



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Electronic and Circuit Foundation

李立华 主编

李永华 许晓东 王丹志 副主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

电子电路基础

李立华 主 编
李永华 许晓东 王丹志 副主编

北京邮电大学出版社
·北京·

目 录

第 1 章 半导体基础知识和二极管

1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.2 PN 结原理及特性	4
1.2.1 PN 结的形成原理	4
1.2.2 PN 结的导电特性	5
1.3 半导体二极管	7
1.3.1 二极管特性	7
1.3.2 二极管的模型	9
1.3.3 二极管的等效电阻	10
1.3.4 稳压二极管	12
1.3.5 其他类型二极管	14
1.4 小结	15
习题	15

第 2 章 双极型晶体管和基本双极型晶体管放大器

2.1 双极型晶体管	18
2.1.1 BJT 结构	18
2.1.2 BJT 特性	19
2.1.3 BJT 工作模式	20
2.2 BJT 直流偏置	21
2.2.1 直流分析	21
2.2.2 图解法	24
2.3 BJT 交流分析	27
2.3.1 放大器基本原理	27
2.3.2 交流小信号等效电路	27
2.4 基本 BJT 放大器	28
2.4.1 BJT 放大器工作组态	29
2.4.2 共射极放大器	36
2.4.3 共集电极放大器	40

2.4.4 共基极放大器	42
2.5 三种基本放大器组态:小结及比较	44
2.6 小结	45
习题	46

第3章 场效应管

3.1 简介	51
3.2 场效应管的特性	51
3.2.1 结型场效应管	51
3.2.2 绝缘栅耗尽型场效应管	53
3.2.3 绝缘栅增强型场效应管	53
3.3 场效应管的直流电路分析	54
3.3.1 共源放大电路	55
3.3.2 自偏置电路	56
3.4 场效应管的交流等效分析	57
3.4.1 场效应管的小信号等效模型	58
3.4.2 共源极放大电路	58
3.4.3 自偏置电路	59
3.5 小结	60
习题	61

第4章 差分放大器和多级集成电路放大器

4.1 镜像电流源	62
4.1.1 典型的镜像电流源	62
4.1.2 镜像电流源的应用	63
4.2 差分放大器	64
4.2.1 差分对的结构	64
4.2.2 直流分析	65
4.2.3 交流小信号等效电路分析	66
4.2.4 共模抑制比	67
4.2.5 带有源负载的差分放大器	68
4.3 多级放大器	68
4.3.1 耦合模式	68
4.3.2 直流偏置与多级放大器分析	70
4.3.3 多级放大器的交流分析	71
4.3.4 多级集成电路放大器的应用	72
4.4 小结	72
习题	73

第 5 章 放大电路的频率响应

5.1 频率响应基础	76
5.1.1 中频带宽的定义	76
5.1.2 低通电路	77
5.1.3 高通电路	78
5.1.4 波特图	79
5.2 共射放大电路的低频响应	80
5.3 共射极放大电路的高频效应	82
5.3.1 三极管的高频等效模型	82
5.3.2 β 对高频响应的影响	84
5.4 小结	86
习题	86

第 6 章 反馈放大电路

6.1 反馈的基本概念	88
6.2 基本负反馈放大电路	90
6.2.1 负反馈放大电路的类型	90
6.2.2 负反馈放大电路的基本表达式	93
6.3 负反馈对放大电路性能的影响	95
6.3.1 对输入电阻的影响	95
6.3.2 对输出电阻的影响	95
6.3.3 对增益的影响	97
6.3.4 对通频带的影响	98
6.3.5 对非线性失真的影响	98
6.4 负反馈放大电路的分析方法	98
6.4.1 一般定量分析	98
6.4.2 深度负反馈放大电路的分析	98
6.5 小结	102
习题	103

第 7 章 功率放大电路

7.1 功率放大器简介	106
7.2 甲类功率放大器	107
7.3 乙类功率放大器	109
7.4 互补推挽乙类功率放大电路	112
7.5 小结	115
习题	115

第 8 章 运算放大器和电压比较器

8.1 运算放大器的组成和基本特性	117
8.1.1 运算放大器的组成和电路符号	117
8.1.2 运算放大器的主要参数	118
8.1.3 运算放大器的传输特性	119
8.2 理想运算放大器特性及分析方法	120
8.3 运算放大器的应用	121
8.3.1 比例运算电路	121
8.3.2 加法运算电路	122
8.3.3 减法运算电路	123
8.3.4 积分运算电路	124
8.3.5 微分运算电路	125
8.4 电压比较器	127
8.4.1 基本单限电压比较器	127
8.4.2 滞回电压比较器	128
8.5 小结	131
习题	132

第 9 章 实验

实验一 晶体管共射极单管放大电路	136
实验二 差动放大器	139
实验三 比例求和电路	141
实验四 RC 正弦波振荡电路	144
实验五 积分与微分电路	145
实验六 互补对称功率放大电路	147

参考文献	149
------------	-----

半导体器件是现代电子技术的重要组成部分,其中最基本的电子器件是 PN 结二极管。本章在简要介绍半导体基本知识的基础上,重点讨论 PN 结二极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数,并且利用二极管电路的一般特性及基本分析方法对简单的二极管电路进行分析。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 本征半导体

自然界中的物质按其导电性可以分为导体、绝缘体和半导体。常温时,半导体的导电特性介于导体和优良绝缘体之间。在电子器件中使用最为广泛的半导体材料是:硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)。物质的导电性与其原子结构有关。任何物质的原子都是由原子核及其外层电子构成,其中最外层电子称为价电子。

硅原子有 14 个电子,锗原子有 32 个电子,它们的原子结构如图 1.1 所示。硅原子和锗原子都有四个价电子,属于四价元素。

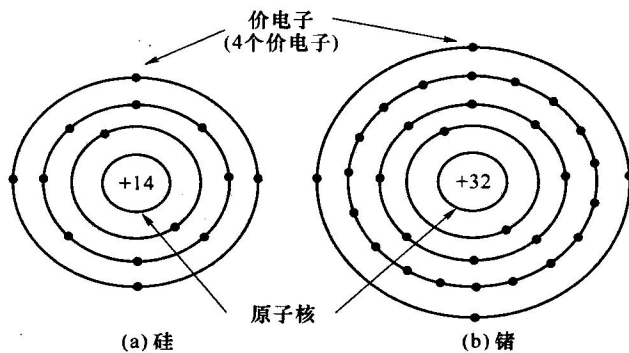


图 1.1 硅和锗原子结构模型

本征半导体即指纯净半导体晶体,是半导体经过一定的工艺过程提炼成的单晶体。在纯净的硅或锗晶体中,每一个原子都和相邻的四个原子在空间形成排列整齐的晶格结构。相邻

的两个原子共用一对价电子,称为共价键,如图 1.2 所示。

晶体中的共价键具有很强的结合力,在常温下仅有少数的价电子受热激发得到足够的能量,挣脱共价键的束缚变成为自由电子。当一个价电子挣脱共价键的束缚成为一个自由电子的同时,在共价键中留下了一个空位,称为空穴。带有空穴的原子因失掉一个价电子而带正电。相邻的共价键中的价电子受热可以移至有空穴的共价键内,而在原来的位置产生新的空穴,这种情况等效于空穴在晶体中的移动。我们可以认为空穴带正电,可以在晶体中自由移动,如图 1.3 所示。

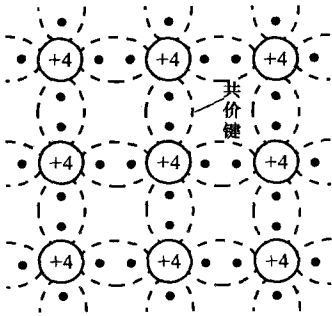


图 1.2 硅晶体共价键结构示意图

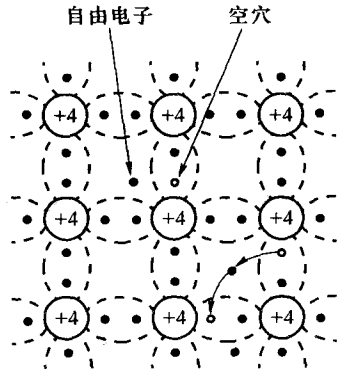


图 1.3 本征半导体中的自由电子和空穴

本征半导体在受热激发下产生自由电子和空穴对的现象称为本征激发或热激发。温度越高,热激发越强烈。另外,自由电子和空穴在运动过程中又可能释放能量,重新结合而成对消失,这种现象称为复合。自由电子和空穴的浓度越高,复合越频繁。在一定温度下,热激发和复合的速率相等时达到动态平衡。此时,自由电子和空穴的浓度(单位体积内的自由电子数或空穴数)是一定的,且相等,分别用 n_i 和 p_i 表示本征半导体中自由电子和空穴的浓度,则有

$$n_i = p_i \quad (1.1)$$

能够运载电荷的粒子称为载流子。在本征半导体中有两种载流子:带负电的自由电子和带正电的空穴。在无外加电场时,电子和空穴的移动都是杂乱无章的,因此对外部不呈现电流。在本征半导体两端外加一电场时,自由电子将产生定向移动,形成电子电流;同时,由于空穴的存在,价电子将按一定的方向依次填补空穴,等效空穴也产生与价电子移动方向相反的移动,形成空穴电流。本征半导体中的电流是两个电流之和。

由于半导体和导体在载流子上的区别,它们对温度的响应不同。导体具有正温度系数,即随着温度的升高其电阻值也变大。这是因为,温度升高并不能带来导体内载流子的增加,但是热运动的加剧却阻碍电流流过导体。然而,半导体材料具有负温度系数,即其电阻值随着温度的升高而降低。这是因为,随着温度的升高,热激发加剧产生更多的自由电子和空穴,使得载流子的数量增加,因此导电能力增强。半导体材料中的热激发强烈地依赖于环境温度,并影响载流子的浓度,这是半导体器件工作时热不稳定性的根本原因。

常温下,由热激发产生的自由电子和空穴数量与原子密度相比是很少的,所以本征半导体的导电能力很差。例如,硅晶体每立方厘米体积内含有约 5×10^{22} 个原子,而在室温下,自由电子的浓度仅有每立方厘米约 1.45×10^{10} 个。

由于硅材料的广泛应用,在本书中,我们将以硅材料为例进行说明。其他半导体材料的物

理特性是相似的。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入少量的其他元素(称为杂质),可以显著增加载流子(自由电子或空穴)的浓度,从而使半导体的导电性能显著增强,这种过程称为掺杂。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。通过控制掺入杂质的浓度,可以获得各种性能的半导体材料。根据掺入杂质元素的不同,可形成两种杂质半导体: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的五价元素,如磷、锑或砷,就形成N型半导体。例如,在硅晶体中掺入少量磷元素得到N型硅半导体,其晶格结构如图1.4所示,一个五价磷原子取代一个硅原子在晶体中的位置,并且其四个价电子与相邻的4个硅原子构成共价键,余下一个特殊的价电子受到磷原子的束缚非常弱。因此,在常温下,这个特殊的价电子很容易摆脱杂质原子的束缚成为自由电子。磷原子失去一个电子后,成为带正电荷的正离子,它在晶格中是不能移动的。由于五价元素能够贡献出一个自由电子,而被称为施主杂质。在N型半导体中,虽然有由热激发产生的少量电子-空穴对,但是由于施主杂质贡献出了大量自由电子,因此,自由电子的浓度大于空穴的浓度。因此,在N型半导体中,自由电子成为多数载流子,简称多子;空穴为少数载流子,简称少子。五价元素的原子被称为施主原子;而施主原子贡献出一个电子后成为施主离子。N型半导体中,空穴的浓度用 p 表示,自由电子的浓度用 n 表示,施主杂质的浓度用 N_D 表示,则自由电子的浓度等于空穴和施主杂质的浓度之和,即

$$n = p + N_D \quad (1.2)$$

由于由本征激发产生的自由电子的浓度(等于空穴的浓度)很低,自由电子的浓度主要决定于施主原子的浓度。N型半导体主要靠自由电子导电。因此,通过控制掺入杂质的多少,便可以控制多子的数量,从而控制半导体材料的导电性能。

(2) P型半导体

在本征半导体中掺入少量的三价元素,如硼、镓或铟,就形成P型半导体。例如,在硅晶体中掺入少量硼元素得到P型硅半导体,其晶格结构如图1.5所示,一个三价硼原子取代一个硅原子在晶体中的位置,并且其三个价电子与相邻的四个硅原子中的三个构成共价键,并且由于缺少一个价电子而与第四个相邻硅原子组成的共价键中产生了一个空位。在常温下,这个空位很容易被附近硅原子的价电子在热激发下填补。硼原子接受一个电子后,成为带负电荷的正离子,它在晶格中是不能移动的。同时,在硅原子的共价键中也产生了一个带有正电荷的空穴,能够在晶体中自由移动。由于三价元素能够通过吸收电子产生空穴,而被称为受主杂质。在P型半导体中,虽然有由热激发产生的少量电子-空穴对,但是由于受主杂质产生了大量空穴,因此,空穴的浓度大于自由电子的浓度。因此,在P型半导体中,空穴成为多子;自由电子为少子。三价元素的原子被称为受主原子;而受主原子吸收一个电子后成为受主离子。P型半导体中,空穴的浓度用 p 表示,自由电子的浓度用 n 表示,受主杂质的浓度用 N_A 表示,则空穴的浓度等于自由电子和受主杂质的浓度之和,即

$$p = n + N_A \quad (1.3)$$

由于由本征激发产生的空穴的浓度(等于自由电子的浓度)很低,空穴的浓度主要决定于受主原子的浓度。P型半导体主要靠空穴导电。因此,通过控制掺入杂质的多少,便可以控制

空穴的数量,从而控制半导体材料的导电性能。

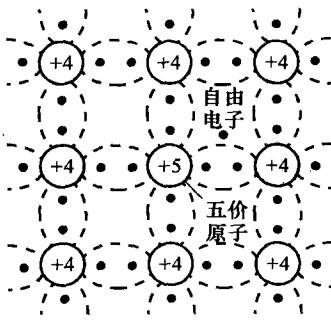


图 1.4 N 型半导体原子结构示意图

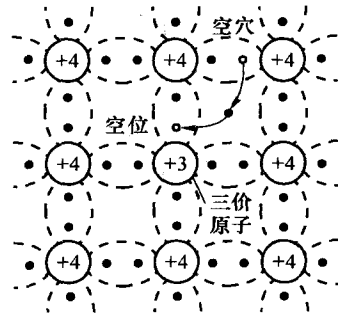


图 1.5 P 型半导体原子结构示意图

(3) Mass-Action 定律

在掺杂半导体中,已经证明,当半导体处于平衡状态下,其自由电子浓度和空穴浓度的乘积在一定温度下是一个常数,这被称为 Mass-Action 定律,即满足以下关系式

$$pn = p_i n_i \quad (1.4)$$

其中, p_i 和 n_i 分别表示本征半导体中空穴和自由电子的浓度。将式 (1.1) 代入式 (1.4), 可得

$$pn = p_i^2 \text{ 或 } pn = n_i^2 \quad (1.5)$$

1.2 PN 结原理及特性

1.2.1 PN 结的形成原理

将一块本征半导体的一半掺杂为 N 型,而另一半掺杂为 P 型,在它们的交界面就形成 PN 结。在 PN 结中,N 区的自由电子浓度远远高于 P 区,而 P 区的空穴浓度也远远高于 N 区。在浓度差的作用下,N 区的自由电子越过交界面向 P 区移动,而 P 区的空穴向 N 区移动,这种移动称为扩散运动。显然,多子进行扩散运动。多子扩散到对方后成为少子,会与对方的多子进行复合,即扩散到 P 区的自由电子与空穴复合,使得在 P 区一侧因失去空穴而留下不能移动的负离子,扩散到 N 区的空穴与自由电子复合,使得 N 区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子。这些不能移动的带电粒子称为空间电荷,它们集中在 P 区和 N 区交界面附近,形成了一个很薄的耗尽层,称为 PN 结,如图 1.6 所示。耗尽层又称空间电荷区,是一个高阻区。在空间电荷区,P 区一侧呈现负电荷,N 区一侧呈现正电荷,因此空间电荷区出现了方向由 N 区指向 P 区的电场,由于这个电场是多子扩散运动形成的,而不是外加电压形成的,故称为内电场。内电场的建立一方面将阻碍多子的扩散,另一方面也使得 P 区和 N 区的少子一旦进入空间电荷区时,便在内电场的作用下作定向运动,使 P 区的电子进入 N 区,使 N 区的空穴进入 P 区。这种少子在电场作用下的定向运动称为漂移运动。随着扩散运动的进行,空间电荷区变宽,内电场增强,一方面阻止扩散运动的进行,而另一方面有利于增强少子的漂移运动,直到漂移运动和扩散运动达到动态平衡,即参与漂移运动的少子数目等于参与扩散运动的多子数

目。这时,在交界面形成了稳定的空间电荷区,即PN结处于动态平衡。

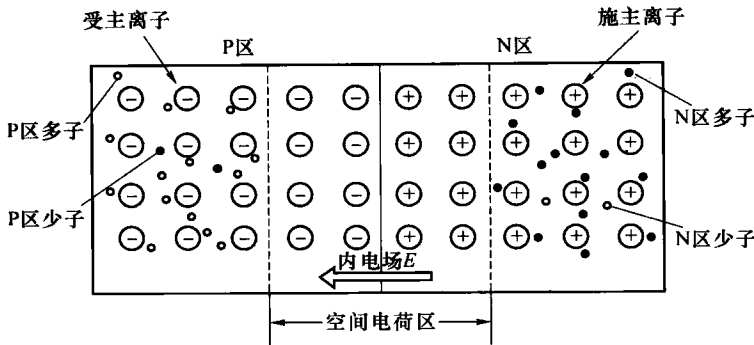


图 1.6 PN 结形成原理示意图

1.2.2 PN 结的导电特性

在无外电场作用下,PN 结内部由扩散形成的扩散电流与由少子漂移形成的漂移电流,大小相等,方向相反,因此在外部呈现出电流为零。如果在 PN 结的两端外加电压,扩散电流将不再等于漂移电流,PN 结将有电流流过。外加电压极性不同,PN 结表现出截然不同的导电性能。

(1) 外加正向电压(正向偏置)

当电源正极接 P 区,负极接 N 区时,称为给 PN 结加正向电压,也称正向偏置,如图 1.7 所示。外加正向电压在 PN 结上产生一个外电场,其方向与内电场相反,推动 N 区的自由电子要向 PN 结扩散,并与原来空间电荷区的正离子中和,同时,P 区的空穴也要向 PN 结扩散,并与原来空间电荷区的负离子中和。从而使空间电荷区变窄,削弱了内电场,破坏了 PN 结原来的动态平衡,使扩散运动增强,而漂移运动减弱。同时,电源不断向 P 区补充正电荷,向 N 区补充负电荷。正向偏置电压越大,空间电荷区越窄,直到一定程度下,大量的扩散运动源源不断地进行,在电路中形成了较大的正向电流,PN 结导通,如图 1.7 所示。PN 结导通时,降在 PN 结上的压降 U_D 只有零点几伏,用以克服内电场对扩散电流的阻碍,而正向电流随着正向电压 U_D 的增大而急剧增大。

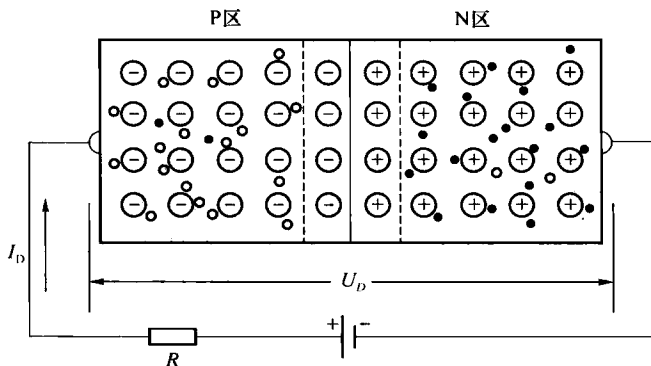


图 1.7 外加正向电压的 PN 结

(2) 外加反向电压(反向偏置)

当电源正极接 N 区, 负极接 P 区时, 称为给 PN 结加反向电压, 也称反向偏置, 如图 1.8 所示。外加反向电压产生的外加电场的方向与内电场的方向相同, 从而将 P 区的空穴和 N 区的自由电子从 PN 结附近拉走, 使空间电荷区加宽, PN 结内电场加强, 使得多子扩散运动难以进行, 扩散电流减小为零。从而在电源的作用下, 通过 PN 结的电流, 主要是少子形成的漂移电流, 称为反向电流, 如图 1.8 所示。在常温下, 由于少子的数量很少, 即使所有少子都参与漂移运动, 反向电流也非常小, 而且当反向电压在一定范围内变化时, 它几乎不随外加电压的变化而变化, 因此反向电流又称为反向饱和电流。在近似分析中, 常将反向电流忽略不计, 因此认为 PN 结外加反向电压时, 处于截止状态。

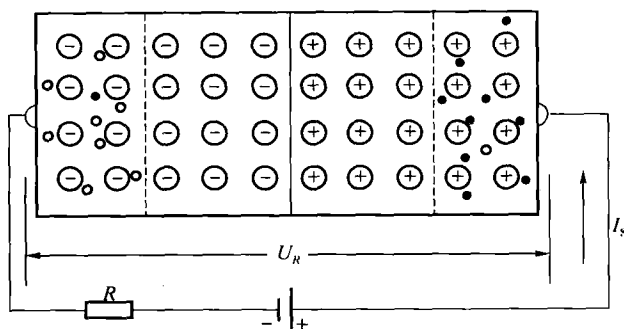


图 1.8 外加反向电压的 PN 结

值得注意的是, 由于本征激发随温度的升高而加剧, 导致少子增多, 因而反向电流将随温度的升高而成倍增长。

综上所述, PN 结正偏时, 正向电流较大, 相当于 PN 结导通, 反偏时, 反向电流很小, 相当于 PN 结截止, 这称为 PN 结的单向导电性。

(3) PN 结的电容效应

PN 结具有一定的电容效应, 它由两方面的因素决定, 一是势垒电容, 二是扩散电容。

① 势垒电容 C_T

势垒电容是由空间电荷区形成的。当外加电压使 PN 结上压降发生变化时, 空间电荷区的厚度也相应地随之改变, 这相当于 PN 结中存储的电荷量也随之变化, 犹如电容的充放电, 该效应用势垒电容来表示。势垒电容不是固定不变的, 它随着外加偏置电压的变化而变化。反偏结电容主要体现为势垒电容。

② 扩散电容 C_D

扩散电容是由多子扩散后, 在空间电荷区的另一侧面积累而形成的。正偏结电容主要体现为扩散电容。因 PN 结正偏时, 由 N 区扩散到 P 区的电子堆积在 P 区内紧靠 PN 结的附近, 形成一定的多子浓度梯度分布。反之, 由 P 区扩散到 N 区的空穴, 在 N 区内也形成类似的浓度梯度分布。当外加正向电压不同时, 扩散电流不同。所以 PN 结两侧堆积的多子的浓度梯度分布也不同, 这就相当于电容的充放电过程。

势垒电容和扩散电容均是非线性电容, 它们随外加偏置电压的变化而非线性变化, 如图 1.9 所示。

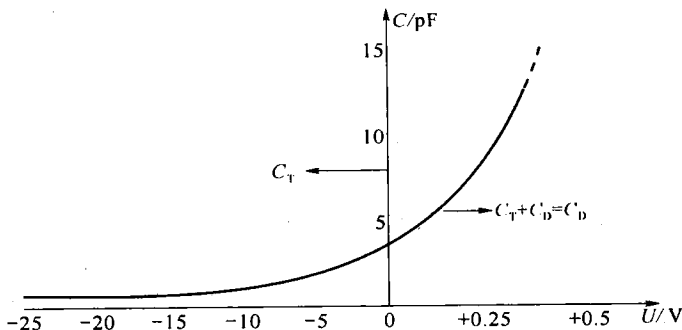


图 1.9 势垒电容和扩散电容随外加偏置电压的变化

1.3 半导体二极管

1.3.1 二极管特性

将 PN 结封装起来,并加上电极引线就构成了半导体二极管,简称二极管,电路符号及其极性和电流方向如图 1.10 所示。由 P 区引出的电极称为正极, N 区引出的电极为负极。

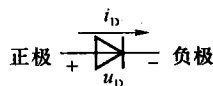


图 1.10 二极管的电路符号

(1) 二极管的伏安特性曲线

加在二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的关系曲线称为伏安特性曲线,如图 1.11 所示。 $u_D > 0$ 的部分称为正向特性, $u_D < 0$ 的部分称为反向特性。与 PN 结一样,二极管具有单向导电性。

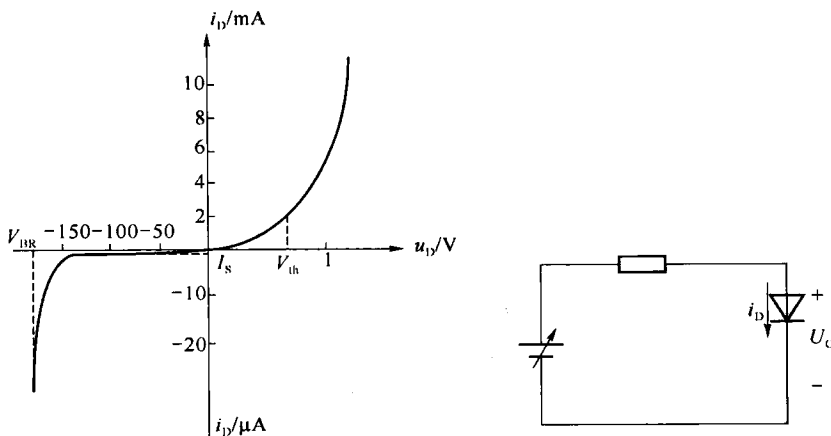


图 1.11 二极管的伏安特性曲线

① 正向特性

当 $u_D > 0$, 即处于正向特性区域。当正向电压值较小时,即 $0 < u_D < V_{th}$ 时,正向电流极小;当电压超过 V_{th} 时,即 $u_D > V_{th}$ 时,开始出现正向电流,并按指数规律增长。通常称 V_{th} 为二极管的开启电压。在常温下,硅二极管的开启电压为 0.7 V 左右,锗二极管的开启电压为 0.3 V 左右。

② 反向特性

当 $u_D < 0$ 时,即处于反向特性区域。当反向电压值较小时,即 $V_{BR} < u_D < 0$ 时,反向电流很小,且基本不随反向电压的变化而变化,该电流值为反向饱和电流 I_S 。当反向电压超过某个值时,即 $u_D \geq V_{BR}$ 时,反向电流急剧增加,称之为反向击穿, V_{BR} 称为反向击穿电压。

(2) 击穿现象

反向击穿按机理可分为雪崩击穿和齐纳击穿两类。

雪崩击穿:当反向电压较高时,PN 结内电场很强,使得空间电荷区作漂移运动的少子获得很大的动能,从而当它与空间电荷区内的原子发生碰撞时,将其价电子撞出共价键,形成原子电离,产生新的“电子-空穴对”。这些新的“电子-空穴对”,又被强电场加速再去碰撞其他原子,产生更多的“电子-空穴对”。如此连锁反应,使结内载流子数由于雪崩效应而快速增加,并在反向电压作用下作漂移运动,形成很大的反向电流。这种击穿称为雪崩击穿。

齐纳击穿:齐纳击穿通常发生在掺杂浓度很高的 PN 结内。由于掺杂浓度很高,PN 结很窄,即使施加较小的反向电压(5 V 以下),内电场也很强。在强电场作用下,会破坏空间电荷区内的共价键结构,强行促使价电子从共价键中拉出来,形成“电子-空穴对”,从而产生大量的载流子,在反向电压的作用下,形成很大的反向电流,这种击穿称为齐纳击穿。如果掺杂浓度较低,空间电荷区较宽,不容易产生齐纳击穿。

采取适当的掺杂工艺,将硅二极管的雪崩击穿电压可控制在 8~1 000 V。而齐纳击穿电压低于 5 V。在 5~8 V 之间两种击穿可能同时发生。

(3) 二极管伏安特性的理论表达式

根据理论推导,二极管的伏安特性可用下式表示:

$$i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{V_T}} - 1) \quad (1.6)$$

其中, I_S 为反向饱和电流;

u_D 为二极管两端的电压;

$V_T = kT/q$,称为温度的电压当量(k 为玻耳兹曼常数, q 为电子电荷量, T 为热力学温度)。

对于室温(相当 $T=300$ K),则有 $V_T \approx 26$ mV。

由式(1.6)可见,正偏时,当正向电压大于 100 mV 时, $e^{\frac{u_D}{V_T}} \gg 1$,式(1.6)简化为

$$i_D \approx I_S e^{\frac{u_D}{V_T}} \quad (1.7)$$

反偏时,当反向电压大于 100 mV 时, $e^{\frac{u_D}{V_T}} \ll 1$,式(1.6)简化为

$$i_D \approx -I_S \quad (1.8)$$

即反向电流与外加电压无关,等于反向饱和电流。

(4) 二极管的主要参数

为了描述二极管的特性,器件手册通常会给出不同型号二极管的主要参数,常用的参数包括:

① **额定电流(I_F):**是指二极管长时间连续工作时,允许通过的最大正向平均电流,也称为最大整流电流。在二极管连续工作时,为使 PN 结的温度不超过某一极限值,整流电流不应超过标准规定的允许值,否则二极管容易烧毁。

② **反向峰值电压(PIV, V_{BR}):**是指二极管在工作中能承受的最大反向电压,它也是使二极管不致反向击穿的电压极限值。在一般情况下,最大反向工作电压应小于反向击穿电压。选用晶体二极管时,还要以最大反向工作电压为准,并留有适当余地,以保证二极管不致损坏。

③ 反向电流(I_s):是指二极管在规定的温度和最高反向电压作用下,流过二极管的反向电流,也称为反向饱和电流。值得注意的是反向电流与温度有着密切的关系,大约温度每升高 10°C ,反向电流增大一倍。

1.3.2 二极管的模型

(1) 理想模型

理想二极管的 $V-I$ 特性如图 1.12(a)所示,图 1.12(b)为其电路符号。对于理想二极管,在正向偏置时,其管压降为 0V ,相当于短路,电流值由其所在电路确定;反向偏置时,它的电阻为无穷大,电流为零,相当于开路。因此理想二极管表现为开关特性。

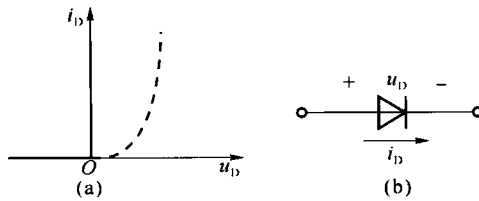


图 1.12 二极管的理想模型及其 $V-I$ 特性

(2) 恒压降模型

如果考虑二极管的开启电压,就形成恒压型 $V-I$ 特性,如图 1.13所示。当二极管导通后,其管压降认为恒定不变(硅管典型值为 0.7V),而电流由其所在电路确定。此模型提供了合理的近似,因此应用较广。

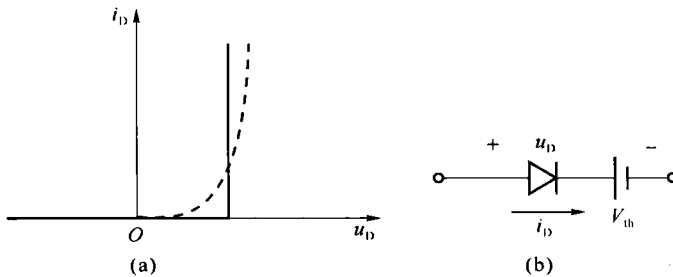


图 1.13 二极管的恒压降模型及其 $V-I$ 特性

(3) 折线模型

对恒压降模型作一定的修正,将二极管导通部分近似认为二极管两端电压随二极管电流的增加而线性增加,即得二极管折线模型。等效电路如图 1.14所示。

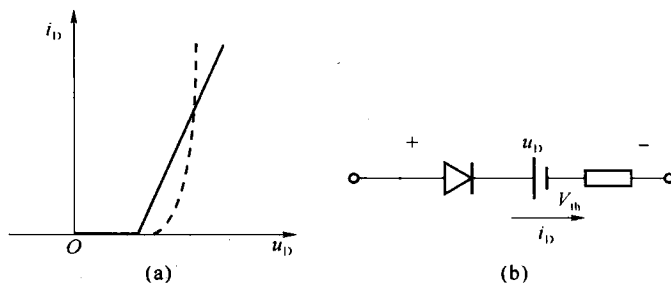


图 1.14 二极管的折线模型及其 $V-I$ 特性

1.3.3 二极管的等效电阻

为了便于分析,在一定条件下,将二极管的端电压和其电流之间的关系用电阻来表示,称为等效电阻。由于二极管具有非线性伏安特性,对于直流信号和交流信号的响应不同。

(1) 直流等效电阻

如图 1.15 所示,在二极管的两端加直流电压 U_Q ,产生直流电流 I_Q ,称为直流工作点或静态工作点,即 Q 点。直流等效电阻 R_D 定义为

$$R_D = \frac{U_Q}{I_Q} \quad (1.9)$$

直流等效电阻也称为静态等效电阻,等于直线 OQ 的斜率的倒数,并且随工作点的改变而发生变化。

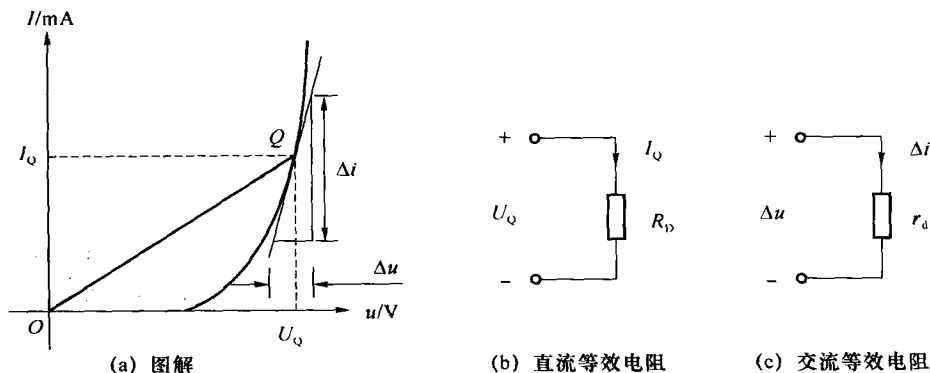


图 1.15 二极管的等效电阻

(2) 交流等效电阻

如图 1.15 所示,在直流工作点 Q 确定后,在二极管两端加上幅度变化范围为 Δu 的交流电压,则产生幅度变化范围为 Δi 的交流电流。对于交流小信号,交流等效电阻 r_d 定义为

$$r_d = \left. \frac{\Delta u}{\Delta i} \right|_Q \approx \left. \frac{du}{di} \right|_Q \quad (1.10)$$

即当二极管的直流工作点 Q 确定后,交流等效电阻 r_d 等于 Q 点切线斜率的倒数,并且, r_d 也随着工作点的改变而发生变化。

r_d 的数值还可从二极管的 $V-I$ 特性表达式导出。根据式(1.6),可得

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{di_D}{du_D} \right|_Q = \frac{I_Q}{V_T}$$

由此可得

$$r_d = \frac{V_T}{I_Q} \quad (1.11)$$

在常温情况下,二极管在 Q 点的交流等效电阻为

$$r_d \approx \frac{26 \text{ mV}}{I_Q}$$

例 1.1 理想二极管组成的电路如图 1.16(b)所示,设电路的输入电压 u_i 如图 1.16(a)所示,画出输出电压 u_o 的波形,计算 u_o 的直流分量 V_{DC} ,该电路对二极管的反向峰值电压 PIV 要求如何?

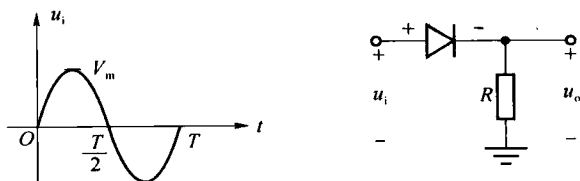


图 1.16 例 1.1 图

解:由理想二极管的单向导电性可知,在输入信号的一周内,输入信号正半周 $u_i > 0$,二极管导通,等效为短路,等效电路如图 1.17(a)所示,此时有 $u_o = u_i$;输入信号负半周 $u_i < 0$,二极管截止,等效为开路,等效电路如图 1.17(b)所示,此时有 $u_o = 0$,而二极管的端电压为反向电压,最大值为 V_m ,因此为了防止二极管远离击穿区,应选择二极管的反向峰值电压 $\text{PIV} > V_m$ 。每一周都如此,因此输出电压 u_o 的波形如图 1.17(c)所示。

电压 u_o 的均值即为其所含直流分量的大小,因此有

$$U_{\text{DC}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_o(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin\theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} \approx 0.318 V_m$$

通过对例 1.1 的分析可见,输入信号为正半周时有输出,负半周时无输出。这种只有半个周期输出的正弦波信号称为半波整流正弦波信号,这种电路称为半波整流电路。与输入正弦波相比,半波整流正弦波信号中含有直流分量,如果通过滤波器提取出该直流分量,可以形成直流输出。这种将交流电变为直流电的过程称为整流。

例 1.2 理想二极管组成的电路如图 1.18(b)所示,设电路的输入电压 u_i 如图 1.18(a)所示,画出输入电压 u_o 的波形,计算 u_o 的直流分量。

解:由理想二极管的单向导电性可知,在输入信号的一周内,输入信号正半周 $u_i > 0$,二极管 VD_2 和 VD_4 导通, VD_1 和 VD_3 截止,等效电路如图 1.19(a)所示,此时有 $u_o = u_i$;输入信号负半周 $u_i < 0$,二极管 VD_1 和 VD_3 导通, VD_2 和 VD_4 截止,等效电路如图 1.19(b)所示,此时有 $u_o = -u_i$ 。每一周都如此,因此输出电压 u_o 的波形如图 1.19(c)所示。

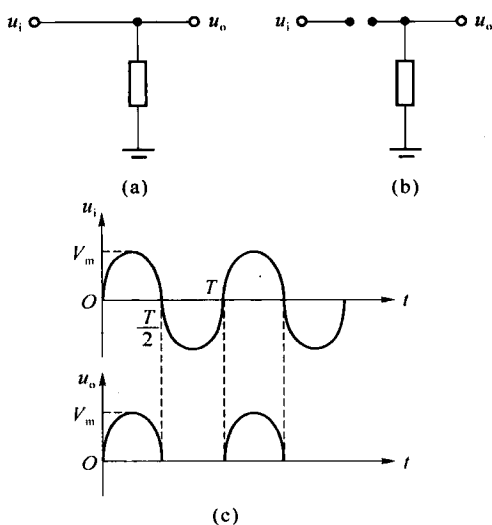


图 1.17 例 1.1 图

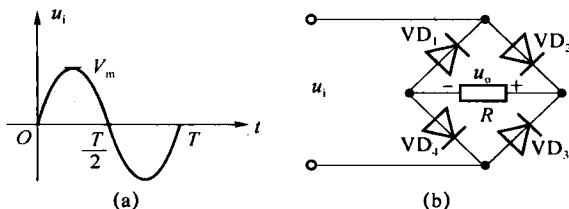


图 1.18 例 1.2 图