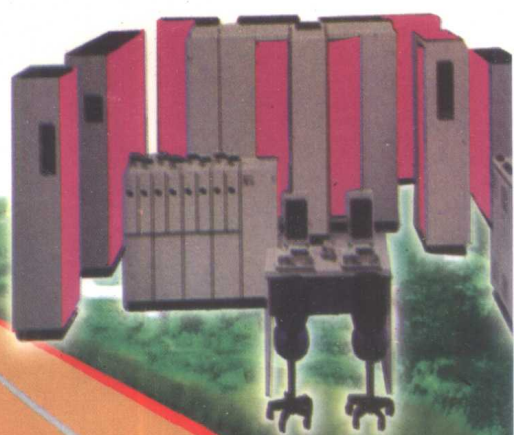


高等学校计算机系列丛书

模拟电子技术基础

聂经奋 主编



重庆大学出版社

模拟电子技术基础

聂经奋 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书为计算机系列教材之一。全书内容包括:半导体和半导体二极管、半导体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级小信号放大器、放大电路中的负反馈、正弦波振荡器、集成运算放大器及其基本运算电路、放大电路的频率特性、功率放大器、振幅调制与检波电路、角度调制与解调电路、直流电源,共十二章。每章末附有习题。

本书可作为三年制计算机专业教材,也可供电大、职大、函大、夜大相关专业作教材。

模拟电子技术基础

聂经奋 主编

责任编辑 曾令维

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆通信学院印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.25 字数:402千

1997年6月第1版 1998年6月第2次印刷

印数:6001-12000

ISBN 7-5624-1357-6/TN·24 定价:18.00元

序

面对知识爆炸,社会学家们几乎都开出了一个相同的药方:计算机。计算机也深孚众望,以其强大的功能,对人类作出了巨大的贡献,取得了叹观止矣的成就。自它1946年2月14日在美国费城诞生以来,至今已过“知天命”的年龄了。现在,计算机已是一个庞大的家庭。如果说,它的成员占据了世界的每一个角落和每一个部门也并不过分,甚至找不到这样一个文明人,他的生活不直接或间接与计算机有关。目前,全世界计算机的总量已达数亿台,而且,现在正以每年几千万台的速度增长。

作为计算机在信息传递方面的应用,计算机加上网络,被认为是和能源、交通同等重要的基础设施。这种设施对信息的传递起着异常重要的作用。西方发达国家和我们国家对此都非常重视。例如,美国的信息高速公路计划,全球通讯的“铍”计划,我国也开始实行一系列“金”字头的国民经济管理信息化计划。这些计划中唱主角的设备便是计算机。计算机在各个方面的应用不胜枚举,我们每个人都自觉不自觉地处于计算机包围中。

计算机对社会生产来说是一个产业大户,对每个现代人来说是一个种工具,对学生们来说,它是一个庞大的知识系统。面对计算机知识的膨胀,面对计算机及其应用产业的膨胀,计算机各个层次的从业人员的需要也在不断膨胀,计算机知识的教育也遍及从小学生到研究生的各个层次。

为了适应计算机教学的需要,重庆大学出版社近几年出版了大量的计算机教学用书,这一套教材就是一套适应专科层次的系列教材。我们将会看到,这一套教材以系列、配套、适用对路,便于教师和学生选用。如果再仔细研究一下,将会发现它的一系列编写特色。:

1. 这些书的作者们是一些长期从事计算机教学和科研的教师,不少作者在以前都有大量计算机方面的著作出版。例如本系列书中的《Visual Fox Pro 中文版教程》的作者,十年前回国后最早将狐狸软件介绍到祖国大陆,这一本书已是他的第八本著作了。坚实的作者基础,是这套书成功的最根本的保证。

2. 计算机科学是发展速度惊人的科学,内容的先进性、新颖性、科学性是衡量计算机图书质量的重要标准,这一套书的作者们在这方面花了极大的功夫,力求让读者既掌握计算机的基础知识,又让读者了解最新的计算机信息。

3. 在内容的深度和知识结构上,从专科学生的培养目标出发,在理论上,从实际出发,满足本课程及后续课程的需要,而不刻意追求理论的深度。在知识结构上,考虑到全书结构的整体优化,而不过分强调单本书的系统性。这样,在学过这一套系列教材后,学生们就可在浩瀚的计算机知识中,建立起清晰的轮廓,就会知道这些知识的前因后果,就会了解这些知识的前接后续。使学生们能在今后的工作实践中得心应手。

4. 计算机是实践性很强的课程,仅靠坐而论道是学习不了这些知识的。所以从课程整体设置来讲,包括有最基本的操作技能的教材。对单本书来说,在技术基础课和专业课中,都安排有一定的上机实习或实验,这样可使学生既具备一定的理论知识以利今后发展和深造,又掌握实际的工作技能胜任今后的实际工作。

编写一套系列教材,这是一个巨大的工程。这一套书的作者们,重庆大学出版社的领导和编辑们,都为此付出了辛勤的劳动。作为计算机工作者,以此序赞赏他们的耕耘,弘扬他们的成绩。

周明光

1997年6月15日

前 言

本书系计算机系列教材之一,主要读者对象是高等院校三年制计算机专业学生,学时约60左右。

我们在编写过程中注意了教材的可读性、针对性、实用性和系统性,尽力突出问题的物理实质,避免繁琐的数学推导。

本教材沿用了先模拟后数字的体系,可将教材的前三章移至数字电路中,亦可先讲数字电路,后讲模拟电路。

本书由聂经奋主编,其中第一、第二、第三、第四章由方全忠编写,第七、第十二章由梁晓波编写,第五、第六、第八、第九、第十、第十一章由聂经奋编写,全书由聂经奋统稿。

由于水平所限,时间仓促,谬误之处在所难免,望读者批评指正。

编者

1997年4月

目 录

第一章 半导体和半导体二极管	(1)
§ 1-1 半导体基础知识	(1)
§ 1-2 PN 结及其特性	(3)
§ 1-3 半导体二极管的特性和参数	(5)
§ 1-4 特殊二极管	(7)
习题	(9)
第二章 半导体三极管及其基本放大电路	(12)
§ 2-1 半导体三极管的基本结构和放大作用	(12)
§ 2-2 半导体三极管的伏安特性和主要参数	(16)
§ 2-3 放大电路的分类和电量符号的约定	(19)
§ 2-4 放大电路的基本概念	(22)
§ 2-5 放大电路的基本分析方法	(23)
§ 2-6 共射组态基本放大电路	(27)
§ 2-7 放大电路静态工作点的稳定	(29)
§ 2-8 共集电极电路	(30)
§ 2-9 共基极电路	(32)
习题	(33)
第三章 场效应管及其基本放大电路	(41)
§ 3-1 结型场效应管	(41)
§ 3-2 绝缘栅场效应管	(46)
§ 3-3 场效应晶体管与半导体三极管的比较	(49)
§ 3-4 场效应管基本放大电路	(50)
习题	(54)
第四章 多级小信号放大器	(58)
§ 4-1 多级放大器的特殊问题	(58)
§ 4-2 耦合方式	(58)
§ 4-3 组态的选择	(61)
§ 4-4 增益的计算	(61)
§ 4-5 静态工作点的考虑	(63)
习题	(64)
第五章 放大电路中的负反馈	(67)
§ 5-1 概述	(67)
§ 5-2 负反馈放大器的一般关系式及其基本类型	(68)
§ 5-3 负反馈对放大器性能的影响	(72)
§ 5-4 负反馈放大器的定量分析	(75)
§ 5-5 负反馈放大器稳定性的初步讨论	(85)
习题	(88)

第六章 正弦波振荡器	(90)
§ 6-1 正弦振荡的条件	(90)
§ 6-2 LC 正弦波振荡器	(92)
§ 6-3 RC 正弦波振荡器	(99)
§ 6-4 石英晶体振荡器	(103)
习题	(106)
第七章 集成运算放大器及其基本运算电路	(109)
§ 7-1 直接耦合放大器和模拟集成电路	(109)
§ 7-2 差动式放大电路的组成和特性	(112)
§ 7-3 集成运放的特点和主要指标	(119)
§ 7-4 集成运放的基本组成	(120)
§ 7-5 集成运放在信号运算方面的应用	(128)
§ 7-6 集成运放在信号处理方面的应用	(144)
习题	(149)
第八章 放大电路的频率特性	(155)
§ 8-1 频率特性的基本概念	(155)
§ 8-2 共射基本放大电路的高频特性与上限频率	(162)
§ 8-3 单级共射放大电路的低频特性与下限频率	(170)
§ 8-4 多级放大电路的频率响应	(172)
习题	(173)
第九章 功率放大器	(175)
§ 9-1 概述	(175)
§ 9-2 单管甲类功率放大器	(176)
§ 9-3 变压器耦合乙类推挽功率放大器	(178)
§ 9-4 无输出变压器乙类推挽功率放大电路	(182)
§ 9-5 丙类谐振功率放大器	(184)
习题	(190)
第十章 振幅调制与检波电路	(192)
§ 10-1 概述	(192)
§ 10-2 调幅波的基本特性	(194)
§ 10-3 振幅调制电路	(198)
§ 10-4 检波电路	(200)
习题	(203)
第十一章 角度调制与解调电路	(205)
§ 11-1 角度调制波的基本特性	(205)
§ 11-2 直接调频电路	(207)
§ 11-3 间接调频电路	(208)
§ 11-4 调频波的解调——鉴频电路	(210)
习题	(212)
第十二章 直流电源	(214)
§ 12-1 直流电源的基本组成	(214)
§ 12-2 单相整流电路	(214)

§ 12-3 滤波电路	(219)
§ 12-4 串联反馈式直流稳压电源	(224)
§ 12-5 开关电源	(226)
§ 12-6 集成三端稳压器	(228)
§ 12-7 晶闸管	(231)
§ 12-8 可控整流电路	(235)
习题	(242)
参考文献	(247)

第一章 半导体和半导体二极管

§ 1-1 半导体基础知识

一、本征半导体

大家知道,铜、铝、铁等金属材料是很容易导电的,这类物质叫做导体;而塑料、陶瓷、橡皮、玻璃等很不容易导电,称这类物质为绝缘体。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体,如硅(Si)×锗(Ge)等。硅和锗都是4价元素,原子最外层有4个价电子,为了突出价电子的作用和画图的方便,用图1.1简化模型表示硅和锗。

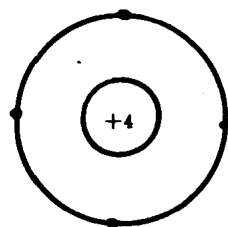


图 1.1 硅和锗原子结构简化模型

完全纯净的半导体叫做本征半导体。

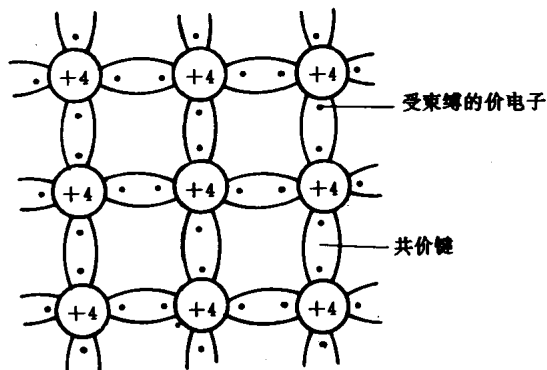


图 1.2 硅晶体的共价键结构

硅、锗制成本征半导体时,其原子的排列就由无序状态排列成很有规律的空间点阵,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1.2所示。共价键中的价电子受两个原子核的约束,如果没有足够的能量就无法挣脱共价键的制约。因此,在绝对温度零度(-273°C)且无外界激发时,本征半导体中无自由电子,和绝缘体一样不导电。在常温下,由于热运动,将有少数价电子获得足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子。值得注意的是,

价电子挣脱共价键成为自由电子后,在共价键中就留下一个空位,在外电场或其它能源作用下,邻近的价电子就会填补到这个空位上,这个价电子原来的位置又留下新的空位,然后,其它价电子又会移到这个新的空位上,如此下去,形成价电子的运动。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。空位子叫做“空穴”。由此可见,空穴也是一种载流子。

当在半导体上加电压时,通过半导体的电流由两部分组成:一部分是自由电子定向运动形成的电子电流;另一部分是价电子递补空穴所形成的空穴电流,其方向与电子电流相同。这是半导体的一个重要特征。

由于物质总是在不停地运动着,这就使本征半导体里因热运动而不断产生自由电子,同时

也出现相应数量的空穴。因此,自由电子和空穴总是相伴而生、成对出现的,称之为电子-空穴对。另一方面,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,产生与复合的过程虽然仍在不断地进行,但电子-空穴对却维持一定的数目。

二、杂质半导体

本征半导体中,载流子的数目有限,导电能力较差,所以其本身的用处不大。然而,如果在本征半导体中掺入微量的杂质,其导电性能就会发生显著改变。因此半导体获得了极为重要的用途。

1. N型半导体

在本征硅(或锗)中掺入少量的5价元素磷P(或砷As),则硅晶体中某些位置的硅原子被磷原子代替,如图1.3所示。磷原子有5个价电子,与邻近的4个硅原子形成共价键后,还多余一个价电子,它不受共价键的束缚,只需少量的能量就可挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子。在室温下,几乎所有多余电子都能成为自由电子。

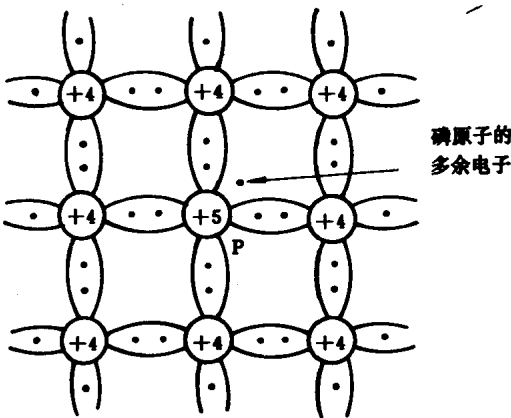


图 1.3 N型半导体结构

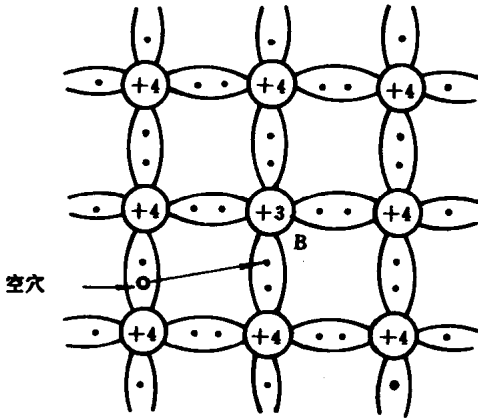


图 1.4 P型半导体结构

上述杂质半导体,除了杂质给出自由电子外(注意杂质给出自由电子的同时,并不产生新的空穴),原晶体本身也产生少量的电子-空穴对。故这种杂质半导体中自由电子是多数载流子,简称“多子”,空穴是少数载流子,简称“少子”。通常这种杂质半导体叫做N型半导体或电子半导体。

2. P型半导体

在本征硅(或锗)中掺入少量的3价元素硼B,如图1.4所示。由于硼原子只有3个价电子,与邻近的4个硅原子组成共价键时,缺少一个电子而产生一个空穴。这样每个杂质原子都会提供一个空穴,从而使空穴载流子的数目大大增加成为多子,自由电子因浓度降低而成为少子,称这种杂质半导体为P型半导体或空穴半导体。

§ 1-2 PN 结及其特性

通过掺杂使一块本征半导体的一侧形成 P 型半导体,另一侧形成 N 型半导体,则在两种半导体的交界面附近形成一个具有特殊性质的薄层,叫做 PN 结,如图 1.5 所示。

一、开路 PN 结

P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时,在交界面的地方必然发生由于电子与空穴的浓度不均匀分布而引起的载流子从浓度高的区域向浓度低的区域扩散的现象。扩散到 N 区的空穴与电子复合,扩散到 P 区的电子与空穴复合,在交界面附近,出现了不能移动的带正离子组成的空间电荷区。P 型侧为负离子区(用“-”表示),N 型侧为正离子区(用“+”表示),它们形成了一个由 N 区指向 P 区的电场(内电场)。内电场对多子的扩散不利,却有利于少子向对方区域运动。载流子在电场作用下的定向运动叫做漂移运动。从 N 区漂移到 P 区的空穴,填补了 P 区失去的空穴;从 P 区漂移到 N 区的电子,填补了 N 区失去的电子,从而使空间电荷减少,内电场削弱,又有利于扩散而不利漂移。

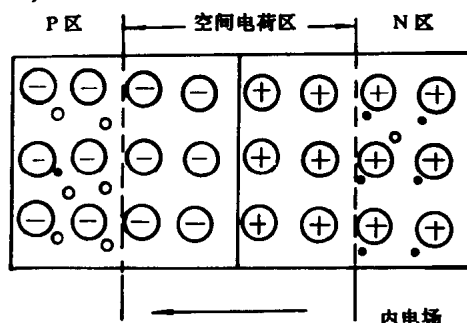


图 1.5 无外加电压的 PN 结

由此可见,扩散与漂移既相互联系,又相互矛盾。扩散使空间电荷区加宽,内电场增强,反过来对扩散阻力加大,使漂移容易进行;而漂移又使空间电荷区变窄,内电场削弱,这又使扩散容易而阻碍漂移。开始时,扩散占优势,随着扩散进行,空间电荷区加宽,内电场增强,于是漂移也不断增强,当漂移运动与扩散运动达到相等时,便处于动态平衡状态。此时,两边虽然仍有载流子的往返,但扩散多少,又漂移多少,PN 结中的电流为零,空间电荷不再增加而处于相对稳定状态。

二、PN 结的单向导电性

1. 外加正向电压

PN 结外加正向电压,即 P 区接电源正极,N 区接电源负极,如图 1.6 所示,这种接法叫做正向偏置。此时内电场因与外电场方向相反而受到削弱,空间电荷减少,这有利于多子的扩散而不利少子的漂移。多子的扩散通过外电路形成正向电流 I_F 。因此,加上不大的正向电压就可产生相当大的电流。为避免烧坏 PN 结,应在回路中串入限流电阻。

2. 外加反向电压

PN 结外加反向电压,就是 P 区接电源负极,N 区接电源正极,如图 1.7 所示,这种接法叫做反向偏置。此时外电场使空间电荷增加而加强内电场,阻碍扩散而有利于漂移。少子的漂移形成反向电流 I_R 。由于少数子数量有限,因而反向电流很小,并且基本上不随外加电压变化,故反向电流又叫做反向饱和电流 I_S 。由此可见,PN 结正向偏置时,形成较大的正向电流;PN 结反向偏置时,形成较小的反向电流,这就是 PN 结的单向导电性。

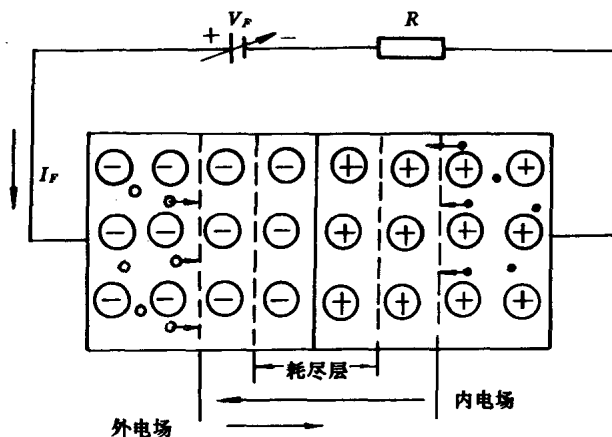


图 1.6 外加正向电压时的 PN 结

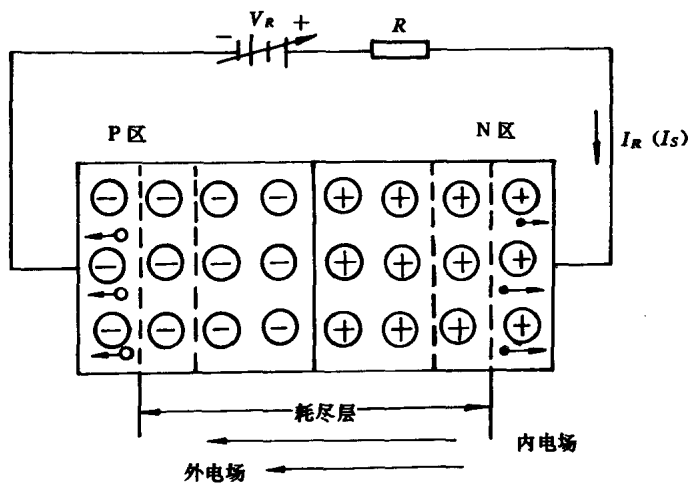


图 1.7 外加反向电压时的 PN 结

三、PN 结的结电容

PN 结具有电容效应,按形成的原因不同分为势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 。

1. 势垒电容 C_b

PN 结的空间电荷随外加电压变化而变化的电容效应,叫做势垒电容,记为 C_b 。当外加电压增加时,P 区的空穴和 N 区的电子扩散到对方区域而中和一部分带电粒子,就像一部分电子和空穴“存入”PN 结,相当于势垒电容充电;外加电压减小时,又有一部分电子和空穴离开 PN 结,好似一部分电子和空穴从 PN 结中“取出”,相当于势垒电容放电。当外加电压不变时,空间电荷量也保持不变,势垒电容无充放电现象。因此,势垒电容只有在外加电压变化时才起作用,外加电压越高,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消失, 而是在一定路程内一边扩散, 一边复合消失。于是 P 区存入大量的电子, N 区存入大量的空穴。存入电荷的多少随外加电压变化, 也是一种电容效应, 用扩散电容 C_d 来描述。

PN 结的等效电路如图 1.8 所示, 其中结电容 C_j 为势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 之和。

PN 结正向偏置时, 扩散电容较大; 反向偏置时, 以势垒电容为主。两者一般为几至几百皮法。

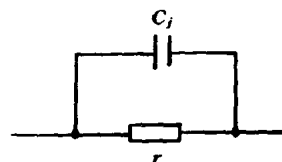


图 1.8 PN 结等效电路

§ 1-3 半导体二极管的特性和参数

一、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 1.9 示出了二极管的结构图和符号。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。

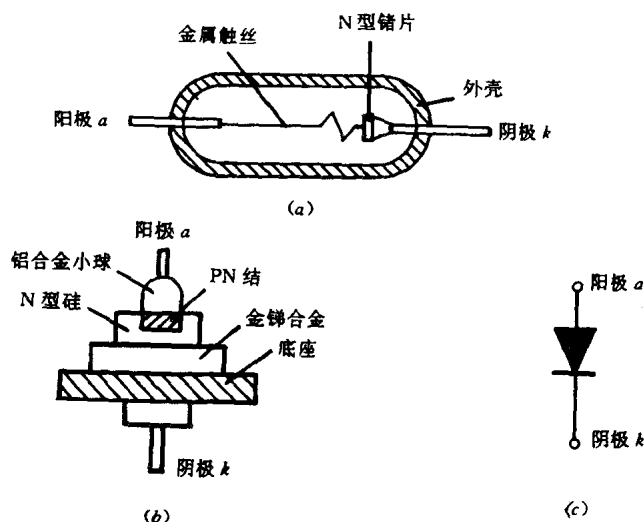


图 1.9 半导体二极管的结构和符号

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 符号

点接触型二极管 PN 结结构面积小, 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, 适用于小电流整流和高频检波, 也适用于开关电路。

面接触型二极管如图 1.9(b), 其 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。

二、二极管的伏安特性

二极管的伏安特性曲线如图 1.10 所示, 它是二极管两端电压 V 和通过管子的电流 I 之间的关系曲线。

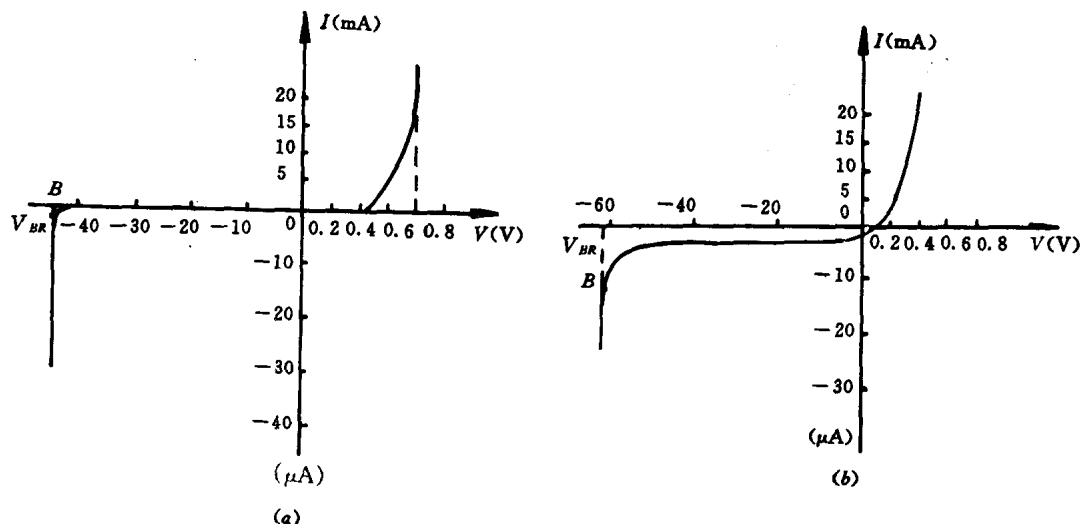


图 1.10 二极管的伏安特性曲线
(a) 硅二极管的特性曲线; (b) 锗二极管的特性曲线

1. 正向特性

当正向电压小于某一数值 V_{th} 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 0, 二极管呈现较大的电阻, 这个区域叫做死区, V_{th} 叫做阈值电压 (门坎电压或死区电压)。硅管 V_{th} 约为 0.5V, 锗管 V_{th} 约为 0.1V。当正向电压超过 V_{th} 后, 内电场大大削弱, 有利于多子的扩散, 正向电阻较小, 正向电流基本上按指数规律增长, 二极管处于导通状态。硅管的导通电压降约为 0.6 ~ 0.8V, 锗管的导通电压降约为 0.2 ~ 0.3V。

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, 由于少数数量有限, 形成很小的反向饱和电流 I_S 。小功率硅管 I_S 为 nA 数量级, 锗管为 μA 数量级。可见, 二极管具有单向导电性。

3. 反向击穿特性

反向电压在一定范围内时, 反向电流基本不随反向电压变化而变化, 但当反向电压的绝对值增加到 V_{BR} 时, 反向电流将突然剧增, 这种现象叫反向击穿。 V_{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, 发生电击穿时, 只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率, 一旦反向电压降低后, 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。电击穿往往为人们所利用(如稳压管),而热击穿必须避免。

4. 二极管方程

理论分析指出,半导体二极管电流与端电压的关系可表示为

$$I = I_S(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$$

式中 I_S 为反向饱和电流, $V_T = kT/q$ 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, $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

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

5. 温度对二极管特性的影响

二极管的特性对温度很敏感。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 ,反向电流约增大一倍。

三、二极管的主要参数

二极管有以下一些主要参数:

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。实际使用时的工作电流应小于 I_F ,如果超过此值,将引起 PN 结过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 V_{RM}

V_{RM} 为二极管工作时其两端允许加的最大反向电压。为安全起见,一般取 $V_{RM} = V_{BR}/2$ 。

3. 反向电流 I_R

I_R 是指二极管未被反向击穿时的反向电流值。此值越小,二极管的单向导电性越好。

4. 最高工作额 f_M

由于结电容的存在,限制了二极管的工作频率。如果信号频率超过管子的 f_M ,则结电容的容抗变小,高频电流将直接从结电容通过,管子的单向导电性变差。

§ 1-4 特殊二极管

除了普通二极管外,还有专供特殊用途的二极管,如稳压管、变容二极管、光电二极管、发光二极管等,简单介绍如下。

一、稳压管

稳压管是一种用特殊工艺制造成的面接触型二极管。电路符号及伏安特性如图 1.11 所示。正向特性曲线与普通二极管相似,反向击穿特性则比普通二极管陡,通常工作在反向击穿区。当外加反向电压小于击穿电压 V_Z (为稳压管的稳定电压),反向电流很小,当反向电压增加到 V_Z 后,反向电流将急剧增加,管子已处于反向击穿状态。只要在电路中串入适当的限流电阻 R ,就不会导致热击穿。即利用该区内电流在很大范围内变化,而管子两端的电压却变化很

小的特性达到稳压的目的。

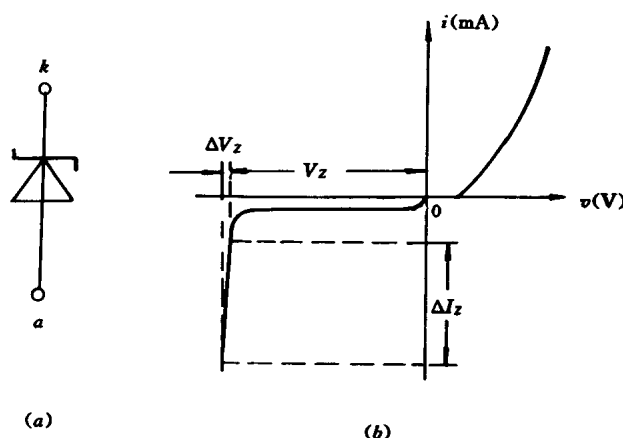


图 1.11 稳压二极管的符号和特性
(a) 符号; (b) 伏安特性曲线

稳压管的主要参数:

1. 稳定电压 V_Z

指稳压管中的电流为最小稳定值时, 稳压管两端的电压值。由于制造工艺上的原因, 即便是同一型号的管子稳定电压也不完全相同, V_Z 的分散性较大。

2. 稳定电流 I_Z

稳定电流是稳压管正常工作时的最小工作电流值。工作电流低于此值时, 稳压效果变差。高于此值, 只要不超过额定功耗, 均可正常工作, 而且电流愈大, 稳压效果愈好。

3. 动态电阻 r_Z

稳压管两端电压变化量 ΔV_Z 与相应的电流变化量 ΔI_Z 之比叫做动态电阻, 即 $r_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$, 其值越小, 稳压效果越好。 r_Z 的数值一般为几欧 ~ 几十欧。

4. 额定功耗 P_Z

P_Z 为稳定电压 V_Z 和最大稳定电流 I_{ZM} 的乘积, 即 $P_Z = V_Z \cdot I_{ZM}$ 。是由稳压管允许温升所决定的参数, 工作时的耗散功率若超过此值, 稳压管将出现热击穿而被烧坏。

5. 稳定电压的温度系数

温度系数为温度每升高 1°C 稳定电压的相对变化量, 它表明 V_Z 受温度影响的程度。通常 V_Z 高于 7V 的稳压管具有正温度系数(温度升高, V_Z 增加); V_Z 低于 4V 时, 具有负的温度系数(温度升高, V_Z 减小); V_Z 在 $4 \sim 7\text{V}$ 之间时, 温度系数很小。

二、变容二极管

前面谈到势垒电容的大小随外加电压

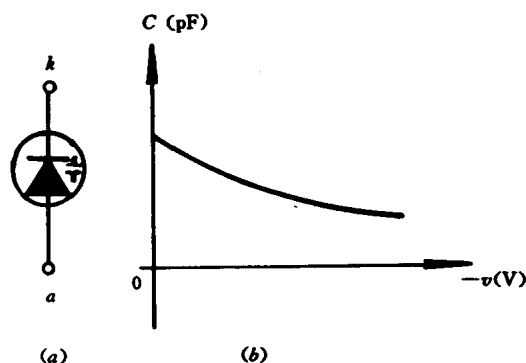


图 1.12 变容二极管
(a) 符号; (b) $C-v$ 曲线