

半导体器件

1.1 PN 结与半导体二极管

1.1.1 半导体的基本知识

大多数电子元器件是用半导体、导体和绝缘体制成的,其中半导体是形成电子元器件特性的核心材料。任何材料的原子都是由带正电荷的原子核和围绕原子核运动的、带负电荷的电子组成。电子分布在不同的电子层上,离原子核越远的电子的势能越大。最外层的电子称为价电子,原子的化学特性主要由价电子决定。表 1-1 是制作电子元器件常用的半导体材料,按照价电子的数量分组。表中Ⅳ族中元素的价电子是 4 个,可组成元素半导体;Ⅲ族和Ⅴ族中元素的价电子分别是 3 个和 5 个,可组成化合物半导体。它们都是重要的半导体材料。

表 1-1 常用的半导体材料

Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
B	C	
Al	Si	P
Ga	Ge	As

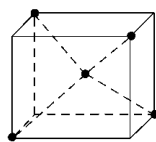


图 1-1 Si 单晶的晶体结构

1. 本征半导体 (intrinsic semiconductor)

纯净的半导体晶体称为本征半导体。如图 1-1 是 Si(硅)晶体的晶格结构,每个 Si 原子周围有 4 个相邻的 Si 原子,每个 Si 原子分别与相邻的 4 个 Si 原子共享一对价电子,形成共价键,共价键的结合力使晶体中的 Si 原子处于固定的位置上,从而形成晶体结构。

图 1-2 是 Si 单晶共价键的二维示意图,当 $T=0\text{K}$ 时,每个电子都处于最低能量状态,所有的电子都被束缚在共价键中,整个晶体中没有起导电作用的自由电子。所以,绝对零度时的半导体是“绝缘体”。

当温度上升时,价电子将得到能量,如果价电子所得到的能量足够

大,它就可以摆脱共价键的束缚而脱离最初的位置成为自由电子,并且在原来的位置上形成带正电荷的空穴,见图 1-3。当受到电场的作用时自由电子就会定向移动而形成电流,我们称自由电子为载流子。为了脱离共价键的束缚,电子必须得到一个最小能量,称为带隙能量。半导体的带隙能量为 1 电子伏特数量级。绝缘体的带隙能量是 3~6 电子伏特,室温条件下绝缘体内没有自由电子。而导体的带隙能量很小,室温下存在大量的自由电子。

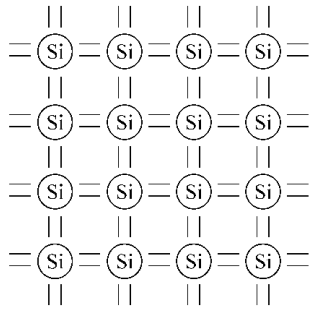


图 1-2 Si 单晶结构的二维示意图

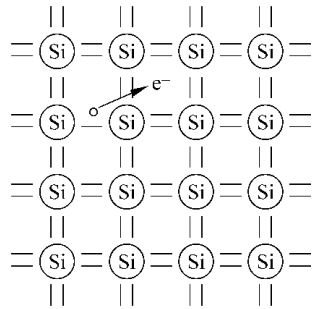


图 1-3 自由电子的形成

本征半导体中不但自由电子可以形成电流,空穴吸引附近的束缚电子来填充,形成新的空穴,而新的空穴又会吸引附近的束缚电子来填充,这样就好像是空穴在移动,所以空穴在外力的作用下也可以形成电流,见图 1-4。因此在本征半导体中有浓度相等的两种载流子——带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。

2. 掺杂半导体(extrinsic semiconductors)

因为在本征半导体中的电子和空穴的浓度相对小,所以只能形成很小的电流。但是我们可以用掺杂的方法来控制载流子的浓度。所掺入杂质原子的最外层电子数目与本征半导体不同,并且,掺杂原子必须能够进入半导体晶格并取代原来的原子。表 1-1 中 III 族和 IV 族中的元素满足这样的要求。

如果在 Si 单晶中注入五价的磷(P),磷原子将取代某些位置上的 Si 原子。最外层五个价电子中的四个与四个相邻的 Si 原子形成共价键,多余的一个价电子成为自由电子。每个掺杂磷原子提供一个自由电子,因此,磷原子称为施主杂质,参见图 1-5。失去一个电子的磷原子带正电荷,但是磷原子被共价键束缚,不能在电场的作用下移动而形成电流,因此,磷原子不是载流子。

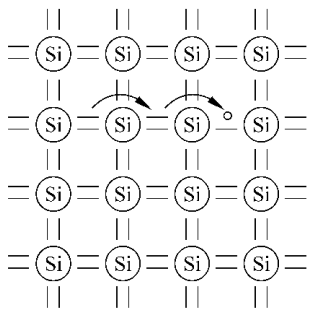


图 1-4 空穴的移动

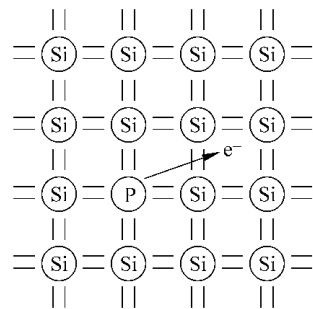


图 1-5 磷(P)掺杂的 Si 单晶的二维示意图

含有施主杂质的半导体称为 N 型半导体。在 N 型半导体中,自由电子的浓度远大于空穴的浓度,因此称自由电子是多数载流子(多子),空穴称为少数载流子(少子)。

如果在 Si 单晶中注入三价的硼(B),硼原子最外层只有三个价电子,当硼原子取代晶格中某些 Si 原子后,它的三个价电子与周围的三格 Si 原子形成三个共价键,这样就留下了一个共价键的位置。常温下掺杂的硼原子周围的共价键中的电子受激发会来填补这个位置,从而产生一个空穴,这个硼原子称为受主杂质,参见图 1-6。接受一个电子后的硼原子带负电荷,但是硼原子被共价键束缚,不是载流子。

含有受主杂质的半导体称为 P 型半导体。在 P 型半导体中,空穴的浓度远大于自由电子的浓度,因此空穴是多子,自由电子是少子。

控制掺杂的多少可以控制多数载流子的浓度,因此,利用掺杂可以改变半导体的导电特性。根据要求进行不同浓度和不同种类的掺杂,便可制成所需要的半导体器件。少子虽然浓度很低,但是对温度敏感,影响半导体的特性,是半导体特性受温度影响的主要原因。多子的浓度很高,约等于掺杂的浓度,其浓度受温度影响不大。

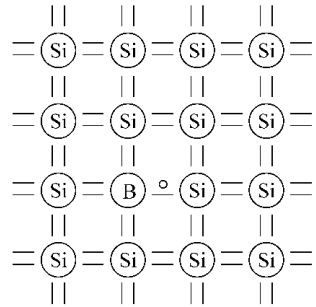


图 1-6 硼(B)掺杂的 Si 单晶的二维示意图

1.1.2 PN 结的形成与单向导电性

1. PN 结的形成

在一块半导体基片上,用某种工艺进行掺杂,使其一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体,在两种半导体的交界面处就形成了 PN 结(PN junction)。PN 结是构成各种半导体器件的基本结构。

两种半导体相接触后,由于界面两边的多子和少子的浓度相差很大,P 区中的空穴和 N 区中的电子必然向对方运动,由于浓度的差别所形成的载流子的运动称为扩散运动,相应的电流称为扩散电流。P 区中的空穴向 N 区扩散,到达 N 区后与 N 区中的自由电子复合;N 区中的电子向 P 区扩散,到达 P 区后与 P 区中的空穴复合。这样在交界面附近多数载流子的浓度迅速下降,出现了由不能移动的带电荷的原子组成的空间电荷区。在交界面的 P 区一侧得到电子,是负电荷区;N 区一侧失去电子,是正电荷区。平衡状态下的 PN 结如图 1-7 所示。

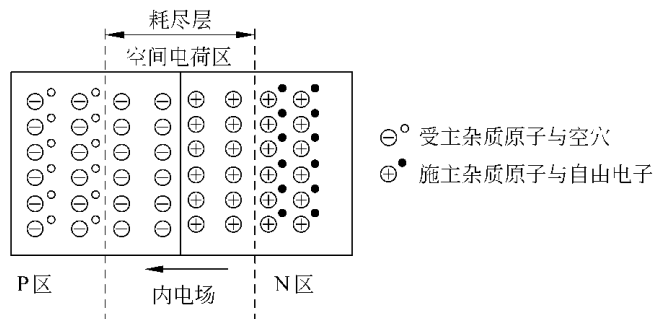


图 1-7 平衡状态下的 PN 结

由于交界面两边正负电荷的存在,形成方向从 N 区到 P 区的电场,称为内电场。空间电荷区越宽,内电场越强。内电场的存在势必阻碍多子的扩散运动。另一方面,在内电场的

作用下,N区中的空穴(少子)和P区中的自由电子(少子)向对方运动,这种少子在内电场的作用下的运动称为漂移运动。扩散运动和漂移运动分别由多子和少子形成,扩散运动的结果是增加空间电荷区的厚度,漂移运动的结果是减少空间电荷区的厚度。最终在平衡状态下,扩散电流等于漂移电流,空间电荷区的厚度保持不变。

在没有其他外部原因作用的情况下,PN结处于平衡状态,没有电流流过空间电荷区,内电场为恒定值。空间电荷区内没有载流子,所以也称其为耗尽层。如图1-7所示。

2. PN结的正向导电特性

如果PN结的P区接电源的正极,N区接电源的负极,称为PN结正向偏置。此时,外电场的方向与内电场相反,内电场被削弱,多子的扩散运动增强,少子的漂移运动被抑制,耗尽层宽度减小,多子的扩散运动通过电源回路可以形成较大的电流。为了限制正向偏置时流过PN的电流,要在回路中加一个限流电阻,如图1-8所示。

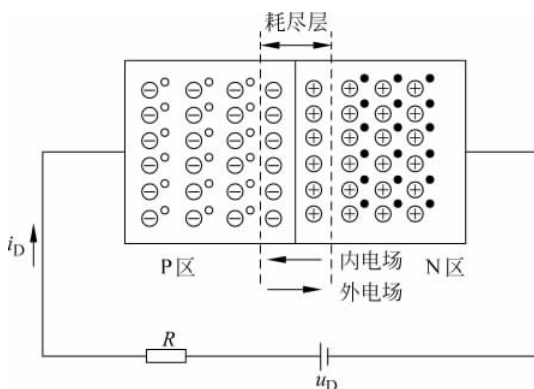


图 1-8 PN 结的正向偏置

3. PN结加反向电压

PN结的P区接电源负极,N区接电源正极,称为反向偏置,如图1-9所示。此时外电场的方向与内电场相同,加强了内电场,使耗尽层变宽,从而阻止多子的扩散运动,促进少子的漂移运动。但是少子的浓度很低,只能形成很小的电流,而且由于少子的数目有限,电压超过零点几伏后,反向电流基本不再随电压的增加而增加,此电流称为反向饱和电流。

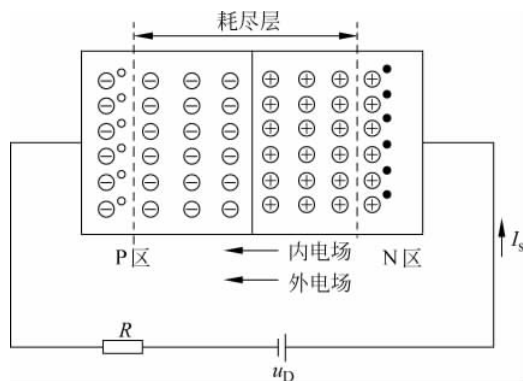


图 1-9 PN 结的反向偏置

虽然反向饱和电流很小,但是因为它是由少子飘移形成的,温度增加时少子的浓度明显增加,所以温度增加时反向饱和电流明显增加。

PN 结正向偏置时电流很大,反向偏置时电流很小,所以通常称 PN 结具有单向导电性。

4. PN 结的伏安特性曲线

根据半导体物理的理论,PN 结两端的电压 u_D 和电流 i_D 的关系为

$$i_D = I_s (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

上式称为理想 PN 结的电流方程。式中, i_D 为 PN 结的电流; I_s 为 PN 结的反向饱和电流,范围为 $10^{-15} \sim 10^{-13}$ A; u_D 为 PN 结的电压; U_T 为温度电压当量,是与温度有关的参数,室温下 $U_T \approx 26$ mV; n 称为发射系数,其值为 $1 \sim 2$ 。 n 与空间电荷区的电子和空穴的复合有关,在低电流的情况下,复合起重要作用, n 接近 2。在大电流的情况下,复合不是关键因素, n 值接近于 1。所以我们一般取 n 值为 1。

PN 结加正向电压时, $u_D > 0$, 即

$$i_D = I_s e^{\frac{u_D}{U_T}} \quad (1-2)$$

PN 结加反向电压时, $u_D < 0$, 即

$$i_D = -I_s \quad (1-3)$$

由式(1-1)可以画出 PN 结的伏安特性曲线,如图 1-10 所示。图中 $u_D > 0$ 的部分称为正向特性, $u_D < 0$ 的部分称为反向特性。从图中可以看出 PN 结在正向偏置时的正向压降变化不大,而其反向饱和电流很小且基本不变。但是必须注意,反向饱和电流受温度变化的影响,温度上升时反向饱和电流增加很快。当 PN 结的反向电压达到一定值后,PN 结被击穿。理想 PN 结的电流方程不能反映 PN 结的反向击穿特性。

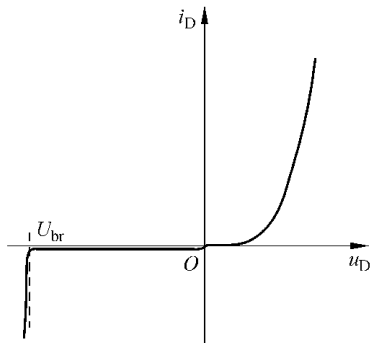


图 1-10 PN 的伏安特性曲线

5. PN 结的击穿

在图 1-10 中,当 PN 结的反向电压达到一定值 U_{br} 时,反向电流急剧增加,这种现象称为反向击穿。在高掺杂的情况下,耗尽层较薄,当反向电压施加到 PN 结时,不大的电压就会在耗尽层产生较大的电场,当电场大到一定程度时会共价键击穿,产生自由电子和空穴对,引起反向电流的急剧增加,这种击穿机理称为齐纳(Zener)击穿。

另一种击穿机理称为雪崩(avalanche)击穿,即当反向电压增加时,少子在耗尽层中得

到足够的动能,在漂移过程中与共价键中的电子碰撞将价电子“撞”出共价键,产生电子和空穴对,新的自由电子被电场加速后又会“撞”出新的电子和空穴对,如果电压足够高,这种雪崩式的倍增会引起反向电流的急剧增加。

击穿电压的大小与PN结的制作参数有关,但是一般都为50~200V,高的可达1000V。如果对击穿后的电流不加限制,将会造成PN结过热而损坏,从而使PN结丧失单向导电能力。

6. PN结的结电容

按产生电容的原因,PN结的结电容可以分成势垒电容和扩散电容两种。

势垒电容是由耗尽层引起的。耗尽层中有不能移动的正负电荷,当外电压使耗尽层变宽时,电荷增加,反之电荷减少。因此耗尽层中电荷量随电压的变化而变化,就形成了电容效应,称为势垒电容,用 C_b 表示。 C_b 与结面积、耗尽层宽度、半导体材料有关。反向偏置电压越小, C_b 越大,所以反向偏置的PN结可以作为压控的可变电容器。依此原理制作的器件称为变容二极管(varactor diode),变容二极管用在电调谐的振荡电路中。

PN结加正向偏置时,多子经PN扩散到对方区域成为另一方的少子,这种在另一方边缘处的少子积累也会形成电容效应,参见图1-11。

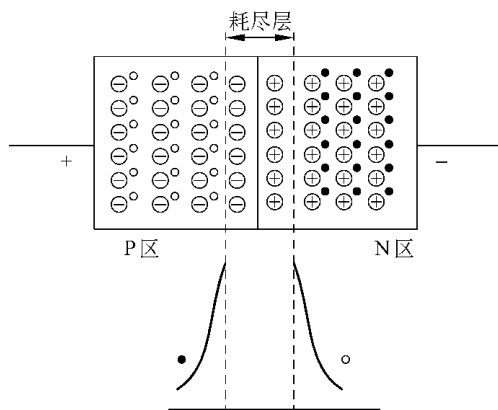


图 1-11 PN 结正偏时少子在 PN 两侧浓度分布

当正向偏置电压增加时,扩散到P区的电子和扩散到N区的空穴浓度增加,少子分布曲线变陡,少子的积累增多;反之,当电压减小时,少子的积累减少。这样形成的电容称为扩散电容,用 C_d 表示。

PN结的总电容 C_j 为

$$C_j = C_b + C_d \quad (1-4)$$

正向偏置时结电容一般以扩散电容为主;反向偏置时结电容则以势垒电容为主。 C_b 和 C_d 一般都很小,结面积小的为1pF左右,结面积大的为几十至几百皮法。对于低频信号结电容的作用可以忽略不计,只有在较高的频率时才考虑结电容的影响。

7. PN结的开关弛豫

PN结可以作为电控开关使用,此时从一个状态过渡到另一个状态的速度是很关键的

参数。比如,如图 1-12 的电路,开关投向 1 时 PN 结导通,开关投向 2 时 PN 结反偏而截止。

PN 结从导通到截止的过渡过程如图 1-13 所示, t_s 称为存储时间,代表少子从 PN 结正向偏置时的浓度分布状态,到达反向偏置时的浓度分布状态所需要的时间,参考图 1-14。

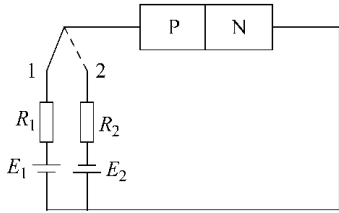


图 1-12 简单的 PN 结开关电路

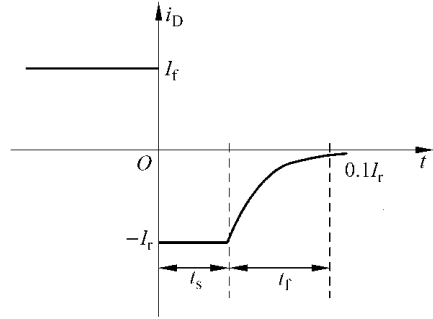


图 1-13 PN 结由正偏到反偏的过渡过程

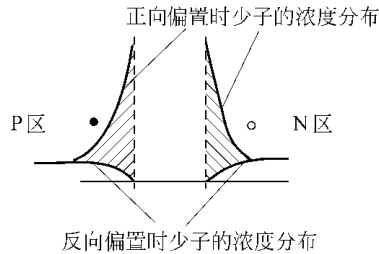


图 1-14 PN 结正向和反向偏置时少子的浓度分布
(阴影部分所代表的少子引起 I_r)

因为在反偏初期,正偏时积累的少子电荷会形成较大的电流,所以 $I_r > I_s$ 。 t_f 是下降时间,代表电流下降到最大值的百分之十所需要的时间。存储时间和下降时间之和称为关断时间。

打开时间指 PN 结从反偏到正偏的弛豫时间,是建立正向偏置时载流子浓度分布所需要的时间,比关断时间小得多,一般可以忽略。

1.1.3 半导体二极管

1. 半导体二极管 (diode)

将 PN 结引出引线并加上封装外壳就是半导体二极管,通常二极管分为点接触型和面接触型。

点接触型如图 1-15(a)所示,其特点是 PN 结面积小,因此结电容也小,适合用于高频场合;同时,因为结面积小,不能通过大电流,主要用于小功率场合。

面接触型如图 1-15(b)所示,其结面积大,因而能流过较大的电流,但是结电容也大,只能用在低频场合。

图 1-15(c)是半导体二极管的电路符号,阳极对应 P 区,阴极对应 N 区。

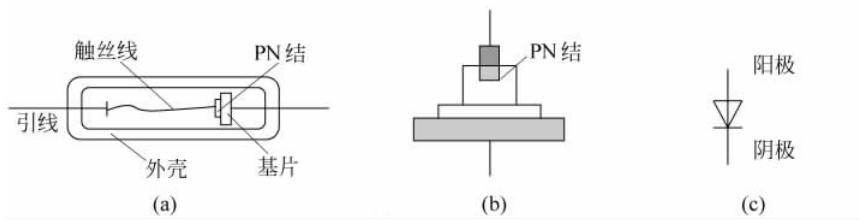


图 1-15 半导体二极管的结构与电路符号

(a) 点接触型二极管的结构；(b) 面接触型二极管的结构；(c) 二极管的电路符号

2. 二极管的特性

二极管的特性与 PN 的特性基本相同,定量计算时仍可以用 PN 结的结方程来描述二极管的伏安特性。实测的二极管的伏安特性曲线如图 1-16 所示,半导体二极管要想正向导电,必须克服一定的阈值电压 U_{th} 才能导通。在室温下硅管 U_{th} 约为 $0.5V$,锗管约为 $0.1mV$ 。正向导通但电流不大时,硅管的正向导通压降 U_F 为 $0.6\sim 0.8V$,一般取 $0.7V$; 锗管的 U_F 为 $0.1\sim 0.3V$,一般取 $0.2V$ 。

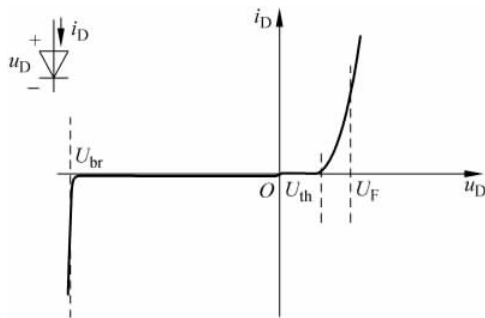


图 1-16 二极管的伏安特性曲线

需要注意,温度上升时会导致二极管的正向伏安特性曲线左移,反向饱和电流增加,正向导通压降减小。变化规律是:在室温附近,温度每增加一度,正向压降减小 $2\sim 2.5mV$,反向饱和电流增加一倍。

3. 二极管的参数

二极管的参数是其特性的定量描述,定量描述越精确需要的参数越多,下面仅介绍几个主要参数。

1) 最大整流电流 I_F

I_F 是二极管长期运行时允许通过的正弦半波整流电流的平均值,由二极管的结面积和散热条件决定。如果正向平均电流长期超过规定值,将会因为结过热而损坏。

2) 最大反向工作电压 U_{m}

U_{m} 是二极管工作时允许施加的最大反向电压,超过此值后二极管可能被击穿。一般取 U_{m} 为二极管击穿电压 U_{br} 的 $1/3\sim 2/3$ 。

3) 反向电流 I_r

I_r 即二极管的反向饱和电流 I_s , 其值越小表明二极管的单向导电性越好。需要注意的是, I_r 受温度影响, 温度升高, I_r 增大。

4) 最高工作频率 f_m

f_m 与结电容有关, 实际工作频率大于 f_m 时, 二极管的单向导电性变差。

二极管的实际参数很多, 使用时根据应用场合的不同进行选择。另外, 有关二极管的型号命名法则请参阅相应的国家标准。

4. 二极管的电路模型

二极管的伏安特性曲线是非线性的, 这给二极管电路的分析带来一定的困难。为了便于分析, 可以用线性元件所构成的电路来近似模拟二极管, 这种能够模拟二极管特性的电路称为二极管的电路模型, 也称为等效电路。建立器件的电路模型的方法有两种, 一种是根据器件的外部特性(伏安特性)来构造电路模型, 这种模型比较简单, 参数较少, 适用于近似计算, 二极管的折线模型和微变等效电路就属于这种模型; 另一种是建立在器件物理结构原理的基础上, 模型电路的参数与物理机理紧密联系, 可以精确地描述器件的特性, 但是, 这种模型比较复杂, 参数很多, 只适用于计算机仿真计算, 二极管的 SPICE 模型就属于这种模型。

1) 二极管的折线模型

图 1-17 是二极管的三种折线化伏安特性曲线及其对应的电路模型。

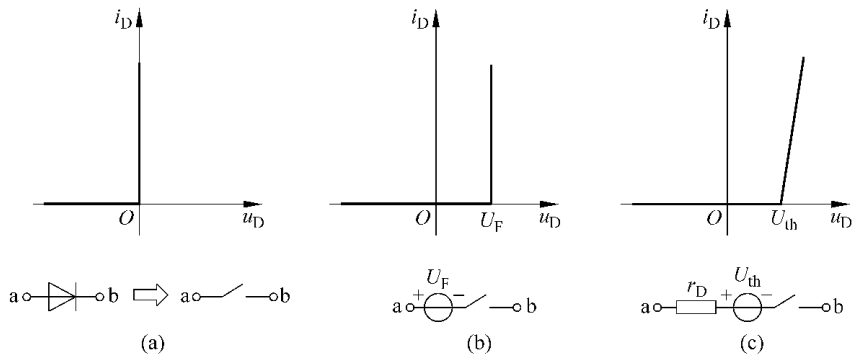


图 1-17 二极管的折线模型

(a) 理想模型; (b) 正向导通时压降为常量; (c) 正向导通时端电压与电流成正比

图 1-17(a) 是二极管的理想化模型, 此模型中认为正向偏置时的电压为零, 反向偏置时的反向电流为零。虽然理想二极管模型和实际二极管的特性有一定差别, 但是当电路中二极管的正向电压远小于和它串联的电压、反向电流远小于与其并联的支路电流时, 利用理想化模型仍然能得到较满意的结果。

图 1-17(b) 中考虑到了二极管的正向压降, 并且认为二极管的阈值电压与正向压降相等, 都是 U_F 。因此, 在理想模型的开关电路中串联了一个电压源 U_F , $U_a - U_b \geq U_F$ 时开关闭合, 二极管压降恒等于 U_F ; $U_a - U_b < U_F$ 时二极管截止, 开关断开。

图 1-17(c)中还考虑到了二极管正向压降随电流的变化,并且近似认为当二极管导通后其压降与电流是线性关系,直线的斜率是 $\frac{1}{r_D}$ 。因此等效电路在(b)的基础上又增加了一个电阻 r_D 。二极管导通后其正向压降为 $U_F=U_{th}+i_D r_D$ 。

以上三种模型是二极管的直流模型,仅适用于分析二极管直流电路。理想模型(a)最简单,同时误差也最大;模型(c)最复杂,误差也最小。一般的近似分析采用模型(b)就足够了。

2) 二极管的微变等效电路

在我们所涉及的很多电路中,施加于二极管的电压或电流往往是在一个直流信号(我们称其为静态工作点,一般用 Q 表示)上叠加一个小的交流信号。对于交流信号而言,可以用 Q 点处的切线来代表附近的一段曲线,如图 1-18 所示,切线的斜率的倒数是二极管在小信号时的动态等效电阻 r_i , $r_i=\frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$ 。

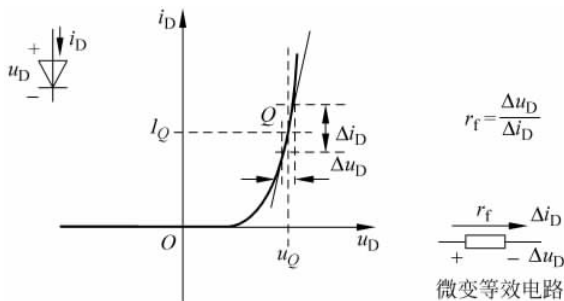


图 1-18 二极管的动态电阻及其微变等效电路

从二极管的结方程式(1-2)很容易导出动态电阻的表达式:

$$r_i = \frac{1}{\frac{d i_D}{d u_D}} = \frac{n U_T}{I_Q} \quad (1-5)$$

室温下 $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

可见, Q 点不同,二极管的动态电阻就不同。这个等效电路仅适合于小信号的情形,所以称为微变等效电路。

1.1.4 二极管的 SPICE 模型

半导体二极管的 SPICE 模型是基于其物理运行机理创建的。为了能够精确描述器件的特性,这个模型是很复杂的,二极管的 SPICE 模型使用的参数有 15 个之多。然而,很多情况下详细并准确地确定所有的参数是不必要的(特别是本书的范围)。读者使用电路仿真软件进行电路仿真时,可以直接调用元件库中的二极管,而不必关注其模型定义。只有当使用库中不存在的元件时,才需要自己定义器件参数。因此,本书只对半导体器件的 SPICE 模型进行简单介绍,仅供读者了解之用。

在 SPICE 中,用元件语句调用的二极管必须是在 SPICE 文件中用 model 语句定义了的, model 语句中的模型参数定义了二极管的特性、温度依赖关系、噪声特性等。二极管的