

高等学校教学参考书

电子电路基础 及通信电子电路 学习指导书

刘宝玲 主编

刘宝玲 胡春静 郭琳 王莹 孙文生
刘培植 张晓莹 邓钢 崔琪楣 李立华

编



高等教育出版社

高等学校教学参考书

电子电路基础 及通信电子电路 学习指导书

刘宝玲 主编

刘宝玲 胡春静 郭琳 王莹 孙文生
刘培植 张晓莹 邓钢 崔琪楣 李立华 编



高等教育出版社

内容简介

本书是由北京邮电大学信息与通信工程学院、电子工程学院相关课程教学组教师共同编写,与刘宝玲主编、高等教育出版社出版的《电子电路基础》和《通信电子电路》配套的学习指导书。书中包括各章的教学要求和学生必须掌握的基本知识点,以及对各章内容的难点问题分析、典型例题解析,并对教材各章后全部的习题给出了解答。

本书对主教材中各章的重点、难点作了较深刻的分析,并对典型例题作了详细的解答。本书是电子信息类本科学生的辅导和自学读物,也是任课教师的参考手册,同时也可以作为各类工程技术人员和自学者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路基础及通信电子电路学习指导书/刘宝玲主编.

—北京:高等教育出版社,2009.6

ISBN 978-7-04-026637-5

I. 电… II. 刘… III. ①电子电路-高等学校-教学参考资料②通信系统-电子电路-高等学校-教学参考资料 IV. TN710 TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第067925号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 唐笑慧 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 王莹 责任校对 王效珍 责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司

印刷 北京丰源印刷厂

开本 787×1092 1/16

印张 28

字数 680 000

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2009年6月第1版

印次 2009年6月第1次印刷

定价 32.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26637-00

前 言

“电子电路基础”、“通信电子电路”是电子信息类专业的主要技术基础课程，其内容具有电路类型多、器件工作状态复杂、电路分析方法灵活、新概念和新内容多等特点，学生普遍感到入门比较困难。为了帮助学生更好地掌握上述课程所涉及的基本概念、基本工作原理、典型电路和基本分析方法，提高学生分析问题和解决问题的能力，特编写本书。本书是本科生学习上述课程的辅导教材，可与刘宝玲主编、高等教育出版社出版的《电子电路基础》、《通信电子电路》教材配套使用，也可以作为有志报考硕士研究生的学生的复习参考资料。

全书分“电子电路基础”、“通信电子电路”两部分。按照教学内容划分，“电子电路基础”部分包括半导体基础知识及二极管电路、双极型晶体管及其放大电路、场效应晶体管及其放大电路、放大电路的频率特性、反馈放大电路、模拟集成电路及其应用、脉冲信号的产生与处理电路七章内容；“通信电子电路”部分包括噪声与干扰、高频放大电路、正弦波振荡电路、调制解调与变频电路、反馈控制电路五章内容。本书每章均由教学要求、基本知识点、例题解析和习题解答四部分组成。

本书的教学要求指明了每章的基本学习要求和学习重点；基本知识点将教材中每章的基本概念、基本电路、基本分析方法等知识点，用最精练的语言作了总结和归纳，与主教材既有联系，又保持了一定的独立性；例题解析就学生经常遇到的若干问题进行讨论，通过对典型例题的分析计算，着重讲清物理概念、解题思路、解题步骤以及分析方法；习题解答给出了主教材各章全部的习题参考答案，利于读者自测，同时为便于读者查阅对照，习题号与主教材一致。

本书由刘宝玲担任主编，并与胡春静、郭琳、王莹、孙文生、刘培植、张晓莹、邓钢、崔琪楣、李立华等教师共同编写完成。

限于编者水平，书中错误和不足之处在所难免，敬请使用本教材的师生及其他读者批评指正。

编者

2009年1月

于北京邮电大学

目 录

第一篇 电子电路基础部分

第一章 半导体基础知识及二极管电路	3
1.1 教学要求	3
1.2 基本知识点	3
1.2.1 半导体的基本特性	3
1.2.2 半导体二极管的工作原理及特性	4
1.2.3 半导体二极管电路	8
1.3 例题解析	11
1.4 习题解答	13
第二章 双极型晶体管及其放大电路	22
2.1 教学要求	22
2.2 基本知识点	22
2.2.1 双极型晶体管	22
2.2.2 放大电路基本知识	25
2.2.3 基本共射放大电路的工作原理及分析方法	25
2.2.4 放大电路的静态工作点稳定问题	27
2.2.5 晶体管单管放大电路的三种基本组态	28
2.2.6 电流源电路及其应用	28
2.2.7 差分放大电路	29
2.2.8 功率放大电路	31
2.2.9 多级放大电路	32
2.3 问题讨论	33
2.4 例题解析	34
2.5 习题解答	44
第三章 场效应晶体管及其放大电路	84
3.1 教学要求	84
3.2 基本知识点	84
3.2.1 场效应管的原理结构	84
3.2.2 场效应管的特性曲线	85
3.2.3 场效应管电流电压关系式	86
3.2.4 沟道长度调制效应和衬底调制效应	88
3.2.5 场效应管的模型	88
3.2.6 场效应管与双极型晶体管的比较	89
3.2.7 场效应管放大电路	91
3.3 例题解析	99
3.4 习题解答	104
第四章 放大电路的频率特性	125
4.1 教学要求	125
4.2 基本知识点	125
4.2.1 频率特性的分析方法	125
4.2.2 晶体管的频率特性	129
4.2.3 双极型晶体管放大电路的频率特性	130
4.2.4 场效应管放大电路的频率特性	134
4.3 例题解析	134
4.4 习题解答	140
第五章 反馈放大电路	172
5.1 教学要求	172
5.2 基本知识点	172
5.2.1 反馈的基本概念	172
5.2.2 反馈的分类	173
5.2.3 反馈类型与极性的判别	173
5.2.4 负反馈对放大电路性能的影响	174
5.2.5 基本放大电路引入负反馈的原则	176

5.2.6 负反馈放大电路的分析方法	176	6.2.9 电压比较器	228
5.2.7 负反馈放大电路的稳定性分析	177	6.2.10 运算放大器的线性应用和非线性应用	231
5.3 例题解析	179	6.3 例题解析	232
5.4 习题解答	192	6.4 习题解答	237
第六章 模拟集成电路及其应用	211	第七章 脉冲信号的产生与处理	267
6.1 教学要求	211	7.1 教学要求	267
6.2 基本知识点	211	7.2 基本知识点	267
6.2.1 简介	211	7.2.1 波形的基础知识	267
6.2.2 集成运算放大器的组成及基本特性	212	7.2.2 半导体器件的开关特性	267
6.2.3 集成运算放大器的主要参数	214	7.2.3 门电路	268
6.2.4 集成运算放大器的同相和反相放大电路	216	7.2.4 单稳态触发器	269
6.2.5 集成运算放大器的模拟运算电路	218	7.2.5 施密特触发器	269
6.2.6 集成运算放大器参数对运算误差的影响	219	7.2.6 多谐振荡器	270
* 6.2.7 模拟乘法器及其应用	221	7.2.7 三角波发生器与锯齿波发生器	270
* 6.2.8 有源滤波器	224	7.2.8 555 定时器及其主要应用	271
		7.3 例题解析	272
		7.4 习题解答	277
第二篇 通信电子电路部分			
第一章 噪声与干扰	303	2.2.5 倍频电路	329
1.1 教学要求	303	2.2.6 宽带高频功率放大电路和功率合成技术	329
1.2 基本知识点	303	2.3 例题解析	333
1.2.1 噪声的来源和特点	303	2.4 习题解答	339
1.2.2 等效噪声频带宽度	305	第三章 正弦波振荡电路	350
1.2.3 噪声系数与噪声温度	307	3.1 教学要求	350
1.2.4 噪声系数与灵敏度	309	3.2 基本知识点	350
1.3 例题解析	309	3.2.1 反馈式正弦波振荡电路的工作原理	350
1.4 习题解答	314	3.2.2 反馈式正弦波振荡电路的线性频域分析方法	352
第二章 高频放大电路	318	3.2.3 LC 正弦波振荡电路	353
2.1 教学要求	318	3.2.4 改进型三端电容振荡电路	358
2.2 基本知识点	318	3.2.5 RC 正弦波振荡电路	359
2.2.1 高频电路中的元器件	318	3.2.6 石英晶体振荡电路	361
2.2.2 谐振回路的基本特性	319		
2.2.3 小信号谐振放大电路	321		
2.2.4 谐振功率放大电路	324		

3.2.7 压控振荡器	364	4.3 例题解析	409
3.2.8 负阻正弦波振荡电路	365	4.4 习题解答	413
3.2.9 振荡器中的几种现象	365	第五章 反馈控制电路	422
3.3 例题解析	365	5.1 教学要求	422
3.4 习题解答	369	5.2 基本知识点	422
第四章 调制、解调与变频电路	378	5.2.1 自动增益控制电路	422
4.1 教学要求	378	5.2.2 自动频率控制电路	423
4.2 基本知识点	378	5.2.3 自动相位控制电路 (锁相环路)	424
4.2.1 振幅调制与解调	378	5.2.4 频率合成器	427
4.2.2 角度调制与解调	386	5.3 例题解析	428
4.2.3 数字调制与解调	403	5.4 习题解答	432
4.2.4 变频原理与电路	405		
参考文献			437

第一篇

电子电路基础部分

第一章 半导体基础知识及二极管电路

半导体器件是指采用半导体材料制成的电子器件,它是组成电子电路的核心器件。在简要了解半导体基础知识之后,应重点掌握器件的外特性,熟悉二极管的各种等效电路模型,才能分析和设计电子电路。

1.1 教学要求

1. 了解半导体的基本特性
2. 掌握二极管的工作原理及特性
3. 熟悉并掌握二极管的等效电路模型、各种基本应用模拟电路的计算方法

1.2 基本知识点

1.2.1 半导体的基本特性

一、本征半导体

纯净的、不含杂质的晶体半导体,称为本征半导体。

半导体硅和锗是常用的半导体材料,均属四价元素,原子序数分别为 14 和 32,它们晶体中的原子排列成整齐的点阵,每个原子最外层均有 4 个价电子,与相邻 4 个原子的价电子组成共价键结构。

在本征半导体中,本征激发使共价键中的价电子获得能量并摆脱共价键的束缚成为自由电子,在共价键中留下的空位置称为空穴。热、光、电磁辐射等均可产生本征激发,但热激发是半导体材料中产生本征激发的主要因素。

运载电荷的离子称为载流子,自由电子和空穴都是载流子,它们总是成对出现的。自由电子带负电荷,空穴带正电荷。在外加电场作用下,它们会产生方向相反的定向移动形成电流。

自由电子在运动中又可能会与空穴相遇而填补空穴,使二者同时消失,释放出能量,称为复合。

常温下,自由电子和空穴这两种载流子的浓度比较低,电阻率大,导电能力较差,并且不易控制。温度越高,电子空穴对的浓度越大;当环境温度一定时,电子空穴对的激发与复合达到动平衡,浓度一定。

二、掺杂半导体

采用一定的扩散工艺在本征半导体中掺入微量元素杂质后,可以大大改善半导体的导电性能。

在本征半导体中,掺入少量的五价元素,就形成了 N 型半导体。其中,自由电子是多数载流

子(多子),空穴是少数载流子(少子),还有不能移动、固定在原子晶格上、不参与导电的正离子(不属于载流子)。

在本征半导体中掺入少量的三价元素,可以形成P型半导体。其中,空穴是多子,自由电子是少子,还有不能移动、不参与导电的负离子。

杂质半导体的导电性能主要由多子决定。多子主要由掺杂产生,控制掺入杂质浓度的多少即可有效地改变其导电性,从而控制掺杂半导体的导电性能。由于杂质浓度很大并且基本不受温度影响,因此杂质半导体的导电性能比较好。杂质半导体中的少子由本征激发产生,其浓度主要取决于温度,随着温度的升高而增加,导致杂质半导体的导电性能受温度的影响比较大。

在上述两种杂质半导体中,整体上电量平衡,半导体对外呈现电中性。

当半导体处于平衡状态时,即当半导体不受外加电场或高能辐射等因素的影响时,其中的自由电子浓度 n_0 和空穴浓度 p_0 (均称为平衡载流子浓度)满足以下关系式

$$p_0 n_0 = n_i^2 \quad (1.2.1)$$

式中, n_i 为该温度下本征载流子的浓度。

在电场作用下,半导体中的载流子会产生漂移运动;当半导体中载流子的浓度不均匀时,载流子会从高浓度区域向低浓度区域产生扩散运动。漂移和扩散都使载流子产生定向运动,从而在半导体中产生电流。由载流子的漂移运动所形成的电流称为漂移电流,它与电场强度成正比,比例系数为载流子的迁移率 μ ;由载流子的扩散运动所形成的电流称为扩散电流,它与浓度梯度成正比,比例系数为载流子的扩散系数 D 。

综上所述,半导体中存在自由电子和空穴两种载流子;载流子具有两种基本运动形式:漂移运动与扩散运动;掺杂会形成两种杂质半导体:P型半导体和N型半导体;半导体的导电性能具有两个重要特性:温度特性与掺杂特性,即温度越高、掺杂浓度越大,半导体的导电能力就越强。

1.2.2 半导体二极管的工作原理及特性

一、PN结及其单向导电性

把P型半导体和N型半导体结合在一起,由于交界面两侧载流子浓度不同,多子互相扩散,在P区和N区的交界面就留下了一个没有多子而只有正离子或负离子的区域;并且,这个正、负离子区使交界面两侧存在电位差,即势垒,它会形成内建电场。内建电场的存在,会有利于少子的定向漂移运动,同时阻挡多子的扩散运动。当这两种运动达到动态平衡时,就形成了PN结,又称空间电荷区、耗尽层、阻挡层。

PN结是构成各种半导体器件的基础单元,其主要特性是单向导电性。

PN结在正向偏置(P接外电压电位高的一端、N接外电压电位低的一端)时,外加电压削弱了内建电场,有利于多子扩散,不利于少子漂移,产生很大的正向扩散电流。此时PN结变薄,势垒降低,呈现很小的结电阻,处于导通状态,正向电流随外加电压增加按指数规律迅速增大。PN结反偏(P接负、N接正)时,外加电压增强了内建电场,有利于少子漂移,不利于多子扩散,产生很小的反向漂移电流。此时PN结变厚,势垒升高,呈现很大的结电阻,PN结处于截止状态。反向电流主要受温度影响,与外加电压基本无关,故又称反向饱和电流。

二、半导体二极管的伏安特性

把PN结封装并引出电极后就构成半导体二极管,又称二极管,按照其结构特点可分为点接

触型、面接触型和平面型三大类。

1. 二极管的电流方程

二极管的伏安特性,可以用下列理想的数学模型方程式表示,即

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (1.2.2)$$

式中, v_D 为二极管两端所加的电压; i_D 为二极管中流过的电流; I_S 为二极管的反向饱和电流,其值主要受温度影响; V_T 为温度的电压当量,当 $T = 300 \text{ K}$ 时, $V_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

当正向偏置时,二极管处于导通状态,如果外加电压 $v_D \gg V_T$, $i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$, 此时, i_D 随 v_D 的增加按指数规律迅速增大。

当反向偏置时,二极管处于截止状态,如果外加电压 $|v_D| \gg V_T$, $i_D \approx -I_S$, 此时,反向电流很小,几乎为零。

上述二极管的电流方程,是理想二极管的伏安特性表达式,与实际情况存在一定误差。

2. 二极管的伏安特性

实际测量的二极管伏安特性曲线如图 1.2.1 所示。

(1) 正向工作区

当二极管加正向偏置电压, $v_D < V_{th}$ 时,正向电流几乎为零,二极管呈现较大的电阻。当 $v_D > V_{th}$ 时,正向电流随正向偏置电压的增大而迅速增大,正向电阻很小,PN 结处于导通状态。

工程上定义一个电压值 V_{th} ,称为阈值电压(或死区电压),当外加电压 $v_D < V_{th}$ 时,PN 结截止;当外加电压 $v_D > V_{th}$ 时,PN 结导通。室温下,硅管的 $V_{th} \approx 0.6 \sim 0.7 \text{ V}$, 锗管的 $V_{th} \approx 0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

(2) 反向工作区

当二极管所加的反向偏置电压小于 $V_{(BR)}$ 时,反向电流基本不变,它的数值很小,常温下,锗管约为几十微安,硅管则小于 $0.1 \mu\text{A}$ 。此时,反向电阻很大,PN 结处于截止状态。

(3) 反向击穿区

当反向电压增大到一定值 ($V_{(BR)}$) 时,反向电流突然急剧加大,二极管失去单向导电性,PN 结反向击穿。

三、半导体二极管的反向击穿特性、温度特性和电容效应

1. 二极管的反向击穿特性

二极管发生击穿时,反向电流会急剧增大。根据反向击穿形成的机理,分为雪崩击穿和齐纳击穿两类。

(1) 雪崩击穿

它发生在掺杂浓度较低、空间电荷区宽、外加电压比较大(一般 $V_{(BR)}$ 大于 6 V) 的情况下。较高的反向电压,使少子获得足够的动能,漂移速率加快,把空间电荷区中的价电子碰撞出来,产生新的电子-空穴对(碰撞电离)。由于阻挡层较宽,这些新产生的载流子又会被加速撞击其他的原子,连锁反应,使反向电流急剧增加,造成雪崩击穿。雪崩击穿电压具有

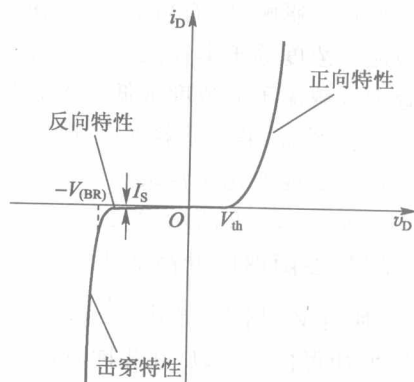


图 1.2.1 二极管的伏安特性曲线

正温度系数。

(2) 齐纳击穿

它发生在掺杂浓度较高、空间电荷区窄、外加电压比较低(一般 $V_{(BR)}$ 小于 6 V)的情况下。由于空间电荷区宽度较窄,不大的反向电压就会形成很强的电场,将空间电荷区内的价电子从共价键中拉出来,产生电子-空穴对(场致激发)。从而使载流子突然增多,引起反向电流急剧增加,造成齐纳击穿。齐纳击穿电压具有负温度系数。

当击穿电压在 6 V 左右时,两种击穿会同时发生,相应击穿电压的温度系数趋近于零。

2. 二极管的温度特性

在半导体器件内部,受环境温度升高的影响,增强了共价键中电子的热运动,以至于有更多的电子具有足够大的动能,挣脱掉共价键的束缚,成为电子-空穴对,形成的这两种载流子将以同样数目增长。一方面,由于在掺杂半导体中,多数载流子浓度等于掺杂浓度和本征激发的载流子浓度之和,数值很大,而其中的掺杂浓度一般远大于本征激发的载流子浓度,掺杂浓度不受温度变化的影响,因而当温度升高时,多子浓度的相对增长量较小;另一方面,掺杂半导体中的少数载流子浓度等于本征激发的载流子浓度,数目很少,故在温度升高时,相对增长量很大。因此尽管少数载流子的浓度远低于多数载流子,但它对温度敏感的特点对半导体器件性能的影响是显著的。例如,半导体器件内部的反向饱和电流,一般主要由少数载流子漂移形成,因此反向饱和电流对温度变化非常敏感。

如图 1.2.2 所示,当二极管反向偏置时,温度升高,反向伏安特性随温度升高而下移;当二极管正向偏置时,温度增加,使得 V_T 增大,导致 eV_T 随温度升高而变小,但是程度不如 I_S 增加得快。所以,在相同电压下,温度升高时, i_D 值变大,结果使二极管的正向伏安特性随温度上升而左移。在室温情况下,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 ,反向饱和电流约增大一倍。

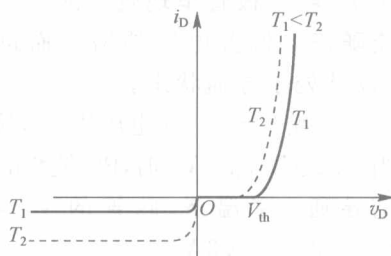


图 1.2.2 二极管的温度特性

由此可见,温度对半导体器件的影响是客观存在的。工程上实际使用的多数模拟电子电路,都需要考虑温度稳定性问题。

3. 二极管的电容效应

二极管还具有非线性电容效应,由势垒电容和扩散电容组成。

(1) 势垒电容 C_T

指势垒区内存储的空间电荷量 Q ,随外加电压变化而产生的电容效应。

(2) 扩散电容 C_D

指阻挡层外中性区(P区或者N区)存储的非平衡电荷量,随外加电压变化而产生的电容效应。

二极管的总电容(称为PN结电容) C_j 为两者之和,即 $C_j = C_T + C_D$ 。

当二极管正向偏置时,结电容值比较大,扩散电容起主要作用, $C_D \gg C_T, C_j \approx C_D$;当二极管反向偏置时,结电容数值较小, C_D 趋于零, $C_j \approx C_T$,利用势垒电容可以制成变容二极管。

二极管的结电容是(C_T 、 C_D)增量电容,表示叠加在直流工作点电压之上的增量电压与增量电流之间的关系,其值受外工作点直流电压的影响,属于非线性电容。例如 $C_T = -\frac{\Delta Q}{\Delta V}$,与普通的

线性电容 ($C = \frac{Q}{V}$) 不同。增量电容是指叠加在直流电压 V 上的增量电压与增量电荷之间的关系,其值随外加直流电压的变化而变化,它不是恒值;而线性电容却是常量,与外加电压无关。

二极管的电容效应是限制半导体的响应速度、影响高频特性的主要因素。

四、稳压二极管及变容二极管

二极管的种类非常多,除普通二极管外,还有一些特殊用途的二极管,常用的有稳压二极管、变容二极管等。

1. 稳压二极管

稳压二极管(简称稳压管)伏安特性曲线如图 1.2.3 所示。稳压管工作在反向击穿区,稳压值 V_Z 即为二极管的反向击穿电压, I_{Zmin} 表示最小允许电流,它表示稳压管保持稳压特性的最小电流值, I_{Zmax} 表示最大允许电流,它表示稳压管不被烧毁所能承受的最大电流,最大功率 $P_{ZM} = I_{Zmax} V_Z$ 。通常用动态电阻 $r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$ 来描述击穿区特性曲线的陡峭程度。

稳压管在使用时应串接限流电阻 R ,以保证流过稳压管的反向电流 I_Z 值在合适的范围之内,即 $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$ 。

2. 变容二极管

PN 结反向偏置时,结电容虽小,但结电阻高,所以结电容的影响反而很大。利用二极管的势垒电容效应,可以制成变容二极管。它的值受外加反向电压控制,随反向电压的增高而减小,如图 1.2.4 所示是它的符号和电容电压特性曲线。

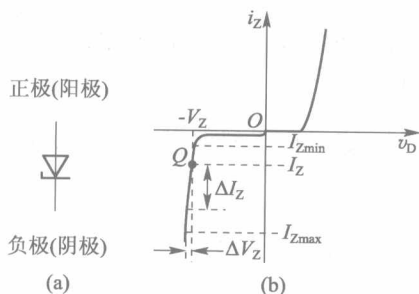


图 1.2.3 稳压管的符号和伏安特性曲线

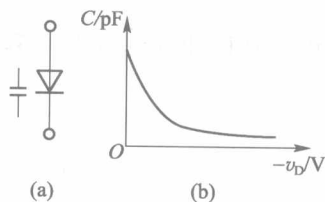


图 1.2.4 变容二极管的符号与电容电压特性

此外,利用金属-硅结构,可以制成肖特基二极管;利用发光材料和 PN 结的光敏特性可以制成发光二极管、激光二极管、光电二极管等光电子器件。

五、二极管的主要参数

二极管常用的参数主要有以下几个。

- ① 最大整流电流 I_F :指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。
- ② 最大反向工作电压 V_R :指二极管工作时允许外加的最大反向电压,通常规定为反向击穿电压的一半。
- ③ 反向电流 I_R :指二极管未击穿时的反向电流。
- ④ 最高工作频率 f_M :指二极管工作的上限频率。

二极管的参数均与温度有关,当实际应用条件与测试条件相差较大时,应对参数作必要修

正;另外同一型号的不同管子,其参数也会有所差异。

1.2.3 半导体二极管电路

一、二极管的等效静态电阻和动态电阻

二极管是非线性器件,它的等效电阻是随工作电压变化的,对于直流和交流两种不同情况呈现出不同的数值。工程上常用静态电阻和动态电阻来表征其电阻特性,又称为直流电阻和交流电阻。

1. 静态电阻

二极管的静态电阻是其工作在伏安特性上某一点时的端电压与端电流之比。当电路中交流信号为零时,二极管的电压和电流称为静态工作点 Q ,如图 1.2.5 所示,则该点的静态电阻为 $R_D = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}}$ 。

静态电阻 R_D 等于原点与 Q 点连线斜率的倒数,其值与 Q 点的位置有关, Q 点越高, R_D 的值越小,这是非线性电阻的一个特点。

2. 动态电阻

动态电阻是在一定的直流电压和电流下(即在 Q 点位置),低频小信号作用时的等效电阻。假设在 Q 点的基础上外加微小的低频信号,二极管会产生相应的电压变化量和电流变化量,如图 1.2.5 所示,则二极管的动态电阻为

$$r_d = \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_Q \approx \left. \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \right|_Q$$

动态电阻等于 Q 点处切线斜率的倒数,其实质也就是以 Q 点为切点的直线来近似微小变化时的特性曲线,因此当 Q 点的位置不同时, r_d 的数值将不同。

另一方面,利用二极管的电流方程式 $i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$,也可以得到理想二极管的动态电阻表达式

$$r_d = \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_Q \left. \frac{V_T}{I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}} \right|_{v_D=v_{DQ}} \approx \frac{V_T}{I_{DQ}}$$

在室温下($T = 300 \text{ K}$)

$$r_d = \frac{26(\text{mV})}{I_{DQ}(\text{mA})}$$

可见,二极管的动态电阻主要取决于其工作电流,即与 Q 点的位置有关。所以 Q 点位置越高, r_d 的数值越小。

直流电阻 R_D 可以用普通万用表测量得到,而交流电阻 r_d 只能通过计算得到。

二、二极管的等效电路模型

1. 数学模型

二极管在直流和低频条件下的数学模型,已由二极管的电流方程式 $i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$ 给出,这个模型只能借助于计算机求其数值。用数值法虽然可以取得数值结果,但难以直观地说明电路的基本功能和物理概念。

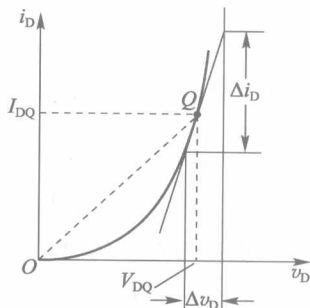


图 1.2.5 二极管的静态电阻与动态电阻

2. 理想化模型

当大信号工作条件下并且精度要求不高时,即当信号幅度远大于 V_{th} 时,认为二极管是理想的开关器件,通常采用这一模型。其符号及其伏安特性如图 1.2.6 所示。它的特点是:正向导通时,电阻为零,相当于短路;反向截止时,电阻为无穷大,相当于开路。这种开关特性充分体现了二极管单向导电性的本质。

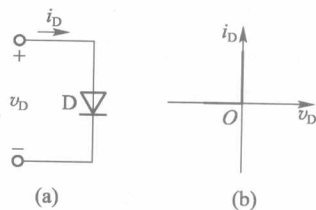


图 1.2.6 二极管理想化开关模型及其符号

3. 恒压降模型

如果外加电压较小,二极管导通电压 V_{th} 不能忽略,且由于曲线较陡,动态电阻 r_d 较小可以忽略,常用图 1.2.7(a) 所示的两段折线来近似二极管的伏安特性。正向导通时,二极管压降为一个常量 V_{th} ,截止时反向电流为零。相应的分段线性电路模型是理想二极管串联电压源 V_{th} ,如图 1.2.7(b) 所示。

4. 分段线性模型

当 V_{th} 和 r_D 都不能忽略时,则二极管的伏安特性可以用分段线性模型表示,如图 1.2.8(a) 所示。其中,动态电阻 r_D 包括 PN 结体电阻 r_s 与理想 PN 结动态电阻 r_d ,即 $r_D = r_s + r_d$,相应的等效电路模型如图 1.2.8(b) 所示。由于 r_D 值很小,把它忽略后所引入的误差不大,因此实用中一般多采用恒压降模型进行电路分析。

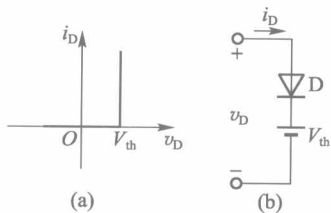


图 1.2.7 二极管的恒压降电路模型

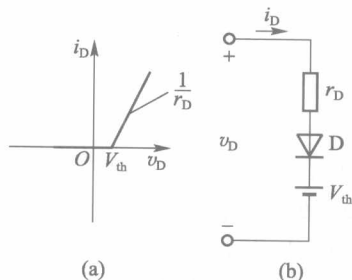


图 1.2.8 二极管的分段线性电路模型

在工程应用的近似分析中,二极管的理想模型、恒压降模型、分段线性模型三种等效电路比较起来,以理想模型误差最大,分段线性模型误差最小,一般情况下多采用恒压降模型。

5. 交流小信号模型

在进行动态分析时,需要采用交流小信号模型,又称微变等效电路模型,如图 1.2.9(a) 所示。其中二极管增量结电阻为 $r_d \approx \frac{V_T}{I_{DQ}}$,与 Q 值有关。该模型只能用来计算叠加在直流工作点 Q 上的微小增量电压与增量电流的响应。

在高频电路中,PN 结的单向导电性会因结电容的交流旁路作用而变差,因此在考虑结电容后,二极管的高频小信号模型如图 1.2.9(b) 所示。工作频率越高,结电容的旁路现象越严重。

综上所述,对于直流电路和大信号工作电路,通常采用二极管的理想模型或者恒压降模型进行分析;对于既有直流电源又有小信号源的电路,一般首先利用二极管的恒压降模型进行静态分析,估算电路的 Q 点;然后根据 Q 点计算出交流电阻;再用小信号模型法进行

动态分析,求出小信号作用下的交流电压、电流;最后,将交流量与静态值相叠加,得到完整的结果。

工程上采用近似计算分析法的实质,就是将二极管的伏安特性曲线进行折线化近似,并由此得到不同的等效电路。它们的共同点是截止时反向电流为零,分析时应根据具体情况选择不同的等效电路模型。

在图 1.2.10 所示的二极管电路中,设二极管为硅管,则其阈值电压 V_{th} 为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$ 。

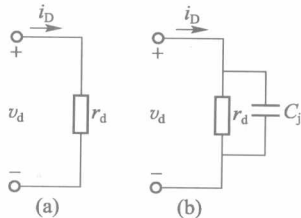


图 1.2.9 二极管的交流小信号模型

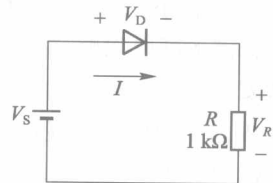


图 1.2.10 二极管电路

如果电源电压 $V_S = 10 \text{ V}$, 由于 $V_S \gg V_{th}$, 那么可以认为管压降 $V_D \approx 0$, 选用理想化开关模型, 电路中的电流 $I \approx \frac{V_S}{R} = \frac{10}{1} \text{ mA} = 10 \text{ mA}$;

如果 $V_S = 5 \text{ V}$, 取 $V_D \approx 0.7 \text{ V}$, 选用恒压降模型, 则 $I \approx \frac{V_S - V_D}{R} = \frac{5 - 0.7}{1} \text{ mA} = 4.3 \text{ mA}$, 与实际电流的误差小于 5%;

如果 $V_S = 2 \text{ V}$, 则当 V_D 取 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$ 中不同的值时, 计算得出的电流 I 值相差很多, 误差较大, 因此前述近似模型均不适用, 就需要实测所用二极管的伏安特性, 得到管压降 V_D , 用图解法求出二极管的 Q 点、电流 I 。

可见, 应该根据电源 V_S 的大小以及所容许的误差, 来选择采用哪种等效的电路模型。

三、二极管电路的分析方法

二极管电路的分析方法主要有图解法、算法、计算机辅助分析法, 工程上比较常用的是算法。

所谓算法, 就是实际工作中常采用的模型分析法。分析时首先根据电路的具体情况选择合适的二极管模型; 将二极管用模型代替后, 实际上就已经把非线性电路转化为线性电路, 然后根据线性电路的分析方法进行分析计算, 就可以得到需要的结果。一般在利用二极管单向导电性的电路中, 常用这种方法分析直流电压、电流, 也常根据输入信号波形画出输出波形。

1. 二极管工作状态的判断: 判断二极管是导通还是截止

通过二极管端电压的极性可以判断其工作状态。一般方法是: 假设电路中二极管全部开路, 并以它的两个极作为端口, 利用戴维宁定理求解端口电压, 若该电压使二极管正偏, 则导通, 若反偏则截止。

对于理想二极管, 如果其阳极电位大于阴极电位, 则该管导通, 反之截止。

对于实际二极管, 如果其阳极电位与阴极电位之差大于导通电压, 则该管导通, 反之截止。

对于同时存在多个二极管的电路, 存在优先导通权, 其中正偏电压最大的管子优先导通。将优先导通的二极管接入电路中, 重新按照前面的步骤分析其他二极管的工作状态。