

21 世纪高等学校电子信息类教材

电子电路基础

● 刘京南 主编 ● 王成华 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

21 世纪高等学校电子信息类教材

电子电路基础

刘京南 主 编
王成华 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是教育部《面向 21 世纪电工电子系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践》项目规划建设的一系列教材之一。本书将传统的电子技术课程内容进行重新规划和整合,主要讨论非逻辑设计方式的基础电子电路。

全书共 8 章,内容包括:半导体器件概述,基本运算电路,基本放大电路,组合放大电路,反馈放大电路及其稳定性分析,波形产生与整形电路,信号处理电路,功率电路。其中有关半导体器件概述,电子设计自动化软件及其应用等内容供选用。

本书可作为高等学校电气、电子信息类专业电子技术课程的教材,也可作为从事电子技术工作的技术人员及电子技术爱好者的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路基础/刘京南主编. —北京:电子工业出版社,2003.7

21 世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-5053-8851-7

I. 电… II. 刘… III. 电子电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 050859 号

责任编辑:凌毅 束传政

印 刷:北京四季青印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:20 字数:512 千字

版 次:2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

印 数:6000 册 定价:25.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

目 录

第 1 章 半导体器件概述	1
1.1 PN 结及二极管	1
1.1.1 半导体及 PN 结	1
1.1.2 二极管的基本特性	6
1.1.3 二极管的电路模型及主要参数	9
1.1.4 特殊二极管	10
1.2 半导体三极管	12
1.2.1 三极管的基本工作原理	13
1.2.2 三极管的基本特性	16
1.2.3 三极管的主要参数及电路模型	20
1.3 半导体场效应管	25
1.3.1 结型场效应管	25
1.3.2 绝缘栅场效应管	29
1.3.3 场效应管的主要参数及电路模型	33
1.4 集成运算放大器	34
1.4.1 集成运放的基本特性	35
1.4.2 理想运放	37
本章小结	38
本章习题及思考题	39
第 2 章 基本运算电路	43
2.1 基本逻辑门电路	43
2.1.1 基本逻辑运算	43
2.1.2 二极管与门及或门电路	44
2.1.3 非门电路	46
2.1.4 DTL 与非门	47
2.2 TTL 逻辑门电路	47
2.2.1 TTL 与非门电路	48
2.2.2 其他形式的 TTL 门电路	54
2.3 CMOS 逻辑门电路	57
2.3.1 CMOS 反相器	58
2.3.2 其他形式的 CMOS 逻辑门	59
2.3.3 CMOS 三态门及传输门	60
2.4 集成运放运算电路	61
2.4.1 比例运算电路	61

2.4.2	加減运算电路	63
2.4.3	积分与微分电路	67
2.4.4	对数与指数电路	69
	本章小结	70
	本章习题及思考题	71
第3章	基本放大电路	76
3.1	放大电路的组成与技术指标	76
3.1.1	放大电路的组成	76
3.1.2	放大电路的技术指标	78
3.2	放大电路的稳定偏置	81
3.2.1	温度对半导体器件及静态工作点的影响	82
3.2.2	分压式偏置电路	83
3.2.3	电流源偏置电路	86
3.3	各种基本组态放大电路的分析与比较	89
3.3.1	共基极放大电路	89
3.3.2	共集电极放大电路	91
3.3.3	场效应管的直流偏置电路	93
3.3.4	共源极放大电路	95
3.3.5	共漏极放大电路	97
3.4	放大电路的通频带	99
3.4.1	三极管的高频参数	100
3.4.2	共发射极放大电路的高频特性	102
*3.4.3	共基极电路的高频特性	106
*3.4.4	共集电极电路的高频特性	107
	本章小结	108
	本章习题及思考题	110
第4章	组合放大电路	116
4.1	一般组合放大电路	116
4.1.1	组合放大电路的级间耦合	116
4.1.2	组合放大电路的增益	118
4.1.3	共源-共射放大电路	119
4.1.4	共射-共基-共集放大电路	121
4.2	差动放大电路	124
4.2.1	基本差动放大电路	124
4.2.2	差动放大电路的传输特性	128
4.3	集成运放的典型电路	130
4.3.1	偏置电路及输入级	131
4.3.2	中间级及输出级电路	132
4.4	集成运放的参数及实际电路模型	133
4.4.1	集成运放的主要参数	133

4.4.2 集成运放的实际电路模型	135
本章小结	138
本章习题及思考题	139
第5章 反馈放大电路及其稳定性分析	150
5.1 反馈的基本概念与分类	150
5.1.1 反馈的基本概念	150
5.1.2 反馈的分类与判断	150
5.1.3 反馈放大电路的方框图表示及其一般表达式	157
5.2 负反馈对放大电路性能的改善	158
5.2.1 提高放大倍数的稳定性	158
5.2.2 减小非线性失真	159
5.2.3 扩展通频带	160
5.2.4 对输入电阻和输出电阻的影响	161
5.3 深度负反馈放大电路的分析计算	165
5.3.1 深度负反馈的特点	165
5.3.2 深度负反馈放大电路的估算	166
5.4 负反馈放大电路的稳定性分析及频率补偿	169
5.4.1 负反馈放大电路的稳定性分析	169
5.4.2 常用的频率补偿方法	171
本章小结	175
本章习题及思考题	175
第6章 波形产生与整形电路	184
6.1 正弦波振荡电路的基本概念	184
6.1.1 正弦波振荡器的振荡条件	184
6.1.2 正弦波振荡器的组成及分类	186
6.2 正弦波振荡电路	186
6.2.1 RC文氏电桥振荡电路	186
6.2.2 LC三点式振荡电路	189
6.2.3 变压器反馈式振荡电路	192
6.2.4 石英晶体振荡电路	193
6.3 波形整形电路	195
6.3.1 电压比较器	195
6.3.2 555集成定时器	198
6.3.3 施密特触发器电路	199
6.3.4 单稳态触发器电路	201
6.4 非正弦波振荡电路	203
6.4.1 矩形波振荡电路	203
6.4.2 三角波振荡电路	205
本章小结	207
本章习题及思考题	208

第 7 章 信号处理电路	215
7.1 有源滤波器	215
7.1.1 滤波器的基本概念	215
7.1.2 一阶有源滤波电路	219
7.1.3 二阶有源滤波电路	219
7.1.4 状态变量滤波器	224
7.2 模拟乘法器	226
7.2.1 对数式模拟乘法器	226
7.2.2 变跨导式模拟乘法器	227
7.2.3 模拟乘法器应用举例	230
7.3 锁相环电路	232
7.3.1 锁相环的基本概念	232
* 7.3.2 锁相环的相位模型与系统分析	235
7.3.3 集成锁相环及其应用	238
本章小结.....	247
本章习题及思考题.....	247
第 8 章 功率电路	251
8.1 功率放大电路	251
8.1.1 功率放大电路的特点与分类	251
8.1.2 互补对称功率放大电路	254
8.1.3 集成功率放大器	262
8.2 线性直流稳压电路	263
8.2.1 电容滤波桥式整流电路	264
8.2.2 串联型稳压电路	266
8.3 开关型直流稳压电路	278
8.3.1 开关型直流稳压电路的特点和分类	278
8.3.2 开关型直流稳压电路的工作原理	279
8.3.3 开关型集成稳压器	281
本章小结.....	283
本章习题及思考题.....	284
附录 A 电子设计自动化软件(MultiSIM)及其应用	291
A.1 MultiSIM 简介	291
A.2 MultiSIM 的基本操作	297
A.3 MultiSIM 的应用	298
参考文献	306

第 1 章 半导体器件概述

半导体器件是构成各种电子电路的基础。本章首先简要介绍半导体的基本知识,再讨论 PN 结的形成机理和特性,然后介绍半导体二极管、半导体三极管、场效应管的工作原理、特性曲线、主要参数及电路模型,最后介绍集成运算放大器的基本特性和理想运放的电路模型及主要参数。

1.1 PN 结及二极管

1.1.1 半导体及 PN 结

自然界的各种物质,根据其导电能力的差异,可以分为导体、绝缘体和半导体 3 大类。容易传导电流的物质称做导体,如铜、银和铝等材料都是良导体;几乎不能传导电流的物质称做绝缘体,如塑料、陶瓷、橡胶等;而导电能力介于导体与绝缘体之间,电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega$ 范围内的物质就称做半导体。

半导体除了在导电能力方面与导体、绝缘体有差异外,更重要的还在于它有如下特性:第一,当半导体受外界光和热的刺激时,其导电能力将发生显著的变化;第二,在纯净的、按晶格结构排列的半导体材料中掺入微量的其他元素时,其导电能力将会明显提高。这些特性是由半导体结构及其独特的导电机理形成的。

1. 本征半导体

完全纯净的原子按晶格结构排列完整的半导体称做本征半导体。

大多数半导体器件所用的主要材料是硅(Si)和锗(Ge),它们都是 4 价元素,在原子结构中最外层有 4 个电子,这 4 个电子也称为价电子。物质的化学性质是由价电子决定的,半导体的导电能力也与价电子有关。为了突出价电子的作用和画图的方便,常用图 1.1.1 所示的简化原子结构模型来表示,图中 +4 表示原子核及内层电子所具有的电荷。

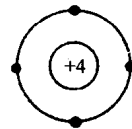


图 1.1.1 硅和锗的原子结构简化模型

目前所用的半导体材料都要制成晶体,就是说,这些物质的原子在空间排列成很有规律的空间点阵,简称晶格。在晶体中,由于原子之间的距离很近,每个原子的 4 个价电子不仅受所属原子核的约束,而且还受到相邻的原子核的吸引,使得每一个价电子为两个相邻的原子核所共有,形成了共价键结构,如图 1.1.2 所示。

对于本征半导体来说,由于晶体中的共价键有较强的结合力,在热力学温度 0K(相当于 -273°C)、且无外界激发时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,此时晶体中没有自由电子,和绝缘体一样,半导体不能导电。

但是随着温度的升高,如在室温条件下,半导体共价键中的价电子并不完全像绝缘体中的电

子被束缚得那样紧,由于热激发就会使一些价电子获得足够的能量而挣脱共价键的束缚,成为能参与导电的自由电子,同时在原来的共价键中留下一个空位,称为“空穴”,如图 1.1.3 所示。

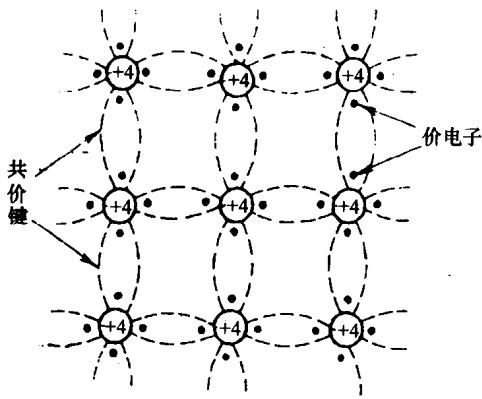


图 1.1.2 晶体中的共价键结构

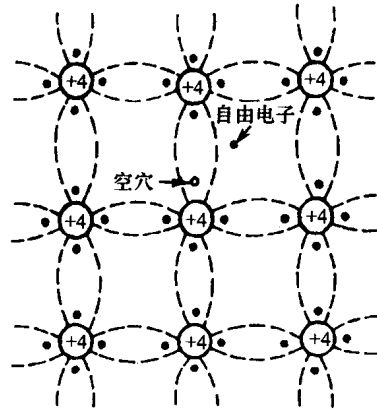


图 1.1.3 本征激发产生自由电子和空穴

由于存在这样的空位,相邻原子的价电子比较容易离开它所在的共价键而填补到这个空位中来,使该价电子原来所在的共价键中出现一个新的空穴;这个空穴又可能被相邻原子的价电子填补,再出现新的空位,从而在半导体中出现了空穴运动。由于空穴是由硅或锗原子失去一个电子而形成的,使原来呈电中性的原子成为一个带正电的离子,可以认为,这个单位正电荷便是空穴所带的电荷量。所以空穴的运动就可看做是一个带正电荷的粒子的运动,空穴的出现是半导体区别于导体的重要特点。所以在半导体中存在着两种载流子:带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。在本征半导体中产生的电子和空穴总是成对地出现,成为电子-空穴对,这一现象也称为本征激发。

由于物质的运动,半导体中的电子-空穴对不断产生,同时,自由电子与空穴相遇时又将重新被共价键束缚,电子和空穴就会成对消失,这一现象称为复合。在一定的温度下,电子-空穴对的产生和复合在不停地进行,最终达到了一种动态平衡,使半导体中载流子的浓度一定。可以证明:本征半导体中自由电子或空穴的浓度除与半导体材料本身的性质有关以外,还与温度密切相关。在一般使用范围内,载流子浓度随温度升高近似按指数规律增加。如硅材料,大约温度每升高 8°C ,本征载流子浓度增加一倍;对于锗材料,大约温度每升高 12°C ,本征载流子浓度增加一倍。

由于物质的导电能力决定于载流子的数目,因此半导体的导电能力将随温度的增加而增加,这是半导体的一个重要特性。

2. 杂质半导体

由于本征激发产生的载流子数目有限,所以本征半导体的导电能力较差,本身也不实用。如果在本征半导体中掺入微量的其他元素(这种其他元素通常称为杂质),则将使半导体的导电性能显著改变。根据掺入杂质的性质不同,杂质半导体可以分为 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) N 型半导体

在硅(或锗)晶体内掺入少量的 5 价元素杂质,如磷、砷、锑等,则原来晶格中的某些硅原子

将被杂质原子所代替。杂质原子有 5 个价电子,它用其中的 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子组成共价键后,还多一个价电子处在共价键之外,如图 1.1.4 所示。这个多余的价电子只受到杂质原子核的吸引,这种束缚力较微弱,只要较少的能量(如在室温条件下),就能挣脱杂质原子核的吸引而成为自由电子,同时杂质原子也变成带正电荷的离子。除了杂质原子给出的自由电子外,硅(或锗)晶体本身也将产生少量的电子-空穴对,在这种杂质半导体中,电子的浓度将大大高于空穴的浓度,将主要依靠电子导电,因此将这种杂质半导体称为电子型半导体,简称 N 型半导体,其中自由电子称为多数载流子,简称多子;空穴称为少数载流子,简称少子。由于掺入的杂质原子提供了大量的自由电子,所以也称这种杂质为施主杂质。

(2) P 型半导体

在硅(或锗)的晶体内掺入少量的 3 价元素杂质,如硼、铝、镓等,杂质原子的 3 个价电子与相邻的 4 个硅原子形成共价键时,因缺少一个电子,在晶体中便出现了一个空穴,如图 1.1.5 所示。在这种杂质半导体中,空穴数将远远大于自由电子数,将主要依靠空穴导电,所以将这种杂质半导体称为空穴型半导体,简称 P 型半导体,其中空穴为多子,自由电子为少子。由于掺入的杂质原子能够产生多余的空穴而接受电子,所以将这种杂质称为受主杂质。

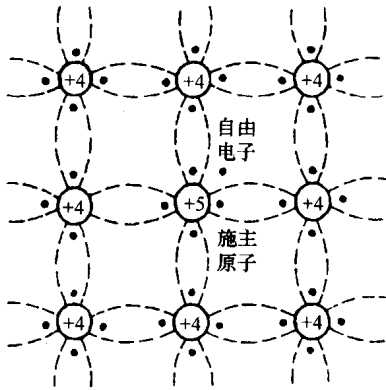


图 1.1.4 N 型半导体的晶体结构

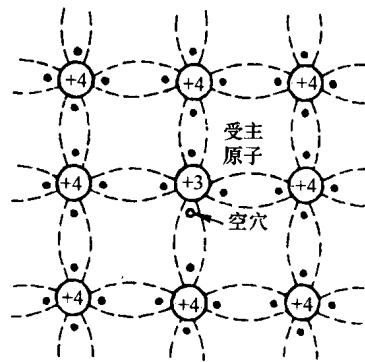


图 1.1.5 P 型半导体的晶体结构

由此可见,在半导体中掺入杂质后,其载流子浓度将发生显著改变,其中多子浓度主要取决于掺杂的浓度,少子浓度则主要取决于温度。而 N 型半导体、P 型半导体的出现,就可以构成各种各样的半导体器件。

3. PN 结

通过掺杂工艺,使一块半导体的一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体,并且保持晶格的连续性,则在两种半导体的交界面附近,形成了一个具有特殊性质的薄层,被称之为 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

(1) PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体“结合”在一起时,由于在交界面两侧电子和空穴浓度相差悬殊,N 区内的电子必然向 P 区内运动,这种由于浓度差而引起的载流子运动称为扩散运动,扩散到 P 区的电子因与空穴复合而消失;同样,P 区的空穴也向 N 区扩散,且与 N 区的电子复合而消失。于是,在交界面两侧形成了一个由不能移动的正负离子所形成的空间电荷区,即 PN 结,如图 1.1.6 所示。在空间电荷区内几乎不存在可以自由运动的载流子,所以也称其为耗尽

层。由于空间电荷区的出现,破坏了P区、N区中原来的电中性条件,使P区带负电,而N区带正电,形成了一个由N区指向P区的电场,其电位差(一般在零点几伏)用 U_v 表示,并称之为接触电位差。由于这个电场是由半导体内部载流子的扩散运动形成的,故称其为内电场。显然,这个内电场的作用将阻止多子的进一步扩散,所以空间电荷区也称为阻挡层。而内电场的方向又使N区内的少数载流子空穴可向P区移动,同时P区的少数电子在内电场的作用下也向N区漂移,从N区漂移到P区的空穴补充了原来交界面上P区失去的部分空穴,而从P区漂移到N区的电子补充了原来交界面上N区失去的部分电子,这将使空间电荷减少,内电场削弱,这种现象将有利于扩散而不利于漂移。

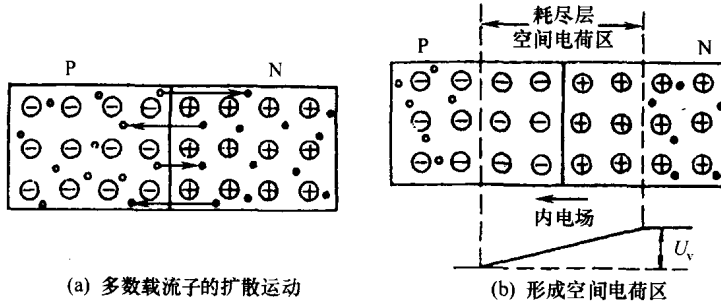


图 1.1.6 PN 结的形成

由此可见,PN 结中存在着两种载流子的运动:多子的扩散与少子的漂移。而由扩散运动形成的电流叫扩散电流,由漂移运动形成的电流叫漂移电流。扩散使空间电荷区加宽,内电场增强,对多子的扩散阻力增大,但也增强了少子的漂移;而漂移使空间电荷区内电场减弱,又使扩散容易进行。当漂移和扩散达到动态平衡时,PN 结中总的电流等于零,空间电荷区的宽度也达到稳定。

(2) PN 结的单向导电性

在 PN 结的两端外加电压通常称之为偏置。

正向偏置:P 区接电源正极,N 区接电源负极的偏置方式称之为 PN 结的正向偏置。如图 1.1.7 所示。

此时外加电场与内电场方向相反,削弱了内电场,使空间电荷区变薄,破坏了原来 PN 结的动态平衡,使多子的扩散强于少子的漂移,从而在 PN 结中形成了正向的电流 I_F 。由于该电流是由多子扩散形成的,多子数量较多,只要外加电压有较小的改变,就将形成较大的正向电流变化,即 PN 结在正向偏置时,呈现出一个较小的电阻值。

反向偏置:P 区接电源负极,N 区接电源正极的偏置方式称之为 PN 结的反向偏置。如图 1.1.8 所示。

由于外加电场方向与内电场方向相同,增强了内电场的作用,使空间电荷区变厚,则多子的扩散更困难,但有利于少子的漂移,因而在 PN 结中形成了由少子的漂移运动产生的反向电流 I_S 。因为少数浓度有限,所以反向电流数值非常小。在一定的温度下,少数浓度基本不变,所以在外加反向偏置大于一定数值后(大于零点几伏),其反向电流 I_S 将不再随着反向偏置电压的增加而变大,所以称 I_S 为反向饱和电流。 I_S 的值虽然很小,但它受温度的影响却十分明显,随着温度的升高, I_S 将会明显增大。

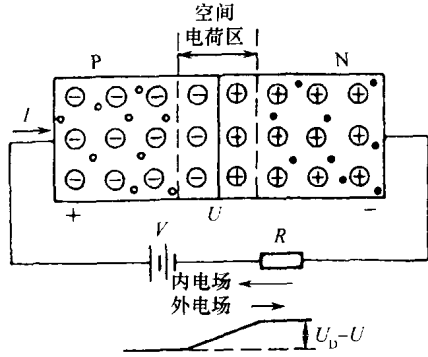


图 1.1.7 正向偏置的 PN 结

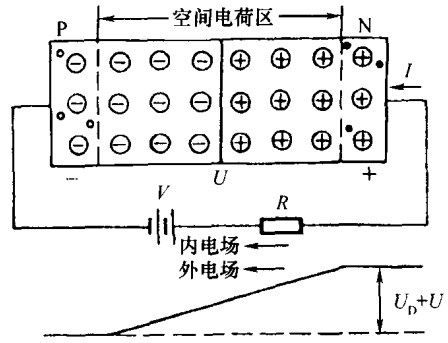


图 1.1.8 反向偏置的 PN 结

总之,当 PN 结正向偏置时,将形成较大的正向电流,PN 结处于正向导通状态;当 PN 结反向偏置时,反向饱和电流非常小,PN 结处于反向截止状态,这种特性就称为 PN 结的单向导电性。

由理论分析可以得到,PN 结两端的偏置电压 u_D 与 PN 结中流过的电流 I 之间的关系为

$$I = I_S \left(e^{\frac{qu_D}{kT}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1 \right) \quad (1.1.1)$$

式中 I_S 为反向饱和电流, $U_T = \frac{kT}{q}$ 为温度电压当量,其中 k 为玻耳兹曼常数 ($k = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, K 为开尔文, J 为焦耳), T 为热力学温度, q 为电子电量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (库仑)。在室温下 ($T = 300 \text{ K}$), $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

式(1.1.1)可从两方面分析:

① 当正向偏置时,且偏压 u_D 大于 U_T 几倍以上,则

$I \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}$, 即 I 随 u_D 按指数规律变化;

② 当反向偏置时,只需偏置电压 $|u_D|$ 大于 U_T 几倍以上,则 $I = -I_S$ (负号表示反向电流)。式(1.1.1)表示的特性称之为 PN 结的理想伏安特性,可用图 1.1.9 表示。

(3) PN 结的击穿

PN 结在反向偏置时,在一定偏压范围内,形成的反向电流 I_S 很小,且不随偏压的增大而增大。但是当反向电压增大到一特定数值 (U_{BR}) 时,反向电流将急剧增加,如图 1.1.9 所示,这种现象称为 PN 结的反向击穿, U_{BR} 为 PN 结的反向击穿电压。导致 PN 结击穿的原因可分两种:

① 齐纳击穿

当半导体材料的掺杂浓度较高时,耗尽层的宽度较窄,在不太大的反向电压(一般为几伏)下,就可在耗尽层中形成很强的电场,它可直接破坏共价键结构,把电子从共价键中“拉”出来,产生电子-空穴对,从而引起反向电流急剧增加。

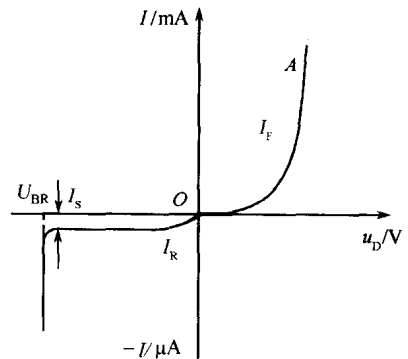


图 1.1.9 PN 结的理想伏安特性

② 雪崩击穿

如果耗尽层的宽度较宽,随着反向电压的增加,电场强度也不断增强,使少子在漂移运动中不断被加速,动能增大。在运动过程中少子可能与共价键中的价电子发生碰撞,并将价电子从共价键中“撞”出来,形成电子-空穴对;新产生的电子-空穴对,在电场的加速下又将去撞击其他价电子,当反向电压达到一定值后,使耗尽层中载流子的数量急剧增多,即形成了载流子雪崩式的倍增效应。载流子的剧增也将引起反向电流的急剧增加。

击穿电压较低的一般为齐纳击穿,击穿电压较高的为雪崩击穿。如以硅材料而言,击穿电压在4V以下的多为齐纳击穿,7V以上的多为雪崩击穿,在4~7V之间的两种击穿都有可能。

PN结出现击穿,并不一定指PN结损坏,只要有一定的限流措施,就不会使PN结反向击穿后,因电流过大产生过热而损坏。当反向电压降低后,PN结的特性恢复到击穿前的情况。但是如果反向电流过大,使PN结结温过热就将损坏PN结。通常把前一种有可逆特性的击穿称为电击穿,而后一种击穿称为热击穿。

(4) PN结电容

PN结的电容效应按其形成的原因不同,可分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。

① 势垒电容 C_B

耗尽层是由带正、负电荷的离子构成的,当外加电压发生变化时,耗尽层的宽度将发生变化。当外加电压改变使耗尽层变宽时,电荷量增加,而外加电压使耗尽层变窄时,电荷量减少。耗尽层中的电荷量随外加电压的改变而变化所形成的电容效应,就称之为势垒电容 C_B 。显然,势垒电容只有在外加电压发生变化时才起作用,外加电压变化频率越高,其作用越显著。 C_B 是一个非线性电容,反向偏压越高, C_B 越小;而正向偏压加大时, C_B 增大。

② 扩散电容 C_D

当PN结外加正向电压时,两边的多子在扩散过程中越过PN结而成为另一方的少子,这些少子并不会立即复合消失,而是在一段路程内,一边扩散,一边复合,在对方区域内形成一个由少子浓度形成的浓度梯度。靠PN结边缘浓度大,离PN结远的地方浓度小。

当外加正向电压加大时,正向电流也增加,有更多的载流子扩散到对方区域,即在对方区域就有更多的载流子积累;反之当正偏电压减小时,对方区域内积累的载流子也减少。外加电压的改变引起PN结两侧区域内积累电荷量的变化所形成电容效应,称之为扩散电容 C_D 。

在PN结正向偏压时,电荷的积累随电压的升高而增多, C_D 较大;而反向偏压时,载流子积累很少,所以反偏时 C_D 忽略不计。

由上所述,PN结在高频运用时,可用如图1.1.10所示的等效电路模型表示。其中 r_j 代表PN结电阻, C_j 表示PN结电容, $C_j = C_B + C_D$ 。正向偏置时, r_j 为正向电阻,数值较小,而 C_j 较大,且主要由 C_D 决定;反向偏置时, r_j 为PN结反向电阻,数值较大,而结电容 C_j 较小,且主要由 C_B 决定。

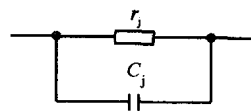


图 1.1.10 PN结高频电路模型

1.1.2 二极管的基本特性

1. 二极管的结构

半导体二极管就是由一个PN结加两个引出电极,再用管壳封装而成的。其中P区引出的电极叫阳极(正极),N区引出的电极叫阴极(负极)。图1.1.11所示为一些常用二极管的外形图及电路图形符号。

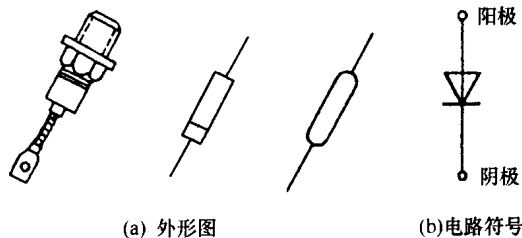


图 1.1.11 半导体二极管的外形及电路符号

二极管的类型很多,按制造材料分为硅二极管和锗二极管;按制造结构分为点接触型及面接触型,其中点接触型二极管 PN 结的面积小,允许通过的电流较小,但它们的结电容也很小,可以在较高的频率下工作,适用于高频检波、混频及小电流整流;面接触型二极管的 PN 结面积较大,可通过较大的电流,但其结电容也较大,只能在较低的频率下工作,常用于整流电路;此外,还有一种开关型二极管,在脉冲数字电路中做开关管使用。

2. 二极管的伏安特性

二极管两端所加电压 U 与管子中流过电流 I 之间的关系曲线 $I = f(U)$,就是二极管的伏安特性,一个典型的二极管伏安特性曲线如图 1.1.12 所示。

由图 1.1.12 可以看出,二极管的伏安特性与前述理想 PN 结的伏安特性(见图 1.1.9)基本是相同的。

(1) 正向特性

正向偏压较小时,正向电流几乎为零,只有当外加电压超过某一数值 U_{th} 时,才出现明显的正向电流。 U_{th} 通常称其为阈值电压、开启电压或死区电压。在室温下,硅管的 $U_{th} \approx 0.5V$,锗管的 $U_{th} \approx 0.1V$ 。当外加偏压超过 U_{th} 后,随着电压的增加,正向电流基本上按指数规律变化,此时二极管处于导通状态。只要正向电流不是特别

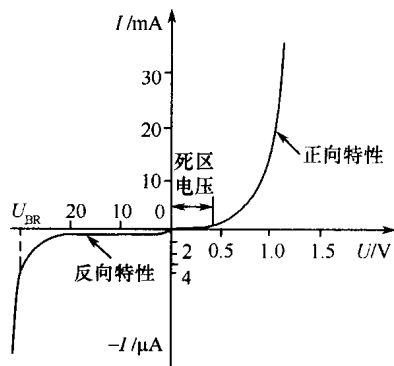


图 1.1.12 二极管的伏安特性曲线

大,处于导通状态的二极管两端的压降变化不大,接近一个常数,也将其称为导通压降 $U_{D(on)}$ 。一般硅管的导通压降 $U_{D(on)} \approx 0.6 \sim 0.8V$,锗管的导通压降 $U_{D(on)} \approx 0.2 \sim 0.3V$ 。

(2) 反向特性

由 PN 结特性可知,二极管在反向偏压作用下,反向电流很小,且基本上不随外加偏压的增加而增加,这个反向电流称其为反向饱和电流 I_S ,此时也称二极管处于截止状态。硅管的 I_S 约为 $0.1\mu A$ 以下,锗管的 I_S 大约为几十微安。

(3) 反向击穿特性

当外加反向偏压超过击穿电压 U_{BR} 时,反向电流出现急剧增加,从而使二极管出现击穿。

3. 二极管的开关特性

二极管的主要特性为单向导电性,即外加正向偏压时二极管导通,此时等效电阻很小,可近似认为是一个“开关的闭合”;二极管外加反向偏压时,二极管截止,此时等效电阻很大,相当

于一个“开关的断开”。而二极管在正向导通与反向截止两种不同状态之间的转换过程就是二极管的开关特性。

(1) 反向恢复过程

在图 1.1.13(a) 所示电路中, 输入一个如图 1.1.13(b) 所示的信号电压, 由二极管特性可知, 在 $0 \sim t_1$ 时间内, 二极管处于正偏而导通, 电路中形成正向电流, 其数值为

$$I_F = \frac{U_F - u_D}{R_L} \approx \frac{U_F}{R_L}$$

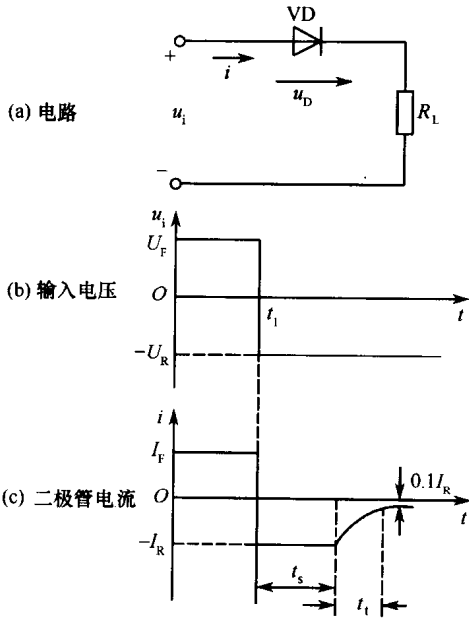


图 1.1.13 二极管的反向恢复过程

u_D 即为二极管的导通压降 $U_{D(on)}$, 硅管为 $0.6 \sim 0.8V$, 锗管为 $0.2 \sim 0.3V$ 。

在 $t = t_1$ 时, 输入电压由 U_F 突变为 $-U_R$, 理想情况下二极管处于反偏而应立即截止, 电路中只应流过很小的反向饱和电流。但实际情况, 在 $t = t_1$ 后的短时间内, 二极管并没有立即截止, 而是由原来正向的 I_F 突变为一个很大的反向电流 $I_R \approx \frac{U_R}{R_L}$, 维持一定时间 t_s 后再开始逐渐下降, 再经过 t_t 时间后, 下降到反向饱和电流 I_S 的数值(有时用 $0.1I_R$), 此时二极管才处于反向截止状态, 此电流波形如图 1.1.13(c) 所示。

二极管由正向导通到反向截止的转换过程一般称为反向恢复过程, 其中 t_s 称为存储时间, t_t 称之为渡越时间, 而 $t_s + t_t = t_{re}$ 称为反向恢复时间, t_{re} 的存在使二极管的开关工作速度受到限制。

(2) 反向恢复过程形成的原因

在分析 PN 结电容时提到过扩散电容的概念, 即在 PN 结外加正向电压时, 在势垒区两边将出现少子的积累并形成一定的浓度梯度, 这种少子的积累也叫做电荷存储效应。

当外加输入电压由正偏 U_F 突变为反偏 $-U_R$ 时, 原来的少子积累并不会马上消失, 而是在反向电场作用下, 一方面进一步与多子复合, 另一方面将漂移到原来的区域, 即 N 区的空穴漂移至 P 区, 而 P 区的电子被拉至 N 区。

由于这些载流子全部消失需要时间, 且在此时间内 PN 结仍将处于正偏, PN 结电阻很小, 与 R_L 相比可忽略不计, 所以形成了较大的反向电流

$$I_R = \frac{U_R + u_D}{R_L} \approx \frac{U_R}{R_L}$$

经过 t_s 时间后, 势垒区两侧原有少子积累开始明显减少, 势垒区也逐渐变宽, 反向电流逐渐减少, 直到正常的反向饱和电流的数值, 这段时间即为渡越时间 t_t 。在此期间, 二极管截止, 反向恢复过程结束。

由此可见, 反向恢复过程实质上就是存储电荷的消失过程, t_{re} 的大小不但与二极管的材料及结构有关, 还与积累电荷的多少、消失速度的快慢等有着密切的关系。一般开关二极管的 t_{re} 在纳秒($10^{-9}s$) 数量级。

(3) 二极管的开通时间

理论上讲,二极管从反向截止转为正向导通亦需要一定的时间,这个时间称为开通时间。开通时间与反向恢复时间相比要短得多,它对二极管的开关速度几乎不产生影响,所以一般都忽略不计。

1.1.3 二极管的电路模型及主要参数

1. 电路模型

由于二极管的非线性特征,使电路参数的严格计算比较烦琐。为了计算方便,在特定条件下,常用一些线性化的模型来近似代替实际的二极管。

(1) 直流模型

由二极管的单向导电性可知,在外加正偏时二极管导通,其两端的导通压降很小,等效电阻很小,可近似看做零;而外加反向偏压时,二极管截止,流过的电流为反向饱和电流,其数值很小,可近似认为零,由此可得二极管的直流模型如图 1.1.14 所示。

即外加正偏电压超过导通电压时,二极管导通且存在一个管压降,而当二极管反偏或低于导通电压时,二极管截止。

由于导通压降较低,因此在许多场合,为了分析计算更为方便,常令 $U_{D(on)} = 0$,从而得到一个更简单的电路模型,这种模型也称为理想模型。

(2) 小信号模型

在有些电路中,主要分析对象不是二极管处于导通或截止,而是考虑二极管两端电压在某一固定值附近有微小变化时所引起的二极管中电流的相应变化量,如图 1.1.15(a)所示。该固定电压(电流)也称为静态工作点,用 Q 来表示。从图中可以看出, Q 点附近较小的电压变化与电流变化之间的关系,可以用 Q 点的切线斜率来描述, $\Delta U/\Delta I = r_d$ 称为二极管的微变等效电阻。

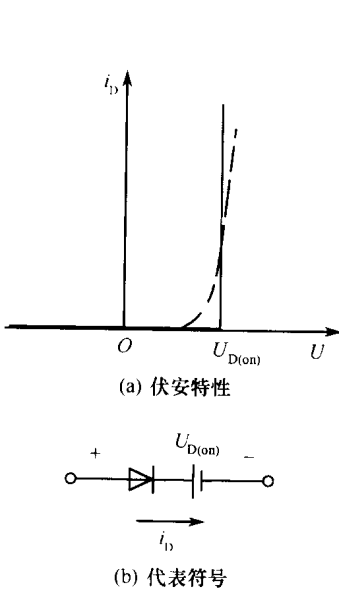


图 1.1.14 二极管的直流模型

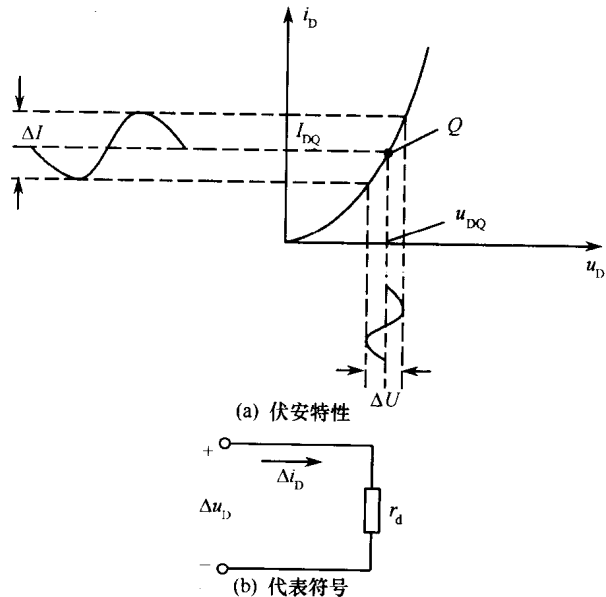


图 1.1.15 二极管小信号等效电路模型

由二极管伏安特性表达式(1.1.1)可得

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\Delta I}{\Delta U} \approx \frac{dI}{dU} = \frac{d[I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)]}{dU} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}} \approx \frac{I_D}{U_T}$$

即
$$r_d = \frac{U_T}{I_D} \quad (1.1.2)$$

由此,二极管在静态工作点 Q 附近的电路模型为一个电阻,如图 1.1.15(b)所示。其中

$$r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26 \text{ (mV)}}{I_D} \text{ (室温下)}$$

显然该图所示的小信号电路模型只适用于二极管处于正向导通且电压变化很小时,所以也称为微变等效电路模型。

2. 二极管的主要参数

二极管的参数是对其伏安特性的定量描述,也是实际工作中正确使用和合理选择器件的主要依据。每个参数都可由厂家给出的手册中查得。二极管的主要参数有:

① 最大整流电流 I_F 指二极管长期运行时,允许通过管子的最大正向平均电流。它主要是由 PN 结的结面积和二极管允许的温升所限定。实际使用时,二极管的平均电流不得超过此值,否则可能使二极管过热而损坏。

② 最高反向工作电压 U_R 指二极管在使用时所允许外加的最大反向电压,超过此值二极管有可能被击穿。为了留有余地,通常将击穿电压 U_{BR} 的一半定为 U_R 。

③ 反向电流 I_R 指在室温下二极管两端加上规定的反向电压但未击穿时的反向电流值。通常希望 I_R 愈小愈好, I_R 愈小,表明二极管的单向导电性愈好。由于反向电流是由少数载流子产生的,所以 I_R 受温度的影响特别大。

④ 最高工作频率 f_M f_M 的值主要决定于 PN 结结电容的大小,结电容愈大,则二极管的最高工作频率 f_M 愈低。而工作频率超过 f_M 时,二极管的单向导电性将得不到很好体现。

⑤ 极间电容 C_j 指二极管的结电容,它是势垒电容和扩散电容的总和,直接影响 f_M 的大小。

例如,国产检波二极管 2AP1 的参数为

$$I_F = 16\text{mA}, U_R = 20\text{V}, U_{BR} \geq 40\text{V}, I_R \leq 250\mu\text{A}, f_M = 15\text{MHz}, C_j \leq 1\text{pF}$$

值得注意的是,由于制造工艺的限制,即使同一型号的管子,参数的离散性也很大,手册上往往给出的是参数的范围。另外还要注意的,手册上给出的参数是在一定的测试条件下测得的,条件不同,参数也会发生变化。

各种不同类型二极管的参数可查阅有关厂家提供的产品手册。

1.1.4 特殊二极管

除前面讨论的普通二极管外,还有一些特殊功能的二极管,如稳压二极管、变容二极管、光电二极管及发光二极管等,现分别介绍如下。

1. 稳压二极管

由二极管伏安特性可知,如果二极管工作在反向击穿区,其特性曲线非常陡直,即反向电流可以有较大的变化,其两端的反向电压变化量却很小,此时二极管有“稳压”作用,利用这一