即 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入少量五价元素,使每一个五价元素取代一个四价元素在晶体中的位置,可以形成 N 型半导体。常用于掺杂的五价元素有磷、砷和钨。图 1-2 所示为一个磷原子取代一个锗原子后晶体的二维结构示意图。由图可见,

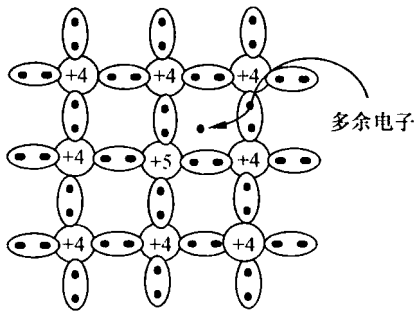


图 1-2 N 型半导体共价键的二维结构示意图
(一个磷原子取代一个锗原子)

磷原子有五个价电子,其中四个与锗原子结合成共价键,余下的一个不在共价键之内,磷原子对它的束缚力较弱,稍受激发就可成为自由电子。由于磷原子很容易贡献出一个自由电子,故称为“施主杂质”。

磷原子提供一个自由电子后,其本身由于失去电子而成为正离子,但并不产生新的空穴,因为磷原子周围的共价键中没有空位。这与本征半导体成对地产生载流子是不同的。

掺杂后,半导体的载流子由两部分组成,一部分是由本征激发产生的电子-空穴对,另一部分则是由于掺入磷原子后由磷原子提供的大量的自由电子。因此,这种杂质半导体的载流子中以自由电子为主,故称为电子型半导体或 N 型半导体。自由电子因此称为多数载流子(简称多子),而空穴则称为少数载流子(简称少子)。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素,可以形成 P 型半导体。常用于掺杂的三价元素有铟、铝和硼。图 1-3 所示为一个硼原子取代一个锗原子后晶体的二维结构示意图。由图可见,硼原子只有三个价电子,这三个价电子只能与相邻的三个锗原子结合成共价键,余下的一个相邻的锗原子的共价键不完整,就有一个价电子的空位虚位以待。邻近锗原子的价电子很容易在稍受激发后过来填补这个空位,因而产生一个空穴,锗原子也由于得到一个价电子而成为一个负离子。硼原子由于能提供一个空位接受邻近的锗原子的价电子而产生一个空穴,故称为“受主杂质”。

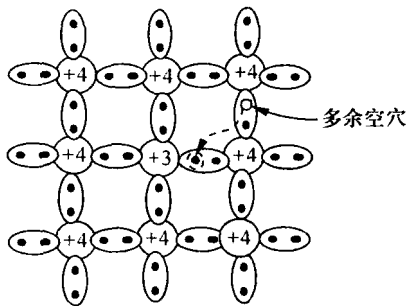


图 1-3 P 型半导体共价键的二维结构示意图
(一个硼原子取代一个锗原子)

掺入三价元素后,半导体中的载流子除了有由本征激发产生的电子-空穴对以外,还有大量的由三价元素提供空位接受邻近锗原子的价电子而产生的空穴,因此这种掺杂半导体的载流子是以空穴为主,故称为 P 型半导体,空穴也就成为多数载流子,而自由电子则成为少数载流子。

通过以上分析可知,半导体中有两种载流子:自由电子和空穴。当 $T > 0 \text{ K}$ 时,载流子作热运动,各向机会相等,不形成电流。但在一定条件下会产生规则的运动而产生电流,即由扩散运动产生的扩散电流和由漂移运动产生的漂移电流。

所谓扩散运动,是由于载流子是一种可以自由移动的带电粒子,当这些载流子浓度分布不均匀时,就会产生一种扩散力,使载流子产生朝着趋向均匀分布的方向扩散运动。载流子扩散运动而产生的电流称为扩散电流。显然,载流子浓度分布越不均匀,扩散力就越大,形成的扩散电流就越大,这就是说,扩散电流与载流子浓度的梯度成正比。

所谓漂移运动,是指载流子在电场力的作用下所作的运动,载流子漂移运动形成的电流称为漂移电流。显然,电场越大,漂移电流越大,即漂移电流与电场强度成正比。

1.2 PN 结与晶体二极管

1.2.1 PN 结的基本原理

1. PN 结的形成

在一块本征半导体中的两边掺以不同的杂质,使其一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体,则在它们的交界处就产生了电子和空穴的浓度差,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,即 P 区的一些空穴要向 N 区扩散,N 区的一些电子要向 P 区扩散,如图 1-4(a)所示。

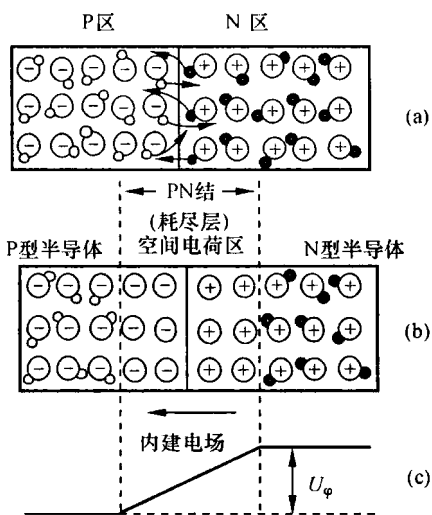


图 1-4 平衡状态下的 PN 结

(a) 由于载流子的扩散运动,而破坏了 P 区和 N 区界面原有的电中性。P 区一边失去空穴而留下负离子(图 1-4(b)中用 \ominus 表示),N 区一边失去电子而留下正离子(图 1-4(b)中用 \oplus 表示)。通常称这些不能运动的正、负离子为空间电荷,它们集中在 P 区和 N 区交界的两边,形成一个空间电荷区,称为势垒区,这就是 PN 结。

(c) 在空间电荷区,由于正、负离子各占一边而产生了由 N 区指向 P 区的电场,这个电场称为内建电场。显然,N 区的电位要比 P 区的高,高出的数值用 U_{ϕ} 表示,称为接触电位差,又称势垒高度,如图 1-4(c)所示。 U_{ϕ} 的数值一般小于 1 V。

内建电场是由于多数载流子的扩散而产生的,而内建电场建立后由于电场力的作用使它一方面要阻止多数载流子向对方扩散,另一方面它又要使少数载流子产生漂移运动,扩散和漂移这两种运动方向相反,由于多数载流子扩散到对方就成为少数载流子,所以漂移运动相当于将扩散到对方的一部分多数载流子拉回到原区间。开始时,空间电荷区不大,内建电场小,使得多数载流子的扩散大于少数载流子的漂移,随着这种情形的继续,空间电荷区增大,内建电场加强,进一步阻止多数载流子的扩散和加大少数载流子的漂移,最后使得多数载流子的扩散和少数载流子的漂移相等,达到动态平衡。在无外界电场或其他激励情况下,PN 结没有电流。

由于在空间电荷区内的载流子已经耗尽,故空间电荷区又称为耗尽层。

2. PN 结的特性

PN 结在不同的状态下具有不同的特性,了解这些特性对于正确理解和运用二极管和三极管具有帮助。

1) PN 结的单向导电性

给 PN 结外加直流电压,电源的正极接 P 区,负极接 N 区,如图 1-5(b)所示。由图可见,外加电压的极性与势垒电势的极性相反。P 区的空穴在正极性电压的作用下趋向势垒区,N 区的电子在负极性电压的作用下也趋向势垒区,从而导致势垒区正、负离子层变薄,势垒高度降低。势垒高度的降低,破坏了原有的平衡,使得较多的多数载流子越过势垒区扩散到对方,形成较大的扩散电流。这种情况下的外加电压称为正向电压。正向电压下的电流也称为正向电流。显然,正向电流随着正向电压的增大而增大。

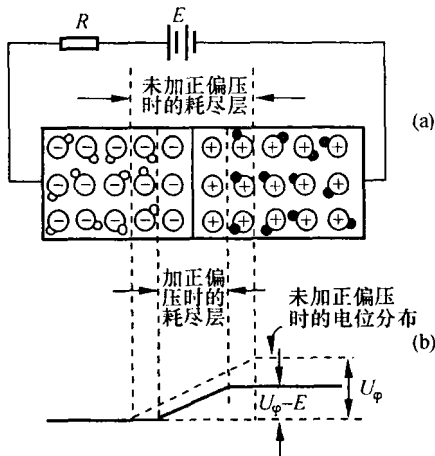


图 1-5 外加正向直流电压下的 PN 结

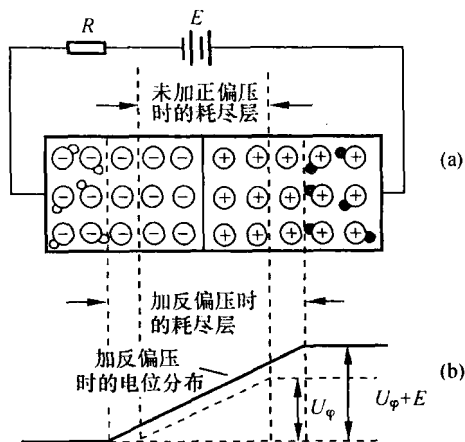


图 1-6 外加反向直流电压下的 PN 结

将外加直流电压的负端接 P 区,正端接 N 区,如图 1-6 所示。这时外加直流电压的极性和势垒极性相同。在外加电压作用下,P 区的空穴趋向电源负极,N 区的电子趋向电源正极,于是势垒区的正、负离子增多,势垒区加厚,势垒增高。势垒增高,也破坏了原有的平衡,多数载流子的扩散进一步抑制,少数载流子的漂移大于多数载流子的扩散,形成漂移电流。这种情况下的外加电压称为反向电压,反向电压作用下的漂移电流称为反向电流。由于反向电流是由本征激发产生的少数载流子而形成的,因此它要比正向电流小得多。反向电流有两个特点:一是在一定温度下,本征激发的少数载流子的浓度是定值,所以反向电流基本上不随外加反向电压发生变化,称为反向饱和电流;二是由于温度的变化,将使本征激发的少数载流子浓度发生变化,所以反向电流受温度影响较大。

2) PN 结的击穿特性

如上所述,PN 结反向运用时,反向电流基本上不随电压的变化而变化。但当 PN 结上加的反向电压超过某一限度时,反向电流将急剧增加,这种现象称为 PN 结的击穿。PN 结的击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

(1) 雪崩击穿 当反向电压足够高时,空间电荷区的电场较强,通过空间电荷区的电子和空穴在电场的作用下加速获得很大的动能,于是有可能与晶体结构中的外层电子碰撞而

使其脱离原子的束缚。被撞出来的载流子在获得一部分能量之后,又可以去碰撞其他的外层电子,这种连锁反应就造成了载流子数目突然急剧增加,犹如雪崩那样,所以这种击穿称为雪崩击穿或碰撞击穿。

(2) 齐纳击穿(隧道击穿) 当反向电压足够高,空间电荷区的电场强度达到 10^5 V/cm 以上时,可把共价键中的电子拉出来,产生电子-空穴对,使得载流子数目突然增多,产生击穿现象,这种击穿称为齐纳击穿。

引起击穿的电压称为击穿电压(用 U_Z 表示)。雪崩击穿一般在 6 V 以上,齐纳击穿一般在 6 V 以下,而击穿电压在 6 V 左右时则常兼有这两种击穿。应当指出,PN 结的击穿破坏了 PN 结的单向导电性,一般应用时应当避免。但击穿并不意味着 PN 结的损坏,只要电流的增加受到限制,就不至于造成 PN 结内部发热使之烧毁。这种现象是可逆的,即当外加电压撤除后,器件的特性可以恢复。

3) PN 结的电容效应

由前面分析可知,PN 结两端加电压,PN 结内就存在电荷的变化,这说明 PN 结存在电容效应。PN 结存在两种电容:势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D ,这将限制器件的工作频率,是一个十分重要的问题。

(1) 势垒电容 C_T 它是由耗尽层内电荷储存作用引起的。如前所述,势垒区内有不能移动的正、负离子,当外加电压变化时,势垒区内的电荷量也会发生变化,引起电容效应,因此称为势垒电容,用 C_T 表示。势垒电容与普通电容不同,它的电容量随外加电压的改变而改变,并不成线性关系,分析表明它们的关系为

$$C_T = \frac{K}{(U_\phi - U)^\gamma} \quad (1-1)$$

式中: K 为一常数; U_ϕ 为 PN 结的势垒电压; U 为 PN 结上的外加电压(正向电压时 $U > 0$,反向电压时 $U < 0$); γ 取值范围为 $1/3 \sim 4$,其值取决于 PN 结的结构。

(2) 扩散电容 C_D PN 结正向运用时,除了存在势垒电容外,还存在一个扩散电容。这是由于 PN 结在正向运用时,多数载流子扩散到对方,将吸引对方区域里相反性质的载流子到其附近,它们并不立即复合,而是有一定的寿命,这就出现了另一种电荷储存效应,也就是电容效应。由于它是载流子扩散引起的,故称为扩散电容,用 C_D 表示。

一般说来,PN 结在正向运用时,势垒电容和扩散电容并存,扩散电容要大些,起主要作用;反向运用时,只有势垒电容。

4) PN 结的温度特性

由于半导体中的本征激发使得载流子数目随温度的变化而急剧变化,使得 PN 结的特性对温度十分敏感。由本征激发所产生的载流子在温度升高时增多,故反向饱和电流随温度升高而增大。温度每升高 1°C ,反向饱和电流增加约 7%。因为 $1.07^{10} = 2$,故温度每升高 10°C ,反向饱和电流增加一倍。

当温度升高使半导体中的本征激发载流子数目增多时,在 PN 结中伴随产生另一个物

理现象,这就是本征激发载流子在各自的区间是少数载流子,它们在 PN 结内建电场的作用下作漂移运动,跨越势垒区进入对侧。P 区的电子进入 N 区,将使 N 区势垒层的正离子层减薄,而 N 区的空穴进入 P 区,也将使 P 区势垒层的负离子层减薄。势垒层减薄的结果,使势垒区的电位差减小,有利于扩散电流的增大。理论和实验表明,温度每升高 1°C ,势垒降低约 2 mV ,对锗和硅这两种材料的影响都差不多。势垒下降的结果,表现为当外加正向电压不变时,PN 结的正向电流将随温度的升高而增大。

1.2.2 晶体二极管

二极管是一个 PN 结,故二极管具有上述 PN 结的特性,前面定性地介绍了一个理想的 PN 结的特性。一个实际二极管的特性与理想 PN 结的特性有所不同,下面将较为详细地介绍实际的二极管的特性。

定量地说明一个电子器件的特性,一般说来有三种方法,即特性曲线图示法、解析式表示法和参数表示法。这三种表示法各有优缺点,可以互相补充。

1. 符号及特性曲线

图 1-7(a)所示为二极管的符号,标正号的引线端与 P 区相连,称为二极管的正极;标负号的引线端与 N 区相连,称为负极。

图 1-7(b)所示为二极管的伏安特性曲线,由图可以看出,该曲线有以下特点。

- (1) 在正向电压的作用下,当正向电压较小时,电流很小。而当正向电压超过某一值(开启电压 U_{T} ,图中所示为锗管,该值为 0.2 V ,对硅管约为 0.6 V)时,电流很快增大。
- (2) 在反向电压的作用下,当反向电压不大时,反向电流为很小的反向饱和电流,且随反向电压的增大而稍有增加,但变化不大。当反向电压超过某一值时,反向电压急剧增加。

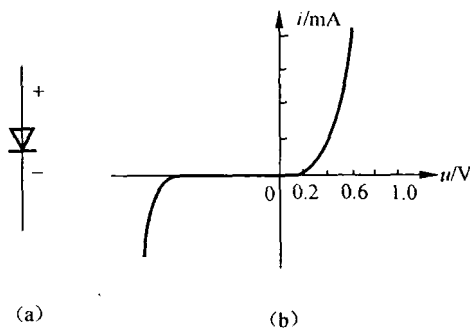


图 1-7 二极管的符号和伏安特性曲线

由图可见,正向特性在小电流范围内比较符合指数规律。电流较大时,曲线几乎接近于直线。这是因为大电流时,PN 结耗尽层的电阻比结外半导体的体电阻及电极接触电阻小,而体电阻和接触电阻均为线性电阻,故此时的伏安关系接近线性关系。反向特性在电压不

超过某一值时的斜度,是因为 PN 结有漏电阻存在的缘故,而当电压超过某一值时的电流急剧增加是由于反向击穿所引起的。

2. 特性的解析式

1) 伏安特性

理论分析指出,PN 结的电流与结电压的关系为

$$I = I_s (e^{\frac{q}{kT}U} - 1) \quad (1-2)$$

式中: q 为电子的电荷量,其值为 1.602×10^{-19} C; k 为波尔兹曼常数,其值为 1.380×10^{-23} J/K; T 为绝对温度值,设室温为 293 K(20 °C),故

$$\frac{q}{kT} = \frac{1}{26} (\text{mV})^{-1}$$

引入符号 $\frac{kT}{q} = U_T, U_T = 26$ mV,通常称为热电压。式(1-2)可写为

$$I = I_s (e^{U/U_T} - 1) \quad (1-3)$$

式中: U 为外加电压,如正向电压就取正值,如为反向电压就取负值。

由式(1-3)可见,当正向电压超过 100 mV 时,就有 $e^{U/U_T} \gg 1$,式(1-3)可简化为

$$I = I_s e^{U/U_T} \quad (1-4)$$

即正向电流与正向电压成指数关系。

当反向电压超过 100 mV 时,就有 $e^{U/U_T} \ll 1$,式(1-3)可简化为

$$I = -I_s \quad (1-5)$$

即反向电流与外加电压无关,而为一恒定值 $-I_s$ 。负值代表实际的电流方向由负极流向正极,与我们假定的电流方向——由正极流向负极相反。

2) 等效电阻

二极管是一个非线性电阻,其等效电阻有直流电阻和微变电阻(交流电阻)之分,所谓直流电阻就是二极管端电压与流过的电流之比,如图 1-8(a)所示;所谓微变电阻就是在

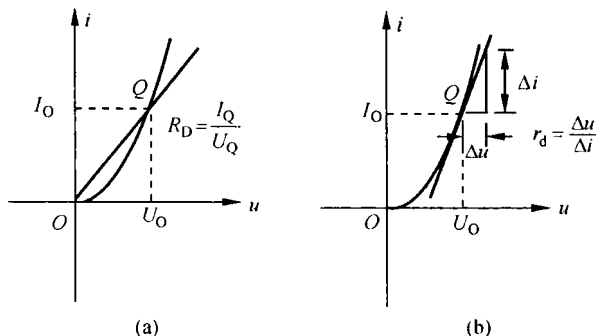


图 1-8 二极管等效电阻的图解

工作点上微小的电压变化引起微小的电流变化的二者变化量比值,即在图 1-8(b)上所示的 $\Delta u/\Delta i$ 。很显然,有两点是应该注意的,一是二极管是一个非线性元件,它的直流和微变等效电阻不是一个常数,都与其工作点有关;二是在同一工作点上,直流电阻和微变电阻是不同的。

微变电阻还可从式(1-3)导出,由式(1-3)可得

$$\frac{1}{r_d} = \frac{di}{du} = \frac{I_S}{U_T} e^{u/U_T}$$

将式(1-4)所示的电流简化表示代入上式,可得

$$\frac{1}{r_d} = \frac{I_Q}{U_T}$$

在室温下 $U_T = 26 \text{ mV}$,于是当外加正向电压 $> 100 \text{ mV}$ 时,室温下的微变电阻值为

$$r_d = 26/I_Q \quad (1-6)$$

可见, r_d 与工作点电流 I_Q 的值成反比。在计算时 I_Q 以 mA 为单位,则 r_d 单位为 Ω 。

应该指出,式(1-6)只适用于理想的 PN 结,对于实际的二极管,其特性与理想的 PN 结有所不同,这里不再赘述。

3. 参数

器件的参数是说明器件特性的数据,它是根据使用要求提出来的,也是在使用中选择器件的依据。二极管低频运用时的主要参数及其意义如下。

(1) 最大允许整流电流 I_{OM} I_{OM} 是指在电阻性负载的半波整流电路中允许通过二极管的最大直流电流。若工作电流超过此电流,会使二极管过热,导致失效或烧毁。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} U_{RM} 是指允许加到二极管(非稳压管)上的最高反向电压值。该数值应小于反向击穿电压,使用中不应超出 U_{RM} ,以免电路中缺少适当的限流电阻时发生击穿,造成器件损坏。通常取 U_{RM} 为击穿电压的一半。

(3) 最大允许功耗 P_{DM} 流过二极管的电流与二极管两端的电压的乘积是二极管的功率,该功率转换为热能,故称为功耗。如果二极管的实际功率 P_D 超过了最大允许功耗 P_{DM} ,二极管就会因过热而损坏。

1.2.3 晶体二极管电路

1. 二极管的折线化近似

二极管是一个非线性器件,所以二极管电路的精确计算比较烦琐。在工程分析中一般将二极管特性曲线作近似处理,使问题得到简化。在不考虑击穿特性的情况下,二极管特性曲线一般有四种不同程度的近似,由此可得四种不同近似程度的等效电路,如图 1-9 所示。

图 1-9(a)所示为理想二极管情况;图 1-9(b)所示为只考虑了正向电阻的情况;图 1-9(c)所示为只考虑了正、负电阻的情况;图 1-9(d)所示为考虑了正、负电阻和门限电压的情况。