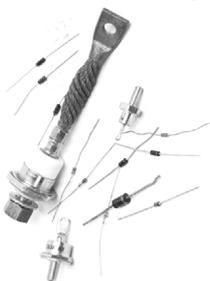
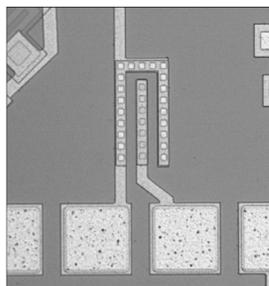


本章目标

- 理解二极管结构及基本版图
- 介绍 pn 结二极管的电学特性
- 研究各种二极管模型,包括数学模型、理想模型及恒定压降模型
- 理解二极管的 SPICE 描述及二极管的模型参数
- 定义二极管的工作区,包括正向偏置、反向偏置及反向击穿
- 在电路分析中应用不同模型
- 研究不同类型二极管,包括齐纳二极管、变容二极管、肖特基势垒二极管、太阳能电池和发光二极管
- 讨论 pn 结二极管的动态开关行为
- 介绍二极管整流器
- 二极管电路 SPICE 模拟练习



二极管分类图



二极管的制造

固态 pn 结二极管是首先需要研究的电子器件。二极管是一种非常重要的器件,用途广泛,可以实现交流直流转换(整流)、太阳能发电及射频中的高频混频器通信等功能。此外, pn 结二极管是构建其他固态器件的基础。在后面几章我们将学到,利用两个紧密耦合的二极管可以形成双极结型晶体管(BJT)。另外,利用两个晶体管还可以作为构成金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)或结型场效应晶体管(JFET)的主要部分。只有理解了二极管的特性,才能更好地理解场效应晶体管和双极型晶体管,进而利用它们设计数字逻辑电路和模拟放大器。

pn 结二极管通过 p 型半导体材料和 n 型半导体材料在交界面附近的过渡区制成。肖特基二极管是另一种形式的二极管,通过在金属(如铝、钼、铂等)和 n 型或 p 型半导体之间形成非欧姆接触而形成。

本章主要对这两种二极管进行研究。真空二极管是早期出现的二极管,出现在半导体二极管以前,现在很少使用,但在有些高压环境中仍在使用。

pn 结二极管是一种非线性器件,也是多数人学习电子学时接触的第一种非线性器件。二极管是一种双端电子器件,类似于电阻,但描述通过二极管的电流与其两端电压关系的 $I-V$ 特性不是直线关系。利用二极管的这一非线性特性可以实现许多用途,如整流、混频及波形整理等。二极管还用于实现逻辑与(AND)和逻辑或(OR)等基本逻辑操作。

本章从 pn 结二极管的基本结构、工作原理及端口特性展开讨论,进而引入晶体管建模的概念。本章介绍了几种不同的二极管模型,用以分析二极管电路的工作原理。本章开始阶段的内容,旨在培养读者对于二极管的一些感性认识,使读者能够在二极管众多的复杂特性中简化电子电路的分析与设计。接下来的内容是对二极管电路知识的扩展,包括对二极管在整流器中的具体应用。另外,齐纳二极管、光电二极管、太阳能电池及发光二极管的特性在本章中都有介绍。

3.1 pn 结二极管

在制造过程中,将 p 型半导体与 n 型半导体区域紧密接触,就得到 pn 结二极管(pn junction diode),如图 3.1 所示。二极管采用的掺杂工艺在第 2 章最后一节中已经讲解。

在掺杂浓度为 N_D 的 n 型硅片上选择某一区域渗入浓度为 N_A 的受主杂质,并且 $N_A > N_D$,使之转化成 p 型半导体,这样该硅片就形成了实际的双二极管。其中,p 型区与 n 型区的交界点称为冶金结,p 型区称作二极管的阳极(Anode),n 型区称作二极管的阴极(Cathode)。

二极管的电路符号如图 3.2 所示,左端为二极管的 p 型区,右端为二极管的 n 型区,箭头指向二极管中正电流的方向。

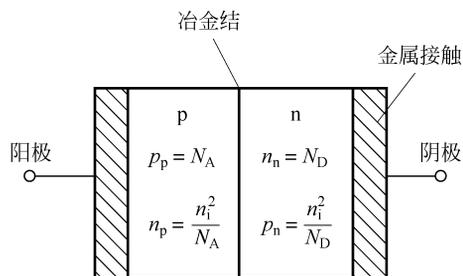


图 3.1 基本的 pn 结二极管

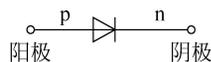


图 3.2 二极管电路符号

3.1.1 pn 结静电学

对于图 3.1 所示的 pn 结二极管,假设 p 型区掺杂浓度 $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$,n 型区掺杂浓度 $N_D = 10^{16}/\text{cm}^3$ 。pn 结两侧的空穴和电子浓度分别为

$$\begin{aligned} \text{p 型区: } p_p &= 10^{17} \text{ 空穴 } / \text{cm}^3 & n_p &= 10^3 \text{ 电子 } / \text{cm}^3 \\ \text{n 型区: } p_n &= 10^4 \text{ 空穴 } / \text{cm}^3 & n_n &= 10^{16} \text{ 电子 } / \text{cm}^3 \end{aligned} \quad (3.1)$$

如图 3.3(a)所示,冶金结的 p 型区空穴浓度非常大,而 n 型区空穴浓度非常小。同样,冶金结的 n 型区电子浓度很大,而 p 型区电子浓度很小。

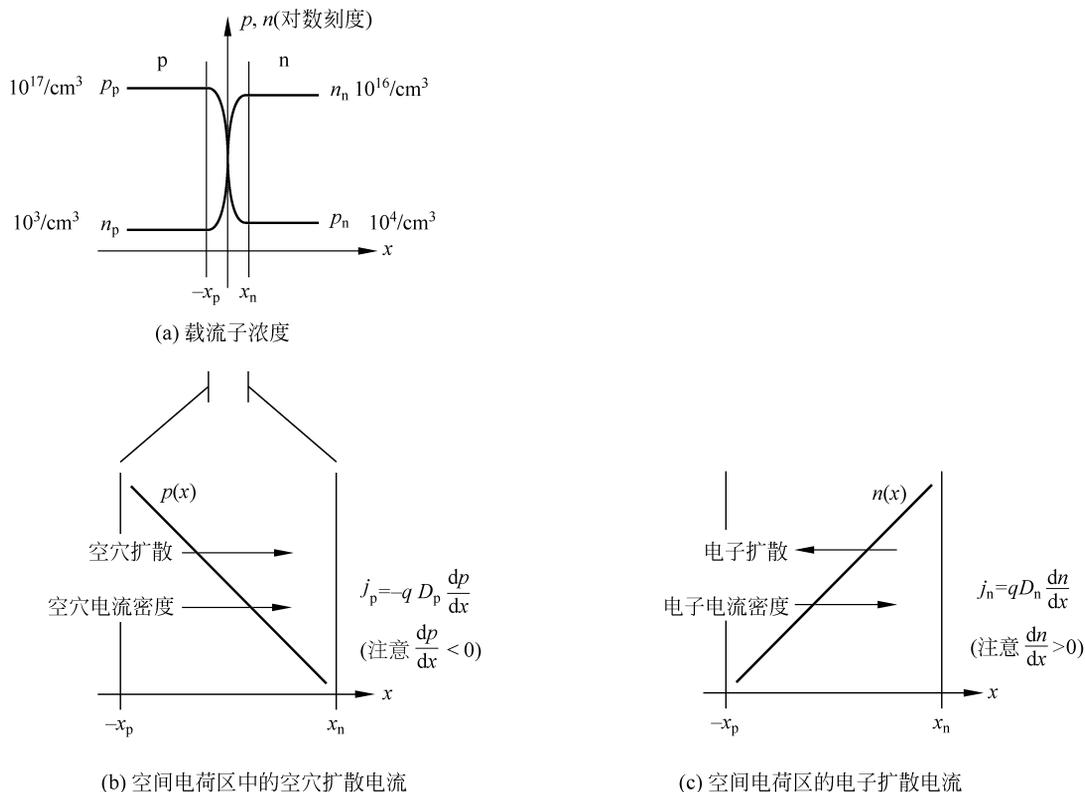


图 3.3 空穴与电子扩散电流

根据第 2 章扩散的相关知识可知,空穴从高浓度的 p 型区向低浓度的 n 型区扩散,电子从高浓度的 n 型区向低浓度的 p 型区扩散,如图 3.3(b)和(c)所示。如果扩散过程持续进行,半导体中最终会达到电子和空穴浓度的平衡。注意,空穴和电子两种扩散引发的电流都是朝着 x 轴的正向方向,但这与二极管开路时端电流为零相矛盾。

因此,半导体中必将建立起另一种竞争机制以平衡扩散电流。第 2 章所提到的漂移电流正是平衡扩散电流的另一种竞争机制。如图 3.4 所示,由于冶金结的存在,运动的空穴离开 p 型区,留下不可动的带负电的受主原子。同时,运动的电子离开 n 型区,留下不可动的带正电的离化受主原子。这样可动载流子在冶金结两侧耗尽,就形成了空间电荷区(Space Charge Region, SCR)。空间电荷区也称作耗尽区(Depletion region)或耗尽层(Depletion layer)。

在电磁学中,空间电荷密度为 ρ_c (单位为 C/cm^3)的区域存在的电场强度为 E (单位为 V/cm),运用高斯定理可得

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho_c}{\epsilon_s} \quad (3.2)$$

其中, ϵ_s (单位为 F/cm)是常数,代表半导体的介电常数。式(3.2)在一维的情况下可以写为

$$E(x) = \frac{1}{\epsilon_s} \int \rho_c(x) dx \quad (3.3)$$

当 pn 结两侧掺杂均匀时二极管空间电荷和电场的分布情况如图 3.5 所示。在图 3.5(a)中, p 型区位于从冶金结的 $x=0$ 一直到 $x=-x_p$ 处,空间电荷密度为 $-qN_A$ 。n 型区位于从冶金结的 $x=0$ 一直

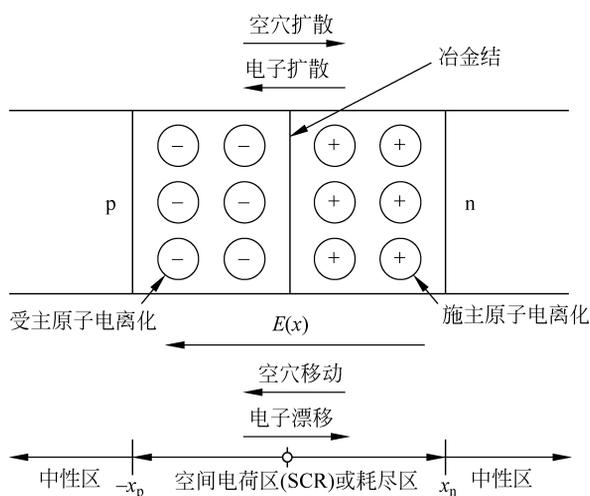
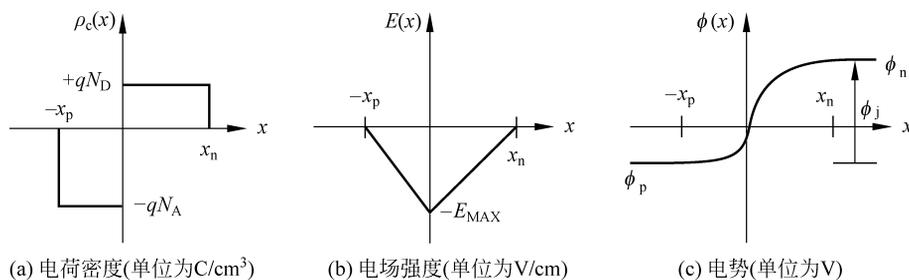


图 3.4 冶金结中的空间电荷区


 (a) 电荷密度(单位为 C/cm^3)

 (b) 电场强度(单位为 V/cm)

 (c) 电势(单位为 V)

图 3.5 pn 结空间电荷区

到 $x = +x_n$ 处,空间电荷密度为 $+qN_D$ 。由于二极管在总体上呈现电中性,则有

$$qN_A x_p = qN_D x_n \quad (3.4)$$

在耗尽区内部,电场强度与空间电荷密度的积分成正比,在耗尽区外的电中性区,电场强度为零。利用电场强度为零的边界条件,得到如图 3.5(b)所示的电场三角形分布。

电场的积分期限如图 3.5(c)所示,pn 结空间电荷区两侧存在的内建电势(Built-in potential)或结电势(Junction potential) ϕ_j 等于电场强度的积分,其关系为

$$\phi_j = -\int E(x) dx \quad \text{单位为 V} \quad (3.5)$$

其中, ϕ_j 表示二极管 n 型区和 p 型区的内部化学势之差^[1],可以表示为

$$\phi_j = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (3.6)$$

其中 $V_T = kT/q$ 为热电压(Thermal voltage),在第 2 章已经给出定义。

利用内建电势由式(3.3)~式(3.6)可以确定耗尽区总宽度 w_{do} 。

$$w_{do} = (x_n + x_p) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \phi_j} \quad \text{单位为 m} \quad (3.7)$$

从式(3.7)可以看出,耗尽层宽度(Depletion-layer width)主要由轻掺杂一侧的掺杂浓度决定。

例 3.1 二极管空间电荷区宽度

在二极管的制作过程中, pn 结两侧区域的掺杂浓度往往是不对称的, 使得耗尽层主要位于 pn 结的一侧, 被称为单侧阶跃结(One sided step junction)或者单侧突变结(One sided abrupt junction)。下面的例子主要针对这种 pn 结的空间电荷区宽度进行分析。

问题: 已知硅二极管的 p 型侧的杂质浓度为 $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$, n 型侧的杂质浓度为 $N_D = 10^{20}/\text{cm}^3$, 计算该二极管的内建电势和耗尽区宽度。

解:

已知量: p 型侧的杂质浓度 $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$; n 型侧的杂质浓度 $N_D = 10^{20}/\text{cm}^3$; 式(3.4)~式(3.7)的 pn 结相关理论公式。

未知量: 内建电势 ϕ_j 和耗尽区宽度 w_{do} 。

求解方法: 根据式(3.6)计算内建电势 ϕ_j , 然后将 ϕ_j 代入式(3.7)求出耗尽宽度 w_{do} 。

假设: 工作在室温状态下, $V_T = 0.025\text{V}$ 。n 型侧只有施主杂质, p 型侧只有受主杂质, pn 结两侧都均匀掺杂。

分析: 根据公式, 内建电势可以求出为

$$\phi_j = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = (0.025\text{V}) \ln\left[\frac{(10^{17}/\text{cm}^3)(10^{20}/\text{cm}^3)}{(10^{20}/\text{cm}^6)}\right] = 0.979\text{V}$$

对于硅半导体而言, $\epsilon_s = 11.7\epsilon_0$, 其中 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}\text{F/cm}$, 表示真空介电常数。

$$w_{do} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \phi_j}$$

$$w_{do} = \sqrt{\frac{2 \times 11.7 \times (8.85 \times 10^{-14}\text{F/cm})}{1.60 \times 10^{-9}\text{C}} \left(\frac{1}{10^{17}/\text{cm}^3} + \frac{1}{10^{20}/\text{cm}^3}\right) 0.979\text{V}} = 0.113\mu\text{m}$$

结果检查: 内建电势应当小于材料的禁带宽度(Band gap)。硅的禁带宽度约为 1.12V(参见表 2.3), 因此计算的内建电势数值合理。耗尽层宽度看起来很小, 但经重复验证后证明计算正确。

讨论: 本例中给出的数值在 pn 结中具有一定的代表性。对一般固态二极管的掺杂水平而言, 内建电势的范围一般在 0.5~1.0V, 总耗尽层宽度 w_{do} 变化很大, 重掺杂时可以为 $1\mu\text{m}$, 轻掺杂时可以达到几十微米。

练习: 已知硅二极管 p 型侧的掺杂浓度增加到 $N_A = 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 而 n 型侧的掺杂浓度为 $N_D = 10^{20}/\text{cm}^3$; 计算内建电势和耗尽区宽度。

答案: 1.05V; 0.0263 μm 。

3.1.2 二极管内部电流

电场方向与正电荷受力方向相同, 电子漂移沿 $+x$ 方向, 而空穴漂移沿 $-x$ 方向, 如图 3.4 所示。由于二极管端电流为零, 因此载流子的漂移和扩散在空间电荷区达到动态平衡, 空穴扩散和漂移平衡, 电子扩散和漂移平衡, 式(3.8)已经给出了平衡的机理, 对于平衡 pn 结电子电流密度和空穴电流密度均为 0。

$$j_n^T = qn\mu_n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} = 0 \quad \text{和} \quad j_p^T = qp\mu_p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \text{单位为 A/cm}^2 \quad (3.8)$$

图 3.5(c)中的电势差是结两侧空穴流和电子流的势垒。当在二极管两端施加电压时, 势垒发生变化, 打破了式(3.8)中的平衡状态, 会在二极管端点产生电流。

例 3.2 二极管的电场和空间电荷区

本例将计算二极管中电场的大小及 pn 结每一侧耗尽层的尺寸。

问题：计算例 3.1 中二极管的 x_n 、 x_p 和 E_{MAX} 。

解：

已知量：在 p 型侧 $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$ ；在 n 型侧 $N_D = 10^{20}/\text{cm}^3$ 。描述 pn 结的理论方程已经在式(3.4)~式(3.7)给出。从例 3.1 已知 $\phi_j = 0.979\text{V}$ 和 $w_{\text{do}} = 0.113\mu\text{m}$ 。

未知量： x_n 、 x_p 和 E_{MAX}

求解方法：使用式(3.4)和式(3.7)计算求 x_n 和 x_p ；利用式(3.5)求 E_{MAX} 。

假设：工作在室温条件下。

分析：由式(3.4)可以写出

$$w_{\text{do}} = x_n + x_p = x_n \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) \quad \text{和} \quad w_{\text{do}} = x_n + x_p = x_p \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)$$

求解方程，可解得 x_n 和 x_p 分别为

$$x_n = \frac{w_{\text{do}}}{\left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)} = \frac{0.113\mu\text{m}}{\left(1 + \frac{10^{20}/\text{cm}^3}{10^{17}/\text{cm}^3}\right)} = 1.13 \times 10^{-4}\mu\text{m}$$

和

$$x_p = \frac{w_{\text{do}}}{\left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} = \frac{0.113\mu\text{m}}{\left(1 + \frac{10^{17}/\text{cm}^3}{10^{20}/\text{cm}^3}\right)} = 0.113\mu\text{m}$$

式(3.5)表明内建电势等于图 3.5(b)中三角形下面的面积。三角形的高为 $-E_{\text{MAX}}$ ，底边为 $x_n + x_p = w_{\text{do}}$ ：

$$\phi_j = \frac{1}{2} E_{\text{MAX}} w_{\text{do}} \quad \text{和} \quad E_{\text{MAX}} = \frac{2\phi_j}{w_{\text{do}}} = \frac{2(0.979\text{V})}{0.113\mu\text{m}} = 173\text{kV/cm}$$

结果检查：根据式(3.3)和式(3.4)可知， E_{MAX} 也可以由掺杂水平和 pn 结两侧的耗尽层宽度求得。下面练习中给出的等式可以作为对本题结果的检验。

练习：由式(3.3)、图 3.5(a)及图 3.5(b)，可得最大电场为

$$E_{\text{MAX}} = \frac{qN_A x_p}{\epsilon_s} = \frac{qN_D x_n}{\epsilon_s}$$

用此公式求 E_{MAX}

答案：175kV/cm。

练习：已知硅二极管的 p 型区 $N_A = 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ；n 型区 $N_D = 10^{20}/\text{cm}^3$ 。内建电势 $\phi = 1.05\text{V}$ ， $w_{\text{do}} = 0.0263\mu\text{m}$ 。求 E_{max} 、 x_p 、 x_n 。

答案：798kV/cm； $5.16 \times 10^{-4}\mu\text{m}$ ； $0.0258\mu\text{m}$ 。

3.2 二极管的 I - V 特性

二极管的作用等效于机械阀门，只允许电路中的电流朝一个方向流动，阻止电流朝相反的方向流动。在电子电路设计中，二极管的这一非线性特性用途十分广泛。为了理解这种现象，需要了解二极管中的电流和外加电压之间的关系，这种关系称为二极管的 I - V 特性，将在本节及 3.3 节中先后给出示意

图和数学表达式。

二极管中的电流由加在二极管两端的电压决定。二极管外加电压的情况如图 3.6 所示,电压 v_D 表示施加在二极管两端的电压, i_D 表示流过二极管的电流。二极管的中性区相当于阻值较低的电阻,实际上外加电压几乎全部加载在 SCR 空间电荷区。

外加电压打破了式(3.8)所示的 pn 结上扩散电流和漂移电流的平衡,正向偏压使电子和空穴的势垒降低,如图 3.7 所示,使得电流能轻易穿过 pn 结。负向偏压使电子空穴势垒升高,也使得式(3.8)所示的扩散漂移平衡受到破坏,电流变得非常小。

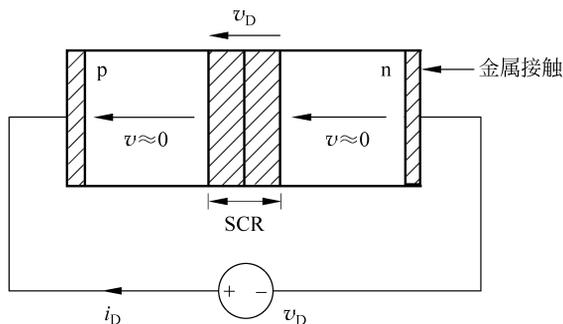


图 3.6 外加电压 v_D 的二极管

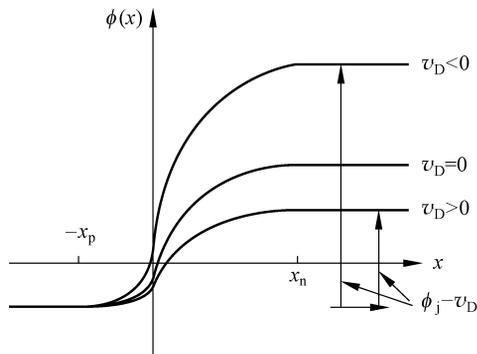


图 3.7 不同偏压下的 pn 结静电势

二极管 I - V 特性曲线表现出明显的非线性特点,如图 3.8 所示,当电压小于 0V 时,二极管完全不导通,此时 $i_D \approx 0$ A。随着电压增大到零以上,电流仍然接近零,直到电压 v_D 增大到超过 0.5~0.7V 时,电流才开始急剧增大,此时二极管两端的电压几乎与电流无关。使二极管显著导通需要的电压通常称为二极管的导通 (Turn-on 或 Cut-in voltage) 电压。

图 3.9 是图 3.8 中原点处特性曲线的放大图,可以看出特性曲线穿过原点,电压为零时,电流也为零。电压为负时,电流并非真为零。当电压小于 -0.1V 时,电流达到极值 $-I_s$ 。 I_s 称为反向饱和电流 (Reverse saturation current),也称二极管的饱和电流。

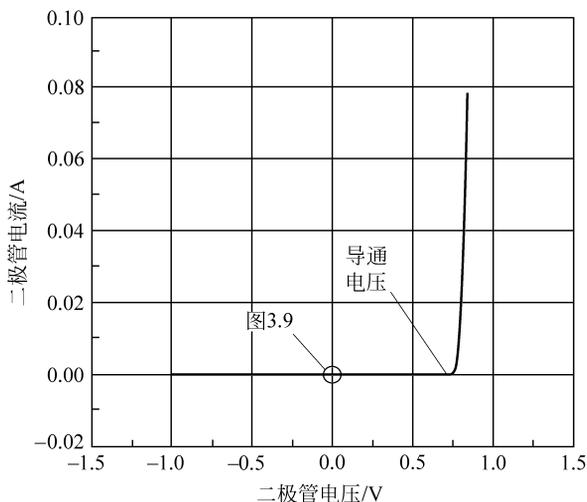


图 3.8 pn 结二极管的 I - V 特性曲线

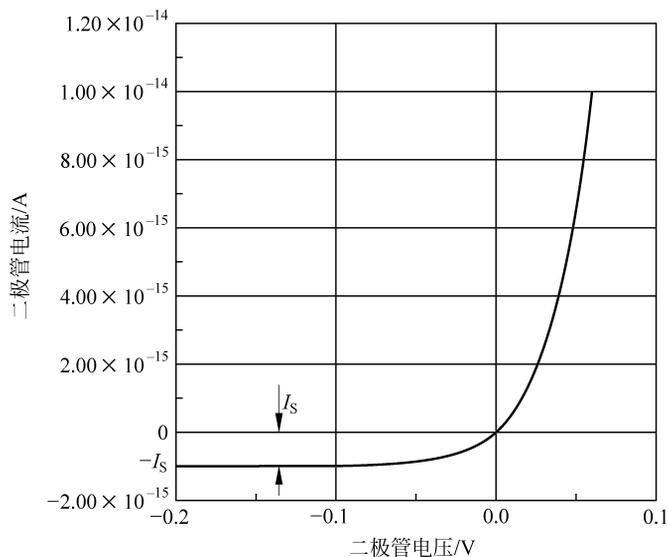


图 3.9 原点附近的二极管工作特性,其中 $I_s = 10^{-15} \text{ A}$, $n = 1$ (n 为非理想因数)

3.3 二极管方程：二极管的数学模型

在对含有二极管的电路进行手工计算和计算机分析时,利用对应的数学表达式或数学模型是非常有帮助的。图 3.8 和图 3.9 给出了 pn 结二极管的 I - V 特性。实际上,利用固态器件理论推导出的数学表达式与测量所得 pn 二极管的 I - V 特性高度一致。在本节,我们将学习这一非常重要的表达式,称为二极管方程(Diode equation)。

在图 3.10 中,对二极管施加正向电压 v_D ,二极管用图 3.2 所示的电路符号表示。利用式(3.8)可解得作为电子空穴浓度及结电压 v_D 函数的端电流,这里不做具体推导,所得二极管方程如式(3.9)所示,它是二极管 I - V 特性的数学模型:

$$i_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qv_D}{nkT}\right) - 1 \right] = I_s \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right] \tag{3.9}$$

其中, I_s 是二极管的反向饱和电流(单位为 A); T 是热力学绝对温度(单位为 K); v_D 是二极管的外加电压(单位为 V); n 是非理想因数; q 是电子电荷量($1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$); $V_T = kT/q$ 是热电压(单位为 V); k 是玻耳兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)。

流经二极管的总电流为 i_D ,二极管两端的电压降为 v_D 。图 3.10 中标出了端电压和电流的正方向。 V_T 是热电压,在第 2 章中已经学过,室温为 0.025V 时, I_s 是二极管的反向饱和电流,在图 3.9 中已经给出了说明。 n 是一个无量纲的常数,稍后详细介绍。通常来说,饱和电流的范围如下

$$10^{-18} \text{ A} \leq I_s \leq 10^{-9} \text{ A} \tag{3.10}$$

由器件物理相关知识可知,二极管电流正比于 n_i^2 ,其中 n_i 是本征半导体材料中的电子和空穴密度。第 2 章的式(2.1)表明 I_s 受温度影响很大,在 3.5 节中还会详细讲述。

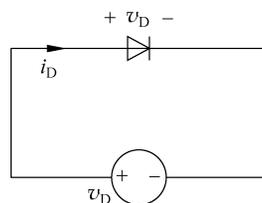


图 3.10 外加电压 v_D 的二极管

参数 n 称作非理想因数(Nonideality factor)。对于大多数硅二极管来说, n 在 1.0~1.1, 但当二极管工作在大电流密度时, n 值接近 2。后面除非特别说明, 否则默认 $n=1$, 因此二极管方程可以改写为

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.11)$$

在热力学绝对温度下, 很难辨别 n 的微小变化, 这也是本书假设 $n=1$ 的原因之一。下面的练习可以使读者对这一问题有更深入的理解。

练习: 已知当 $n=1$ 、 $T=300\text{K}$ 时, $n(kT/q)=25.9\text{mV}$ 。证明该计算结果。现假设 $n=1.03$, 求温度为多少时可以使 nV_T 达到同样的值?

答案: 291K。

式(3.11)中的数学模型精确描述了 pn 结二极管的 I - V 特性, 对于深入理解二极管工作特性十分有用。该模型也是理解第 5 章中双极型晶体管 I - V 特性的基础。

设计提示

二极管的静态 I - V 特性可以通过 3 个参数很好地进行表示: 饱和电流 I_S , 由热电压 V_T 表征的温度及非理想因数 n 。

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right]$$

例 3.3 计算二极管的电压和电流

在本例中, 将计算不同二极管类型及不同电流值下的二极管典型电压。

问题: (a) 在室温条件下, 已知 $I_S=0.1\text{fA}$, 二极管电流为 $300\mu\text{A}$, 求二极管电压。如果 $I_S=10\text{fA}$ 呢? 如果电流增大到 1mA , 电压又是多少?

(b) 在室温条件下, 已知 $I_S=10\text{mA}$, $n=2$, 工作电流为 10A , 求硅功率二极管的电压。

(c) 当二极管工作温度为 50°C , 且电流为 2.50mA 时, 电压为 0.736V , 求二极管的饱和电流。

解(a):

已知量: 二极管工作电流和饱和电流 I_S 。

未知量: 二极管在工作电流下的电压。

求解方法: 解式(3.9)得出二极管电压表达式, 然后分别求出各工作电流下的电压值。

假设: 室温时, $V_T=0.025\text{V}$, $n=1$; 直流条件下: $i_D=I_D$, $v_D=V_D$ 。

分析: 将 $I_D=0.1\text{fA}$ 代入式(3.9)得

$$v_D = nV_T \ln\left(1 + \frac{I_D}{I_S}\right) = 1(0.025\text{V}) \ln\left(1 + \frac{3 \times 10^{-4}\text{A}}{10^{-16}\text{A}}\right) = 0.718\text{V}$$

当 $I_S=10\text{fA}$ 时

$$V_D = nV_T \ln\left(1 + \frac{I_D}{I_S}\right) = 1(0.025\text{V}) \ln\left(1 + \frac{3 \times 10^{-4}\text{A}}{10^{-14}\text{A}}\right) = 0.603\text{V}$$

当 $I_D=1\text{mA}$, $I_S=0.1\text{fA}$ 时

$$V_D = nV_T \ln\left(1 + \frac{I_D}{I_S}\right) = 1(0.025\text{V}) \ln\left(1 + \frac{10^{-3}\text{A}}{10^{-16}\text{A}}\right) = 0.748\text{V}$$

结果检查: 二极管电压位于 $0.5\sim 1.0\text{V}$, 小于 $n=1$ 时的禁带宽度, 结果合理。

解(b):

已知量: 二极管电流、饱和电流 I_S 和 n 的值。

未知量：二极管在工作电流下的电压。

求解方法：由式(3.9)求解二极管电压，再分析计算的结果。

假设：室温时， $V_T = 0.025\text{V} = 1/40\text{V}$ 。

分析：二极管电压为

$$V_D = nV_T \ln\left(1 + \frac{I_D}{I_S}\right) = 2(0.025\text{V}) \ln\left(1 + \frac{10\text{A}}{10^{-8}\text{A}}\right) = 1.04\text{V}$$

检查结果：当 $n=2$ 时，二极管电压介于 $1\sim 2\text{V}$ ，对于工作在大电流下的功率二极管这个结果合理。

解(c)：

已知量：二极管的电流为 2.50mA ，电压为 0.736V ，二极管工作温度为 50°C 。

未知量：二极管饱和电流 I_S 。

求解方法：求解式(3.9)，计算二极管饱和电流，然后求出相应的表达式。需要求出 50°C 时的热电压 V_T 。

假设：由于 n 未给出，此处假设 $n=1$ 。

分析：将 $T=50^\circ\text{C}$ 转化为热力学温度 $T=(273+50)\text{K}=323\text{K}$

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{(1.38 \times 10^{-23}\text{J/K})(323\text{K})}{(1.60 \times 10^{-19})\text{C}} = 27.9\text{mV}$$

解式(3.9)得 I_S

$$I_S = \frac{I_D}{\exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right) - 1} = \frac{2.5\text{mA}}{\exp\left(\frac{0.736\text{V}}{0.0279\text{V}}\right) - 1} = 8.74 \times 10^{-15}\text{A} = 8.74\text{fA}$$

结果检查：所得饱和电流数值在式(3.10)所示的典型范围内，结果合理。

练习：已知二极管反向饱和电流为 40fA 。当二极管电压分别为 0.55V 和 0.7V 时， i_D 分别为多少？如果 $i_D=6\text{mA}$ 时，计算二极管电压是多少？

答案： $143\mu\text{A}$ ； 57.9mA ； 0.643V 。

3.4 反偏、零偏、正偏下的二极管特性

对电子器件施加直流电压或电流，称为器件提供直流偏置，简称偏置。偏置决定器件的特性、功耗、电压和电流极限及其他重要的电路参数，因此选择偏置对分析电路和设计电路都非常重要。对于二极管，有 3 个重要的偏置条件，即反向偏置(Reverse bias)、正向偏置(Forward bias)和零偏置(Zero bias)，简称反偏、正偏和零偏。反向偏置和正向偏置，分到对应 $v_D < 0\text{V}$ 和 $v_D > 0\text{V}$ 。零偏置是反向偏置和正向偏置的分界线， $v_D = 0\text{V}$ 。二极管反偏时，电流非常小，可认为此时的二极管处于断开状态(OFF)，是不导通的。二极管正偏时，电流很大，称此时的二极管处于导通状态(ON)。

3.4.1 反偏

当 $v_D < 0$ 时，二极管工作在反偏条件下，此时会有很小的反向漏电流流过二极管，约为 I_S 。因此通常认为反偏下的二极管处于不导通或断开状态。例如，对二极管两端施加直流电压 $V = -4V_T = -0.1\text{V}$ ，则 $V_D = -0.1\text{V}$ ，代入式(3.11)，得