



厦门大学

信息与通信工程系

---

# 电子线路I

## 第二讲——二极管知识归纳及重难点总结

---

厦门大学朋辈导师辅导计划

2024 年 10 月 20 日

# 1 半导体物理基础

1. 本征半导体：硅和锗（核外电子最外层都是4个电子）的单晶称为本征半导体。相邻原子之间的最外层电子最多可以形成共价键
2. 本征激发和复合。在温度升高或光照下，共价键中的价电子获得能量离开原子称为自由电子，这一过程称为本征激发。本征激发过程会留下空穴（带有正电），相当于同桌的两人，有一人走了，仅留下了座位，空穴就是这样的座位。其他的自由电子会与空穴相遇，释放能量形成共价键，这一过程就称为复合，就像空出来的座位由另一个人坐下了一样。自由电子的移动导致了空穴的移动。
3. 热平衡载流子浓度。只要不是绝对零度的情况，本征激发和复合是无时不刻都在进行的。当外部条件不变时，单位时间内激发出的电子和复合的电子数相同，这样就达到了平衡，自由电子的浓度也维持在一个相对稳定的数值上（一边放水一边加水的泳池中，水量是相对恒定的）。这一数值就称为热平衡载流子浓度。
4. 杂质半导体。向本征半导体中掺入三价或五价元素，则得到了杂质半导体。掺入五价元素，则得到了N型半导体（Negative，电子多，空穴少）；掺入三价元素，则得到了P型半导体（Positive，空穴多，电子少）。上述现象可以理解为，站队时要求一名女生和一名男生搭档，有的班级男生多了，有的班级女生多了。多的那个就称为多子，反之为少子。同热平衡载流子一样，随着本征激发和复合的平衡，多子和少子的浓度趋于稳定。
5. 漂移。漂移就是在外加电场的作用下，自由电子逆电场方向移动，空穴顺电场方向移动（本质还是自由电子的移动）的情况，这一过程产生的电流称为漂移电流。
6. 扩散。扩散运动是由于半导体不同部分之间的浓度差异而导致的电子定向移动的现象，其产生的电流称为扩散电流。

（注：虽然在微观上自由电子带负电，空穴带正电，但是实际的半导体是不显电性的，这点要值得注意，无论怎么样，电子和原子核内质子的数目是一致的，宏观上不显电性）

## 2 二极管单向导电性原理

本部分我们将会讨论半导体单向导电性的原理，所谓二极管就是由P型和N型半导体组合而成的PN结。PN端正偏是指P端电势高于N端，反偏是指P端电势小于N端。

### 2.1 PN结的耗尽层

图1展示了一个PN结的构成，刚开始左侧P区的多子为空穴，右侧N区的多子为自由电子。由于扩散作用，浓度高的粒子会向浓度低的地方移动，N区的大量自由电子就会向P区扩散。由于P区存在大量空穴，两者复合，使得原先P区显电中性的原子带负电；N区由于电子变少便带上了正电，建立了内建电场，产生内建电势差 $V_B$ 。这一过程会逐步达到平衡，该区域可导电的自由电子数目匮乏。这个区域就被称为耗尽层（阻挡层、势垒层）。

$V_B$ 与热电压 $V_T$ 有关，在室温下， $V_T \approx 26mV$ （这一数字应当牢记）。电压 $V_B$ 又称势垒，这也是二极管具有导通电压的原因。可以回顾一下图1， $V_B$ 的方向同PN端正偏方向相反。在 $25^\circ C$ 下，锗管势垒为0.3V，硅管为0.7V。

### 2.2 正向偏置（P端连接电源正极）

我们首先着眼于单个电子的移动来看（电流形成的原因就是自由电子的移动），电子离开电源负极，进入PN结N端，如果这个电子具有足够大的能量（体现为电源电压很大），那它就会穿越耗尽层，抵达P端

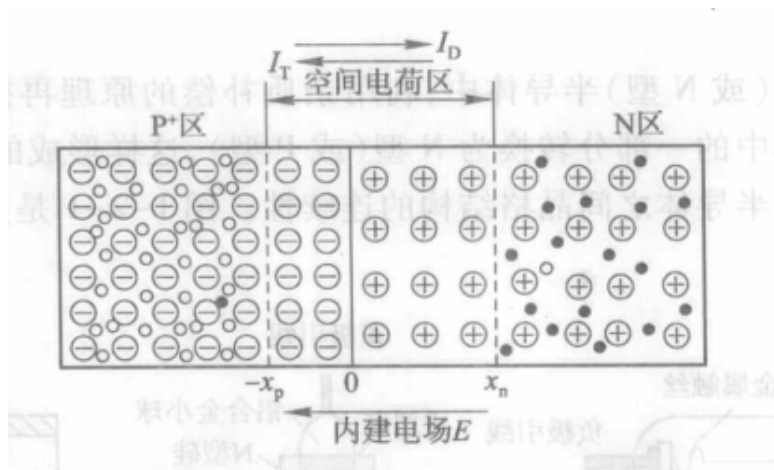


图 1: 耗尽层的形成

与多子空穴结合变成一个价电子（形成了共价键），他会接着向P端尽头移动，从一个空穴迁移到另一个空穴，当到达尽头是，离开PN结，回到电源正极。如果这个电子能量不够，那么他就没法穿过耗尽层，PN结无法导通。

整个过程是无数个电子共同经历的，如此一来，便形成了正向电流。在正偏二极管中，只要PN结两端的电压大于势垒电压，电路中就会有较大的电流。

### 2.3 反向偏置（P端连接电源负极）

外加反向电压的时候，由于电池负极吸引空穴，正极吸引自由电子，P端的多子空穴和N端的多子自由电子会从PN结流走，这样的结果就是耗尽层变得更宽，内建电压 $V_B$ 进一步变大。当 $V_B$ 的大小与外加电压相等时，耗尽层就不再增大，电流无法正常导通。

当然，P端会存在少数自由电子，N段也有少数空穴，在热能的作用下他们激发成为自由粒子。随着时间推移，总会有机会穿过耗尽层，形成很小的电流流过外部电路。这个由热激发而产生的反向电流就称为反向饱和电流 $I_s$ 。

从成因我们可以得知，反向饱和电流是由热激发产生的，它与反向电压没有关系，只与温度高低所激发的少数数量有关。

当然，反向电压太大的话，自由电子的能量就会特别巨大，他们会轰击共价键产生新的电子，新电子和老电子继续轰击（类似于核裂变），发生雪崩效应，载流子数目急剧增大，反向电流增大。这一过程就叫做击穿。雪崩击穿和齐纳击穿原理一致，区别就在于掺杂浓度不同，击穿电压不同（掺杂浓度高，击穿电压小的是齐纳击穿）。

## 3 二极管的其他特性

1. 温度特性。温度升高，无论是正偏还是反偏，二极管的载流子数目都会变大，电压都会增大。
2. 电容特性。PN结电容由势垒电容和扩散电容组成。正偏时主要是扩散电容，反偏时主要是势垒电容（因为反偏时耗尽层大）。

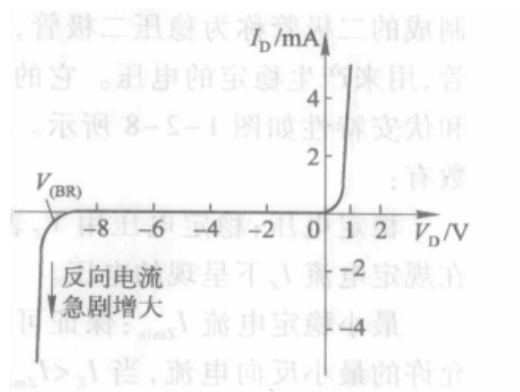


图 2: PN结的伏安特性曲线

## 4 二极管电路分析方法

### 4.1 数学模型

常用的PN结特性可由式1来表示

$$\begin{aligned} I &= I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \\ &\approx I_s e^{\frac{V}{V_T}} (V \gg V_T) \end{aligned} \quad (1)$$

除了使用数学公式进行表示，绘图法（即根据伏安特性曲线图2来计算）也是常用的做法。

### 4.2 大信号下的等效模型

所谓大信号就是，变化范围和幅度都很大的信号（常为几伏）；小信号就是变换范围和幅度都不大的信号。二极管的大信号等效电路就是一个导通电阻 $R_D$ 串联一个开启电压源 $V_{D(on)}$ （P端方向为正极，N端方向为负极）的电路，如图3所示。

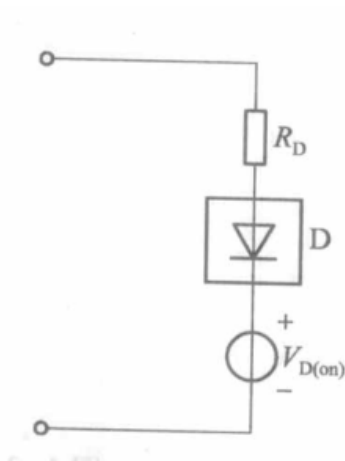


图 3: 二极管大信号等效模型

当 $R_D$ 很小时，可以忽略不计，此时二极管等效为仅有一个开启电压源。当开启电压很小时，开启电压源忽略不计。如果 $R_D$ 和 $V_{D(on)}$ 都忽略不计，该二极管称为理想二极管。

### 4.3 小信号下的等效模型

小信号工作状态可以简单的由式2给出，其中 $V_Q$ 称为静态工作点，它决定了电路的工作状态， $a\cos[w(t)*t + \varphi(t)]$ 给出了交流小信号，其幅值 $a$ 一般都很小。

$$\begin{aligned} V_i &= V_Q + \Delta V \\ &= V_Q + a\cos[w(t)*t + \varphi(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

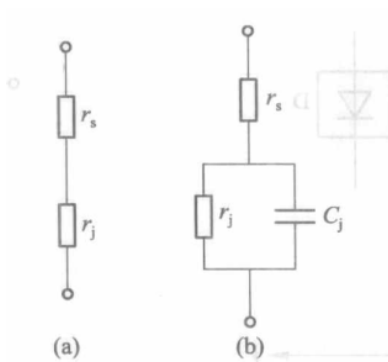


图 4: 二极管小信号等效模型

图4给出了二极管的小信号等效模型。电阻 $r_s$ 称为PN结的串联电阻，其值一般直接给出。电阻 $r_j$ 称为二极管的增量结电阻或肖特基电阻。其值由式3计算。 $C_j$ 是二极管的结电容，一般仅在高频电路中才考虑。 $V_Q$ 被称为静态工作点，是二极管两端直流电压的大小。

$$\begin{aligned} r_j &= \frac{V_T}{I_Q} \\ &= V_T / I_s (e^{\frac{V_Q}{V_T}} - 1) \\ &\approx V_T / I_s e^{\frac{V_Q}{V_T}} \quad (V_Q \gg V_T) \end{aligned} \quad (3)$$

### 4.4 分析步骤

1. 确定电路是直流输入还是交流输入，如果仅有直流量，只需要使用二极管的大信号等效模型分析即可。
2. 如果电路中存在交流输入，判断交流量是否是小信号。如果不是，依旧使用大信号等效模型分析（常在二极管整流电路中使用）。
3. 如果确定是小信号电路，先确定二极管的静态工作点 $V_Q$ ，然后使用小信号等效模型带入计算。
4. 结合二极管的等效伏安特性曲线来进行分析往往可以事半功倍。

## 5 总结

二极管这章主要是需要重点掌握大信号、小信号两种等效电路以及图解法的分析方法。对于二极管的工作原理、具体应用电路，同学们了解即可。

## 参考文献

- [1] 电子电路原理（原书第7版）. Albert Malvino, David J.Bates.
- [2] 《电子线路（线性部分）》. 冯军, 谢嘉奎.