

# 模块一

## 测量分析半导体二极管

### 教学要求

- 了解半导体材料特性和 PN 结的形成原理。
- 理解 PN 结及其单向导电性和二极管的特性。
- 掌握二极管电路的分析方法。
- 能利用万用表判断二极管管脚极性和品质好坏。

半导体二极管是最基本的电子器件，是集成电路中最小的组成单位，具有体积小、重量轻、使用寿命长等优点，在工业上广泛使用。本模块首先介绍半导体材料的基础知识，阐述了 PN 结及其单向导电性；重点介绍了半导体二极管的工作原理、特性曲线、主要参数及其基本应用电路；最后介绍了稳压二极管的特性及应用。

### 任务一 半导体基本知识

#### 任务描述

任务目标	(1) 建立 P 型半导体和 N 型半导体的模型 (2) 掌握 PN 结的单向导电性
任务实施方法	教师通过对半导体基本知识的介绍，提出本课时的任务；学生看书，采用分组讨论，提出需要解决的问题、完成本任务的思路和方案；小组发言交流，教师对概念的具体讲解，抽查学生对本任务的掌握情况。

在自然界中，物质按导电能力的不同可以分为导体、半导体和绝缘体。导体很容易导电，如铁、铜、铝等物质；绝缘体几乎不能导电，如塑料、陶瓷、橡胶等物质；而半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，如硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）等物质，其中硅的应用最广泛。

#### 1.1.1 本征半导体

本征半导体是指完全纯净的、结构完整的半导体，具有晶体结构。常用的半导体材料是硅和锗，

它们的原子最外层都是4个价电子。为表示方便,采用如图1.1-1表示其原子结构模型。把硅或锗等半导体材料制成晶体时,相邻两个原子的一对最外层原子(价电子)成为共有电子。此时,相邻原子之间通过共有价电子的形式而结合在一起,即为“共价键”结构。故在硅或锗晶体中,每个原子都和周围的4个原子以共价键的形式相互紧密地联系在一起,如图1.1-2所示。

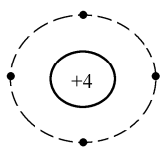


图 1.1-1 硅或锗简化原子结构模型

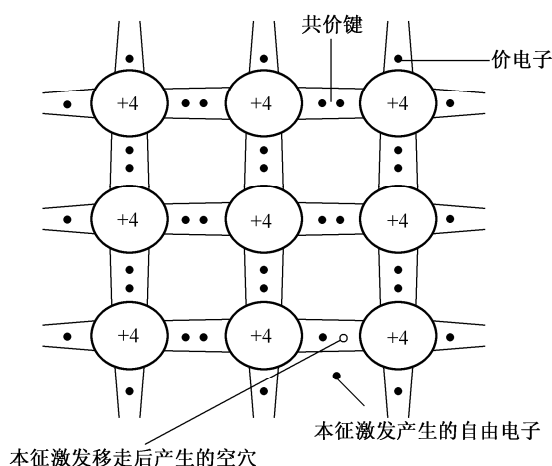


图 1.1-2 共价键结构及本征激发示意图

在绝对温度零度( $-273.16^{\circ}\text{C}$ )和无外界影响的情况下,价电子均被束缚在共价键中,半导体中没有自由运动的带电粒子——载流子。但是当外界温度升高或受到光线照射时,某些价电子就会获得能量。摆脱共价键的束缚而形成自由电子,同时,在共价键中就留下了相同数量的空位,这个空位称为空穴,如图1.1-2所示,这种现象称为本征激发。显然,自由电子和空穴是成对出现的,所以称它们为电子空穴对。

由此可见,本征半导体中存在两种载流子:一种是带负电的自由电子和一种是带正电的空穴。由于二者成对出现,电荷量相等,极性相反,因此,本征半导体呈电中性。在外电场作用下,通过它的电流可以分为两部分:一是自由电子逆电场方向定向运动形成的电子电流;二是共价键中价电子填补空穴形成的空穴电流。

自由电子和空穴在运动中相遇后会重新结合在一起而成对消失,这一过程为复合。在温度等一定时,自由电子和空穴对的产生与复合将达到一个动态平衡状态,此时自由电子和空穴对在半导体的浓度一定。

### 1.1.2 杂质半导体

本征半导体中掺入少量的微量元素,就会使半导体的导电性能发生显著变化。根据掺杂的不同,杂质半导体可以分为电子(N)型半导体和空穴(P)型半导体。

#### 一、N型半导体

在纯净的硅或锗晶体中掺入少量的五价微量元素(如磷、砷等),此时五价元素替代了少许晶体中的四价元素,由于磷原子有五个价电子,所以它除了与周围硅原子形成共价键外,还多出了一个价电子,如图1.1-3所示。多出的价电子不受共价键的束缚,在室温下就可成为自由电子,自由

电子浓度的大幅度增加,会使原先本征激发所产生的空穴被自由电子复合的机会增多,使空穴浓度减少。这种以电子导电为主的半导体称为N型半导体。在N型半导体中,由于自由电子浓度大于空穴浓度,故称自由电子为多数载流子,简称多子;空穴为少数载流子,简称少子。

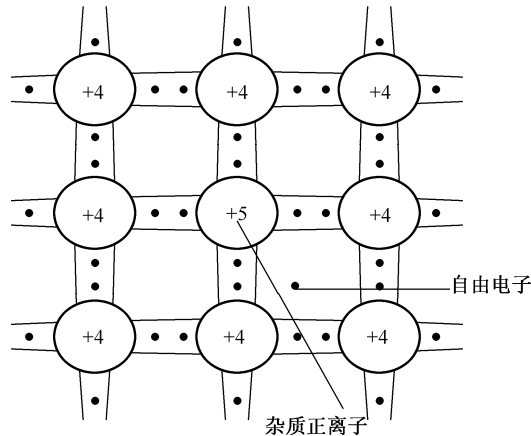


图 1.1-3 N型半导体结构示意图

## 二、P型半导体

在纯净的硅或锗晶体中掺入少量的三价微量元素(如铝、硼等),此时三价元素替代了少许晶体中的四价元素,由于硼原子有三个价电子,所以它除了与周围硅原子形成共价键外,还产生了一个空位,如图 1.1-4 所示。当硅原子中的价电子填补此空位时,共价键中就会产生一个空穴,这种掺杂使空穴的浓度大幅度增加,这种以空穴导电为主的半导体称为P型半导体。在P型半导体中,由于自由电子浓度小于空穴浓度,故称自由电子为少数载流子;空穴为多数载流子。

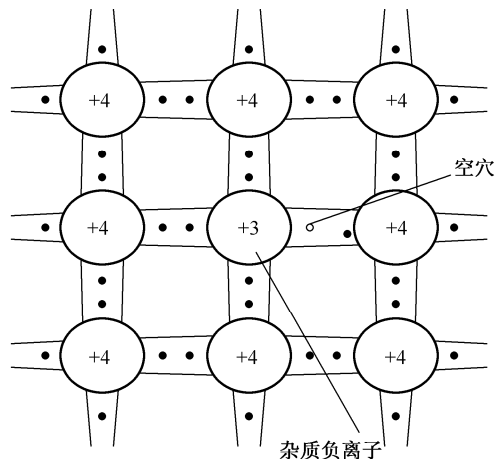


图 1.1-4 P型半导体结构示意图

注意:无论哪种半导体都是呈电中性。

### 1.1.3 PN 结

#### 一、PN 结的形成

通过特定的工艺在一块半导体的两边分别做成 P 型半导体和 N 型半导体，在两种半导体的界面，两种载流子的浓度差别很大。由于两种载流子存在浓度差，所以 P 区内的空穴向 N 区运动，N 区的自由电子向 P 区运动，把这种载流子从高浓度向低浓度区域的运动称为扩散运动，如图 1.1-5 所示。由扩散运动所形成的电流称为扩散电流。而扩散到对方区域的载流子都变成了少数载流子，在两个区域的交界面附近，它们将会与该区域中的多数载流子复合。此时，在两个区域的交界面附近就形成了只有正负离子、没有任何载流子的区域，这个区域称为空间电荷区，即为 PN 结，如图 1.1-6 所示。在这个区域中，载流子已经耗尽，所以又称为耗尽区。

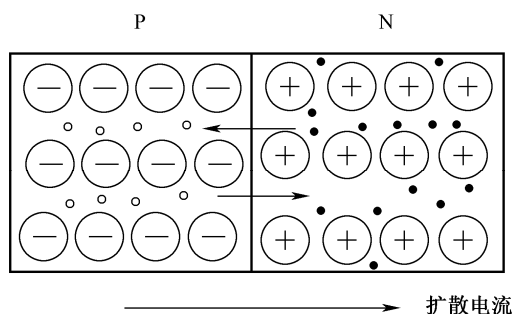


图 1.1-5 多数载流子的扩散运动

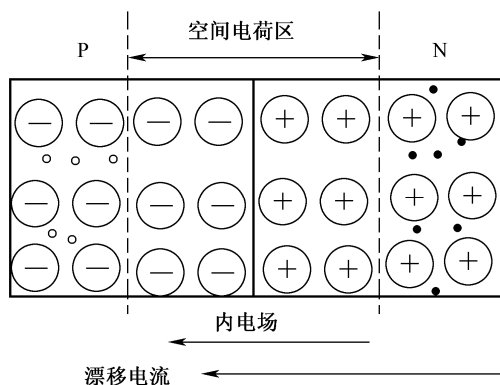


图 1.1-6 PN 结的形成

在空间电荷区中，P 区侧只有负离子区，N 区侧只有正离子区，于是就形成了一个由 N 区指向 P 区的一个内电场。随着扩散运动的不断进行，空间电荷区变宽，内电场增强，对扩散运动起阻碍作用。而两个区域内的少数载流子在电场作用下也会向对方区域运动，这种运动称为漂移运动。由漂移运动产生的电流称为漂移电流。内电场对少数载流子的漂移运动有促进作用。显然，载流子的扩散运动和漂移运动对内电场及其自身的影响是相互矛盾的，当扩散电流和漂移电流相等时，达到动态平衡。此时，空间电荷区的宽度和内电场的强度就确定了。

## 二、PN 结的单向导电性

在 PN 结上加电压称为偏置电压，若在 P 区接电源正极，N 区接电源负极，称为正向偏置，简称正偏；相反，称为反向偏置，简称反偏。PN 结的单向导电性是指：在 PN 结上接正偏时，PN 结导通，呈低阻性；反之 PN 结截止，呈高阻性。

### 1. PN 结外加正向电压

如图 1.1-7 所示，外加电源产生的外电场方向与 PN 结内产生的电场方向相反，内电场被减弱，PN 结变窄，多子的扩散运动高于少子的漂移运动，外电路的电流等扩散电流减去漂移电流。此时扩散电流起主导作用，外电路电流约等于扩散电流，即为正向电流。图 1.1-7 中的电阻  $R$  是为了限制回路电流，防止 PN 结正向电流过大而损坏。

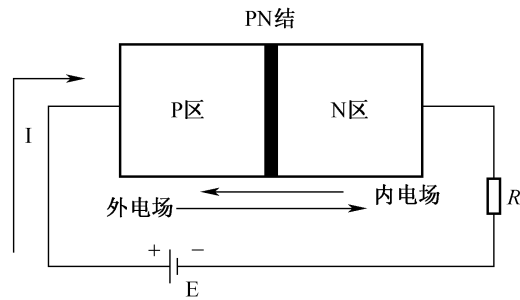


图 1.1-7 正向偏置的 PN 结

### 2. PN 结外加反向电压

如图 1.1-8 所示，外加电源产生的外电场方向与 PN 结内产生的电场方向相同，内电场被增强，PN 结变宽，多子的扩散运动受阻，少子的漂移运动加强，并在外加电场的作用下，通过外加电源回路形成方向电流。由于少子浓度低，所以方向电流很小，一般为几微安。此时就近似地认为 PN 结处于截止状态。注意，如加的反向电压过大，反向电流就会急剧增加，损坏 PN 结。

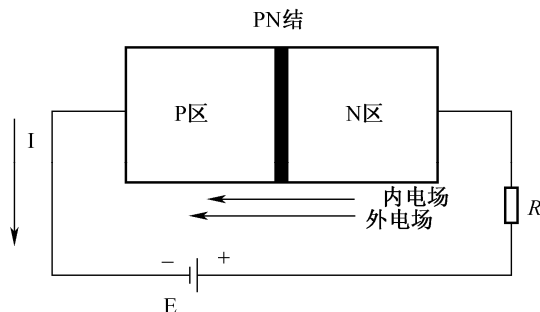


图 1.1-8 反向偏置的 PN 结

## 任务二 半导体二极管

### 任务描述

任务目标	(1) 能根据外形结构判别二极管的极性 (2) 掌握二极管的单向导电性 (3) 理解二极管的分析方法
任务实施方法	教师通过对二极管实物的展示, 提出本课时的任务; 学生看书, 采用分组讨论, 提出需要解决的问题、完成本任务的思路和方案; 小组发言交流, 教师对概念的具体讲解和例题的分析, 总结本任务的重难点, 最后抽查学生对本任务的掌握情况。

### 1.2.1 半导体二极管的结构和类型

在一个 PN 结两端加上电极和引线, 并以外壳封装, 就构成了半导体二极管, 简称二极管, 内部结构如图 1.2-1 (a) 所示; 二极管的电路符号如图 1.2-1 (b) 所示, 用 VD 表示。

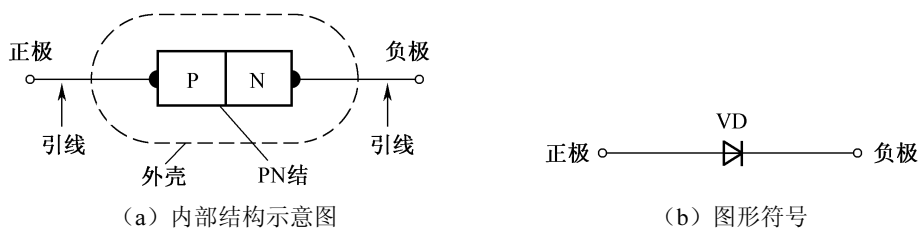


图 1.2-1 半导体二极管的结构和符号

二极管的种类很多, 常用的二极管按制造材料分为, 硅二极管和锗二极管; 按用途分为, 整流二极管、稳压二极管、变容二极管、发光二极管等; 按结构分为, 点接触型二极管和面接触型二极管。点接触型二极管的结构如图 1.2-2 (a) 所示。由于点接触型二极管的 PN 结结面积小, 结电容小, 不能通过较大的电流, 不能承受较高的反向电压, 但其高频性能好, 适合作高频检波、小功率电路和脉冲电路的开关组件等。如 2AP9 点接触型二极管, PN 结电容小于 1pF, 最大工作电流 8mA, 最高反向工作电压为 15V, 工作频率为 100MHz。面接触型二极管的结构如图 1.2-2 (b) 所示。面接触型二极管 PN 结结面积大, 结电容大, 可以通过较大的电流, 能承受较高的反向电压, 适用于低频电路中作整流。如 2CP1 面接触型硅二极管, 最大整流电流为 500mA, 最高反向工作电压为 100V, 最高工作频率只有 3kHz。

### 1.2.2 半导体二极管的伏安特性

二极管由 PN 结构成, 因此, 二极管也具有单向导电性。通过实测得到二极管的伏安特性曲线如图 1.2-3 所示。

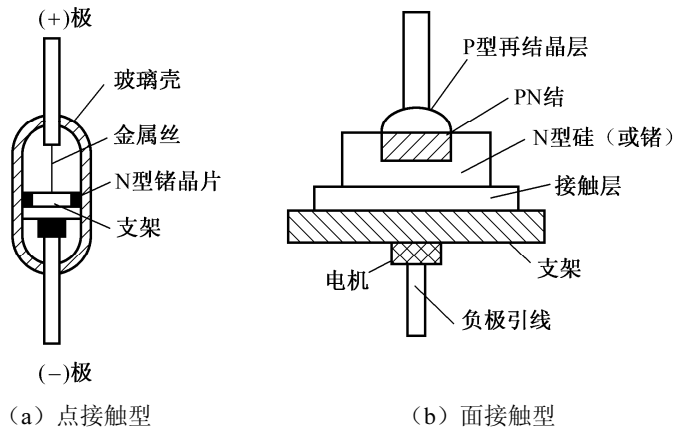


图 1.2-2 二极管的结构类型

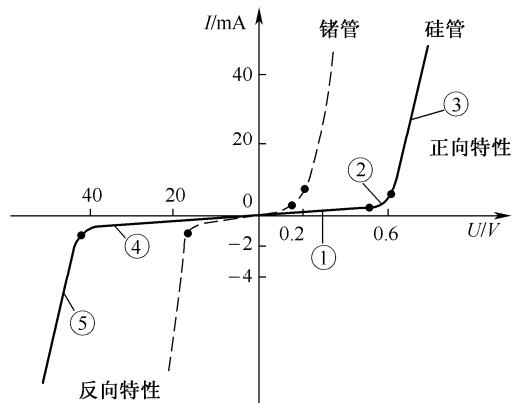


图 1.2-3 二极管的伏安特性曲线

### 一、正向特性

当时，二极管处于正向特性区。正向特性区又分为三段：①段、②段和③段，如图 1.2-3 所示。

①段，虽然  $U > 0$ ，但是二极管的正向电压很小，此时正向电流也非常小（几乎为 0），如图 1.2-3 中曲线的①段，这个区域通常称为死区。当二极管的正向电压超过某一值时，正向电流就从零开始增大。使二极管刚开始导通时的电压称为死区电压（开启电压），用  $U_{th}$  表示。一般硅二极管的死区电压为 0.5V 左右，锗二极管的死区电压为 0.1V 左右。

②段，当时  $U > 0$ ，且较小时，开始有正向电流，但二极管正向电流随电压的增长而增长，如图 1.2-3 中曲线的②段。

③段，当时  $U > 0$ ，且较大时，二极管正向电流迅速增大，如图 1.2-3 中的曲线的③段。一般取硅二极管的正向导通电压为 0.7V；锗二极管的正向导通电压为 0.2V。

### 二、反向特性

当时，二极管处于反向特性区。反向特性区也分为两段，如图 1.2-3 所示。

④段，当时  $U < 0$ ，且很小时，反向电流很小（几乎为 0），且基本与反向电压的大小无关。

⑤段, 当时  $U < 0$ , 且很大时, 二极管内的 PN 结被击穿, 二极管的反向电流将随反向电压的增加而急剧增大, 如图 1.2-3 中的曲线的⑤段。此现象称为反向击穿。反向击穿后, 只要此时二极管的功率不超过 PN 结的耗散功率, 二极管一般都不会被损坏。只要撤掉反向电压, 二极管性能恢复, 这种击穿称为电击穿; 如果反向击穿电流过高, 则导致 PN 结被烧坏, 这种击穿称为热击穿。

### 三、温度对二极管伏安特性的影响

由于温度与半导体器件中的少子浓度有关, 因此当温度发生改变时, 二极管的伏安特性有显著的影响, 如图 1.2-4 所示。当温度升高, 二极管的正向特性将左移, 反向特性将下移。温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ , 正向导通电压将降低  $2\sim 2.5\text{mV}$ ; 温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ , 反向电流约增大一倍。

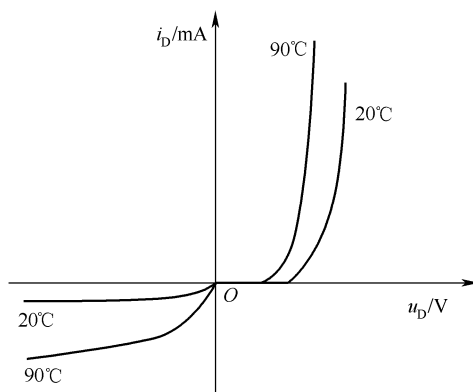


图 1.2-4 温度对二极管 (2AP22) 特性曲线的影响

### 1.2.3 半导体二极管的主要参数

电子器件的参数是器件特性的定量描述, 是合理选择和正确使用器件的重要依据。二极管的主要参数如下。

#### 1. 最大整流电流 $I_F$

$I_F$  是指二极管长期工作时所允许通过的最大的正向平均电流。在实际使用时, 不能超过此值, 否则二极管被烧坏。

#### 2. 最大反向工作电压 $U_R$

$U_R$  是指二极管在正常工作时所允许加在二极管两端的最大的反向电压值。在实际使用时, 二极管的反向电压不能超过此值, 否则二极管会因为反向击穿而烧坏。通常  $U_R$  为击穿电压  $U_{(BR)}$  的一半。

#### 3. 反向电流 $I_R$

$I_R$  是指二极管未被击穿时的反向电流值。 $I_R$  越小, 二极管的单向导电性越好。

#### 4. 结电容 $C_j$

$C_j$  是反映二极管中 PN 结电容效应的参数。在高频或开关状态运用时, 必须考虑二极管结电容的影响。二极管的结电容包括势垒电容  $C_B$  和扩散电容  $C_D$  两部分。

##### (1) 势垒电容 $C_B$ 。

$C_B$  是由耗尽层 (空间电荷区) 引起的。其大小与 PN 结上偏置电压的大小有关, 因此势垒电容为非线性电容。



## (2) 扩散电容 $C_D$ 。

$C_D$  是由多数载流子在扩散过程中的积累引起的。其大小随外加电压的变化而变化，也是一种非线性电容。

一般情况下，势垒电容和扩散电容都很小，对低频特性影响非常小，但工作频率很高时，就必须考虑二极管的结电容的影响。

## 5. 最高工作频率 $f_M$

$f_M$  是 PN 结的结电容大小决定的参数。当工作频率  $f$  超过  $f_M$ ，而结电容的容抗减小到可以与反向交流电阻相比拟时，二极管将逐渐失去它的单向导电性。

上述参数中的  $I_F$ 、 $U_R$  和  $f_M$  为二极管的极限参数，在实际使用中不能超过。应当指出，由于制造工艺的限制，即使是同一型号的管子，参数的分散性也很大。因此，手册上所给的参数是在一定测试条件下测得的，使用时要注意这些条件。若条件改变，相应的参数值也会发生变化。

## 1.2.4 半导体二极管的分析方法

### 1. 二极管的分析方法

从二极管的伏安特性曲线知，二极管是一种非线性器件，因此二极管电路的一般分析方法有：图解法和模型法，这里主要介绍几种常见的模型分析方法。

#### (1) 理想模型。

二极管的理想模型如图 1.2-5 所示。二极管正向导通时，其导通电压为零；二极管反向截止时，二极管呈高阻性，反向电流为零，称为理想二极管。此时，二极管就相当于一个开关。

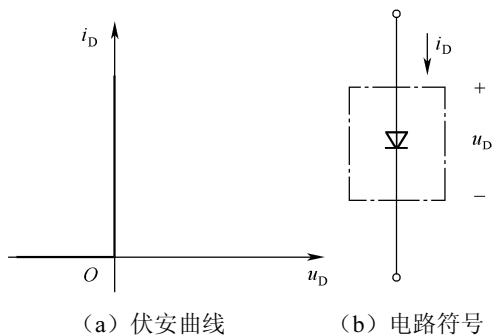


图 1.2-5 二极管的理想模型

#### (2) 恒压降模型。

二极管的恒压降模型如图 1.2-6 所示。此时二极管的正向压降为一常数，反向电阻无穷大，反向电流为零。相当于理想二极管串联了一个恒压源  $U_D$ 。一般取硅管的  $U_D$  为 0.7V，锗管的  $U_D$  为 0.2V。

#### (3) 折线模型。

为了更好地反映二极管的  $U-I$  特性，在恒压降模型的基础上作了一定的修正，即认为二极管的管压降不是恒定的，而是随着流过二极管电流的增加而增加的，所以在模型中通常用一个直流电源与一个电阻  $r_p$  来作进一步的近似，如图 1.2-7 所示。直流电源的电压选定为二极管的开启电压  $U_{th}$ ，约为 0.5V， $r_p$  的值为 200Ω。由于二极管的离散性， $U_{th}$  和  $r_p$  的值不是固定不变的。

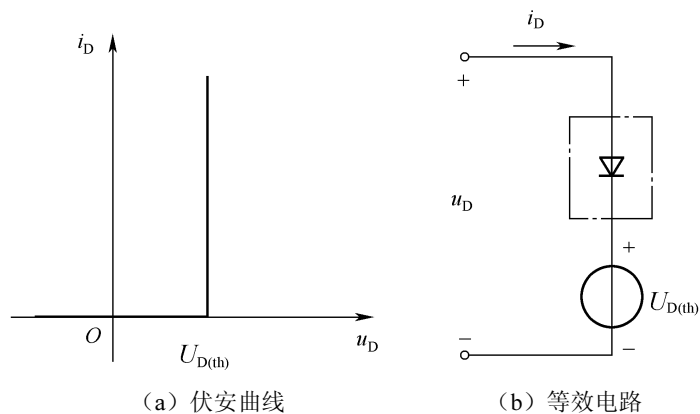


图 1.2-6 二极管的恒压降模型

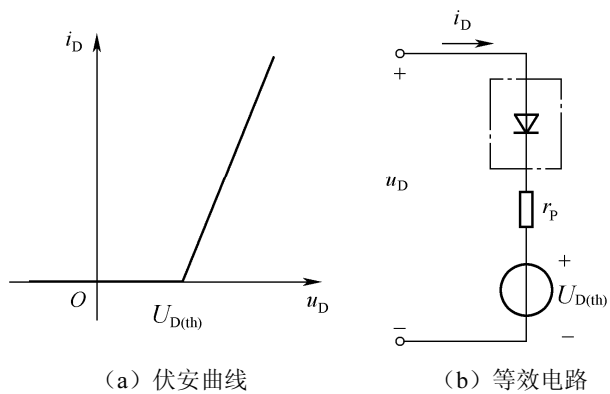


图 1.2-7 二极管的折线模型

**例 1.1** 二极管电路如图 1.2-8 (a) 所示, 二极管为硅管,  $R=2k\Omega$ 。试用二极管的理想模型和恒压降模型, 分别求出  $U_s=6V$  和  $U_s=18V$  时回路的电流  $I_0$  和输出电压  $U_0$  的值。

**解:** 将二极管用理想模型和恒压降模型代入, 可作出如图 1.2-8 (b) 和 1.2-8 (c) 所示电路。

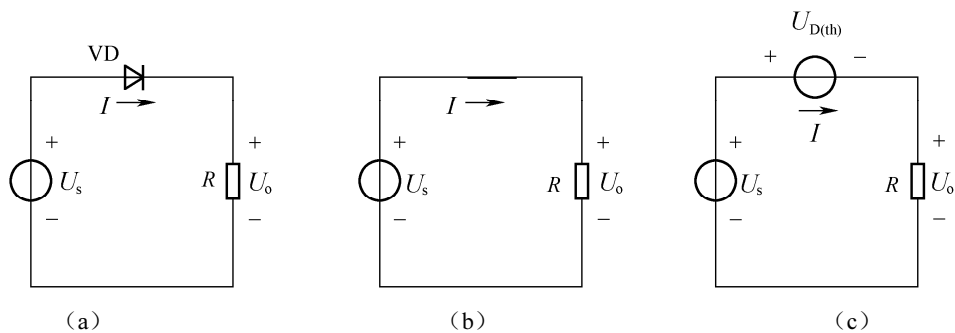


图 1.2-8 简单二极管电路

(1) 当  $U_S=6V$  时, 由图 1.2-8 (b) 可得

$$U_O = U_S = 6V$$

$$I_O = \frac{U_S}{R} = \frac{6V}{2k\Omega} = 3mA$$

由图 1.2-8 (c) 可得

$$U_O = U_S - U_{D(th)} = 6 - 0.7 = 5.3$$

(2) 当  $U_S=18V$  时, 由图 1.2-8 (b) 可得

$$U_O = U_S = 18V$$

$$I_O = \frac{U_S}{R} = \frac{18V}{2k\Omega} = 9mA$$

由图 1.2-8 (c) 可得

$$U_O = U_S - U_{D(th)} = 18 - 0.7 = 17.3V$$

$$I_O = \frac{U_O}{R} = \frac{17.3V}{2k\Omega} = 8.65mA$$

上例得出,  $U_S$  越大,  $U_{th}$  的影响越小, 即当电源电压远大于二极管的开启电压时, 可采用二极管理想模型; 当电源电压较低时, 采用恒压降模型较为合理。

## 任务三 半导体二极管的基本应用

### 任务描述

任务目标	(1) 加深对二极管单向导电性的理解 (2) 理解二极管基本电路的分析方法
任务实施方法	教师通过对上节介绍的二极管基本知识的回顾, 提出本课时的任务; 学生看书, 采用分组讨论, 提出需要解决的问题、完成本任务的思路 and 方案; 小组发言交流, 教师对概念的具体讲解和例题的分析, 总结本任务的重难点, 最后抽查学生对本任务的掌握情况。

二极管的应用非常广泛, 利用二极管的单向导电性及导通电压很小等特点, 可实现限幅、整流、电平选择及滤波等功能。

### 1.3.1 限幅电路

在电子电路中, 为了降低信号的幅度以达到电路工作的要求或为了保护某些器件不受大信号电压作用而损坏时, 往往利用二极管的单向导电性和正向导通压降基本恒定的特性来限制信号的幅度, 称为限幅。限幅电路分为上限幅和下限幅电路。

图 1.3-1 是一个简单的上限幅电路, 假设图中二极管是理想的, 则当  $u_i \geq E$  时, VD 导通,  $u_o = E$ , 二极管的最大电压限制在  $E$ ; 当  $u_i < E$  时, VD 截止, 二极管断开,  $u_o = u_i$ 。

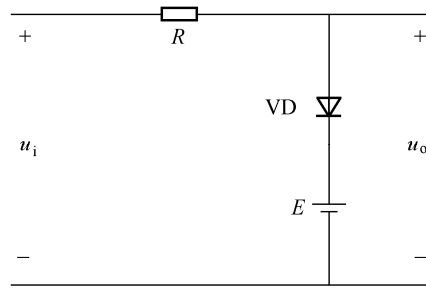


图 1.3-1 上限幅电路

例 1.2 已知电路如图 1.3-2 所示，其中二极管为理想二极管， $u_i=5\sin\Omega t\text{V}$ ，试画出输出电压  $u_o$  的波形。

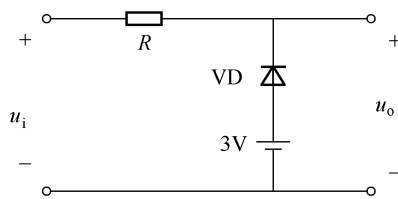


图 1.3-2 限幅电路

解：当  $u_i < 3$  时，二极管导通，此时二极管的输出电压  $u_o = 3\text{V}$ ；  
当  $u_i \geq 3$  时，二极管截止，此时二极管的输出电压  $u_o = u_i$ ；波形如图 1.3-3 所示。

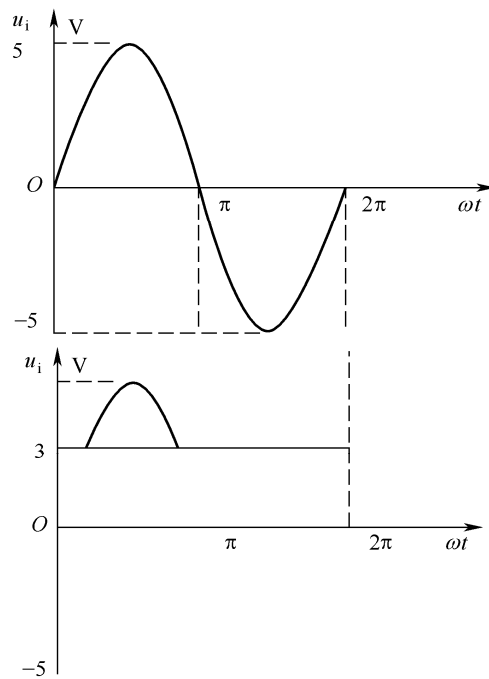


图 1.3-3 例题 1.2 波形

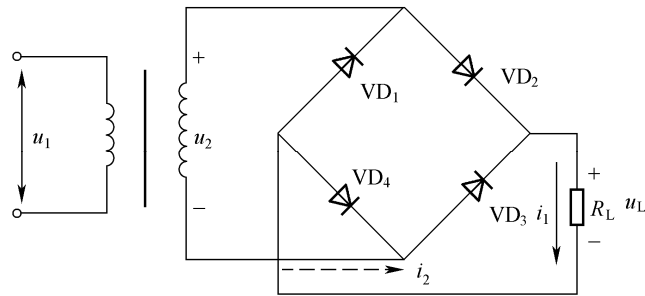
### 1.3.2 整流电路

整流就是将交流电变成脉动的直流电。利用二极管的单向导电性可以组成多种形式的整流电路，常用的整流电路有单相半波整流电路和桥式整流电路。

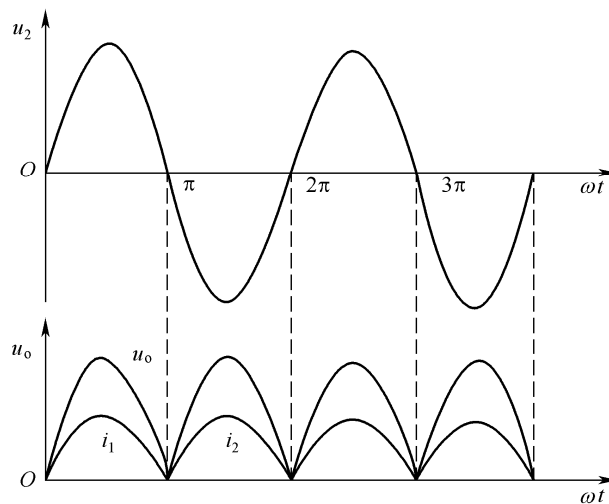
图 1.3-4 (a) 为桥式整流电路。设二极管为理想的，则

1) 在  $u_i$  正半周时，二极管  $VD_2$ 、 $VD_4$  导通， $VD_1$ 、 $VD_3$  截止，则流过负载  $R_L$  上的电流  $i_1$  为自上而下，在  $R_L$  上产生的电压  $u_L$  上正下负。

2) 在  $u_i$  负半周时，二极管  $VD_1$ 、 $VD_3$  导通， $VD_2$ 、 $VD_4$  截止，同样流过负载  $R_L$  上的电流  $i_2$  也为自上而下，在  $R_L$  上产生的电压  $u_L$  也是上正下负。因此可画出负载上的输出波形，如图 1.3-4 (b) 所示。



(a) 电路



(b) 波形

图 1.3-4 二极管全波整流电路

### 1.3.3 电平选择电路

从多路输入信号中选出最低电平或最高电平的电路，称为电平选择电路，如图 1.3-5 所示。假设二极管为理想的。

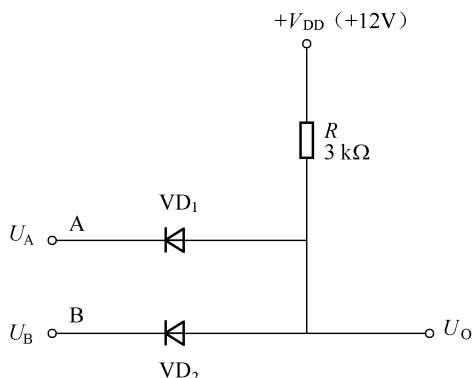


图 1.3-5 简单的电平选择电路

- 1) 当  $U_A=U_B < 12V$  输入时，二极管均导通，输出  $U_O$  为  $U_A$  ( $U_B$ )；
- 2) 当  $U_A < U_B < 12V$  输入时，此时  $VD_1$  导通，则  $U_O$  为  $U_A$ ，从而使  $VD_2$  截止；相反当  $U_B < U_A < 12V$  输入时，此时  $VD_2$  导通，则  $U_O$  为  $U_B$ ，从而使  $VD_1$  截止；
- 3) 当  $U_A=U_B \geq 12V$  时，二极管均截止，输出  $U_O$  为  $12V$ ；可见，该电路选出了任意时刻两路信号中的低电平信号。

**例 1.3** 已知电路图如图 1.3-5 所示，已知二极管是理想的，其中  $U_A$  为  $5V$ ， $U_B$  为  $7V$ ，试问二极管  $VD_1$ ， $VD_2$  的状态并求出  $U_O$ 。

**解：**已知二极管  $VD_1$ ， $VD_2$  为理想二极管，有

当  $U_A=5V$ ， $VD_1$  正向导通电压为  $7V$ ，而  $U_B=7V$ ， $VD_2$  的正向导通电压为  $5V$ ，因此  $VD_1$  会优先导通， $VD_1$  导通后， $U_O$  为  $5V$ ，这时  $VD_2$  阳极电压为  $5V$ ，比阴极电压小，所以  $VD_2$  反向截止，输出电压  $U_O$  为  $5V$ 。

## 任务四 特殊二极管及其应用

### 任务描述

任务目标	(1) 掌握稳压二极管的伏安特性 (2) 理解稳压二极管的主要参数 (3) 了解变容二极管、发光二极管、激光二极管和光电二极管的应用
任务实施方法	教师通过对稳压二极管、变容二极管、激光二极管和光电二极管实物的展示，提出本课时的任务；学生看书，采用分组讨论，提出需要解决的问题、完成本任务的思路和方案；小组发言交流，教师对概念的具体讲解和例题的分析，总结本任务的重难点，最后抽查学生对本任务的掌握情况。

二极管及其组合构成的器件种类很多，用途广泛。除了前面介绍的普通二极管外，还有一些特殊用途的二极管，如稳压二极管、变容二极管、发光二极管、激光二极管和光电二极管等，现简单介绍如下。

### 1.4.1 稳压二极管

稳压二极管（简称稳压管）是一种利用特殊工艺制成的面接触型硅二极管，其在反向击穿时，在一定的电流范围内具有稳压的作用，被广泛应用于限幅电路和直流电源的稳压电路中。

#### 一、稳压二极管的伏安特性

稳压管符号和伏安特性如图 1.4-1 所示。稳压管的正向特性曲线与普通二极管相似，若给稳压二极管外加反向电压，当反向电压达到反向击穿电压时，稳压二极管反向击穿，如果把反向电流控制在一定范围内，其反向击穿特性陡峭，几乎平行于纵轴，此时电压不变，呈稳压特性。

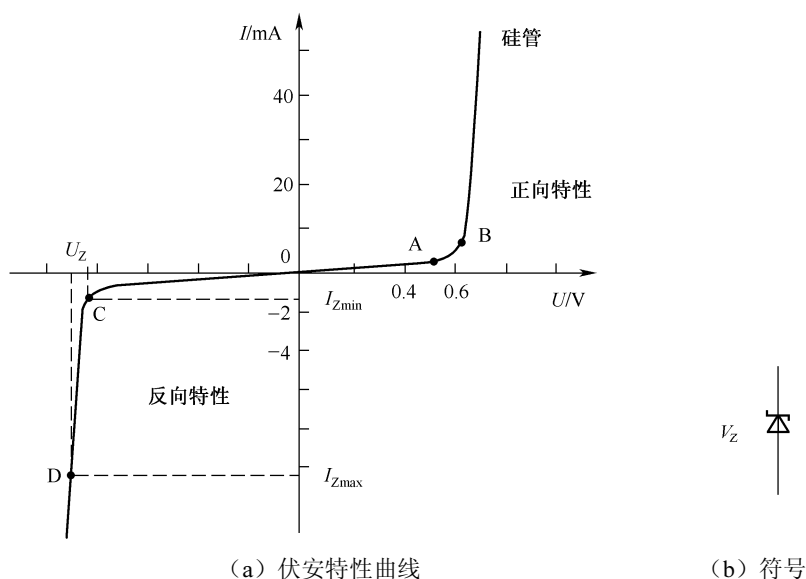


图 1.4-1 稳压管的伏安特性曲线与符号

#### 二、稳压二极管的主要参数

##### 1. 稳定电压 $U_Z$

$U_Z$ 是在规定电流  $I_Z$ 下呈现的反向击穿电压。不同型号的稳压二极管，其稳定电压值不同。由于半导体器件参数的离散性，即使是同一型号的管子， $U_Z$ 也可能不相同，例如稳压二极管 2CW21A，其稳压范围为 4~5.5V 之间。

##### 2. 稳定电流 $I_Z$

$I_Z$ 是指稳压管正常工作时的参考电流值。当工作电流小于此值时，稳压效果差，通常把此时的  $I_Z$ 记做  $I_{Zmin}$ ；在稳压管的额定功率小，电流越大，稳压效果越好。

##### 3. 额定功率 $P_{ZM}$

$P_{ZM}$ 等于最大工作电流  $I_{Zmax}$ 和它对应的稳定电压  $U_Z$ 的乘积，即  $P_Z=U_Z \times I_{Zmax}$ ，其中  $I_{Zmax}$ 为稳压管允许通过的最大电流，使用稳压管时，不能超过  $P_{ZM}$ 和  $I_{Zmax}$ ，否则稳压管会因为过热而烧坏。所以在稳压电路中，必须串接一个适当的限流电阻。

例 1.4 已知稳压二极管稳压电路如图 1.4-2 所示，若限流电阻  $R=2k\Omega$ ， $U_Z=12V$ ， $I_{Zmax}=18mA$ ，

通过稳压二极管的电流  $I_Z$  为多少？限流电阻的值是否合适？

解：由图 1-4-2 可知：
$$I_Z = \frac{(25-12)V}{2k\Omega} = 6.5mA$$

因为  $I_Z < I_{Zmax}$ ，所以限流电阻的值是合适的。

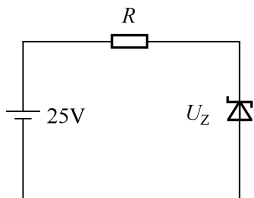


图 1.4-2 稳压二极管稳压电路

### 1.4.2 变容二极管

变容二极管工作电压为反向电压，是利用 PN 结工作在反偏时，结电容大小随外加电压的变化而变化的特性而制成的半导体器件。

从 PN 结形成原理上看出，二极管的结电容可等效为平行板电容。当二极管外加的反向电压增加时，PN 结的耗尽层就会变宽，相当于平行板电容板间距离增大，电容量减小；当外加反向电压减小时，此时耗尽层变窄，相当于平行板电容板间距离减小，电容量增大。

变容二极管的电路符号如图 1.4-3 (a) 所示，压控特性曲线如图 1.4-3 (b) 所示。变容二极管的电容量通常很小，一般在  $5\sim 300pF$  之间。变容二极管常被作为可变电容用于点时间的调谐电路中，实现选择电视频道的功能。

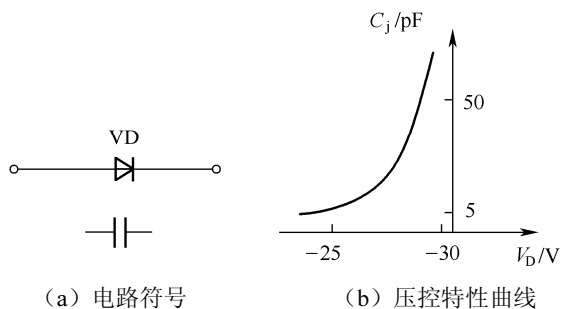


图 1.4-3 变容二极管电路符号和压控特性曲线

### 1.4.3 发光二极管

发光二极管 (LED) 能把电能转换为光能，是一种光发射器件。该类二极管的 PN 结通常是由镓 (Ga)、砷 (As)、磷 (P) 等元素的化合物制成。把正向电压加在发光二极管时，它就会发光。目前发光二极管的颜色有红、黄、橙、绿、白和蓝等，所发光的颜色取决于制造二极管所用的材料，如用砷化镓发红光，用磷化镓发绿光。

发光二极管的电路符号和伏安特性曲线如图 1.4-4 所示。发光二极管工作于正偏导通时，其伏安特性曲线与普通二极管类似，但发光二极管的开启电压和正向导通电压均高于普通二极管，开启



电压约为 1.2V，正向导通电压一般在 1.7~2.4V 之间；其工作电流一般为 5~20mA。

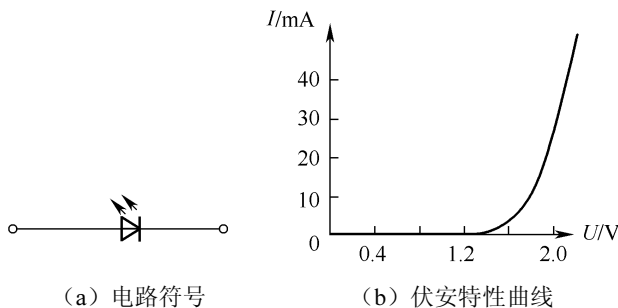


图 1.4-4 发光二极管电路符号和伏安特性曲线

#### 1.4.4 激光二极管

激光二极管 (LD) 实质上也是一种发光二极管，但其物理结构不同于 LED。激光二极管是在发光二极管的结间安置了一层具有光活性的半导体材料，其端面经过抛光后具有反射功能，从而形成一个光谐振腔。给激光二极管加正向导通电压时，光谐振腔中发射出相位、频率、方向等完全相同的激光。激光的波长与所采用的半导体材料的物理性质有关。激光的颜色很纯，而且能量高度集中，使激光二极管在小功率光电设备中得到广泛的应用，如激光唱机 (CD 唱机)、激光影碟机 (LD、VCD、DVD 影碟机) 以及计算机的光驱等。

激光二极管的电路符号和发光二极管的电路符号相同。

#### 1.4.5 光电二极管

光电二极管又称为光敏二极管，是一种将光信号转换成电信号的特殊二极管，其 PN 结工作在反向偏置状态。其电路符号、等效电路和伏安特性曲线如图 1.4-5 所示。在无光照时，光电二极管与普通二极管一样，具有单向导电性，反向电流很小 (称为暗电流，一般小于  $0.1\mu\text{A}$ )，反向电阻高达几十兆欧；当有光照时，反向电流明显增大，特性曲线下移，反向电阻下降到几千欧至几十千欧。

光电二极管的应用广泛，可用于光测量和光电控制等。大面积的光电二极管还可以将光能转换成电能，当作一种能源器件，即光电池。

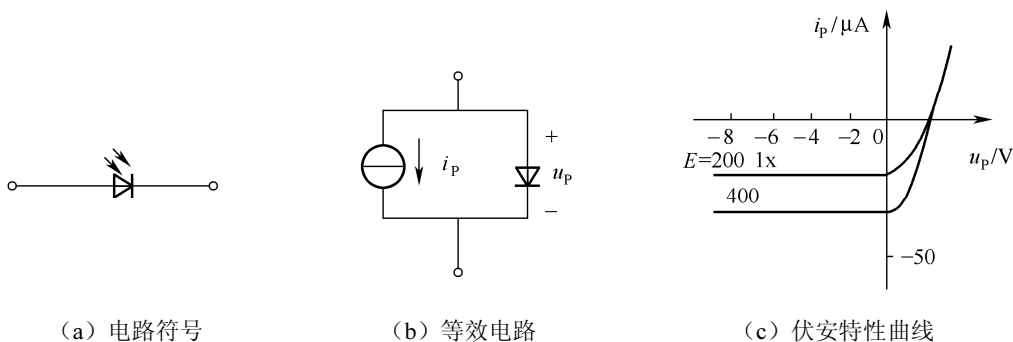


图 1.4-5 发光二极管电路符号、等效电路和伏安特性曲线

## 任务五 实验与实践

### 任务描述

任务目标	用万用表检测半导体二极管
任务实施方法	教师通过对二极管基本知识的回顾，提出本课时的任务；教师操作演示测量的方法和操作步骤，强调操作注意事项；学生实验，教师指导、检查、学生交流汇报实验结果；教师点评分析任务的完成情况，学生总结本课时的收获。

### 一、实验目的

1. 熟悉半导体二极管。
2. 掌握用万用表判别二极管引脚极性及好坏的技能。
3. 掌握用万用表测量二极管正、反向电阻的大致数据范围的方法。

### 二、实验原理

把万用表电阻档量程置  $R \times 100$  或  $R \times 1k$ ，分别用红表笔和黑表笔接触二极管的两个电极，经过两次表笔交换测量，若测量的结果电阻有明显的差别，根据二极管的单向导电性，则可认定所测二极管是好的。测量结果呈低电阻时黑表笔所接电极为二极管的正极，另一端为负极。

### 三、实验设备

各种型号的二极管若干、万用表

### 四、实验内容

1. 用万用表  $R \times 100$  档测量各二极管的正、反向电阻，并辨别引脚的极性，将各晶体二极管的型号和测得的电阻值记入表 1.5.1 中。
2. 用万用表  $R \times 1k$  档测量各二极管的正、反向电阻，将数据记入表 1.5.1 中。

表 1.5.1 二极管的正、负电阻

管型					
$R \times 100$	正向电阻				
$R \times 100$	反向电阻				
$R \times 1k$	正向电阻				
$R \times 1k$	反向电阻				

### 五、实验报告

1. 整理实验数据，分析其中的原理。
2. 其他（包括实验的心得、体会及意见等）。

## 小结

1. 半导体中参与导电的有两种载流子：自由电子和空穴。载流子有两种运动方式：多子的扩散运动和少子的漂移运动。掺入不同的杂质可分别制成 P 型和 N 型半导体。

2. PN 结是 P 型半导体和 N 型半导体的交界处的一个空间电荷区。在 PN 结两端加正向电压导通，加反向电压截止，即 PN 结的单向导电性。

3. 半导体二极管是由 PN 结组成的，因此二极管同样存在单向导电性。硅二极管的正向导通电压约 0.7V，锗管约 0.2V。根据其这一特性，可以把二极管简化成几种电路模型：理想模型、恒压降模型、折线模型和小信号模型等。

4. 二极管的应用非常广泛，可用于限幅、整流和电平选择电路等；稳压二极管是利用特殊工艺制成的一种工作在反向击穿区起稳压作用的二极管。

## 习题

### 1.1 填空题

- 在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要取决于\_\_\_\_\_，而少数载流子的浓度则与\_\_\_\_\_有很大关系。
- 当温度升高后，二极管的正向压降将\_\_\_\_\_，反向电流将\_\_\_\_\_。
- 在本征半导体中掺入微量的三价元素，可制成\_\_\_\_\_半导体；掺入微量的五价元素，即可制成\_\_\_\_\_半导体。
- PN 结具有\_\_\_\_\_性，当其加\_\_\_\_\_电压时导通，加\_\_\_\_\_电压时截止。
- 稳压管是一种特殊的\_\_\_\_\_管，它的工作区是\_\_\_\_\_。

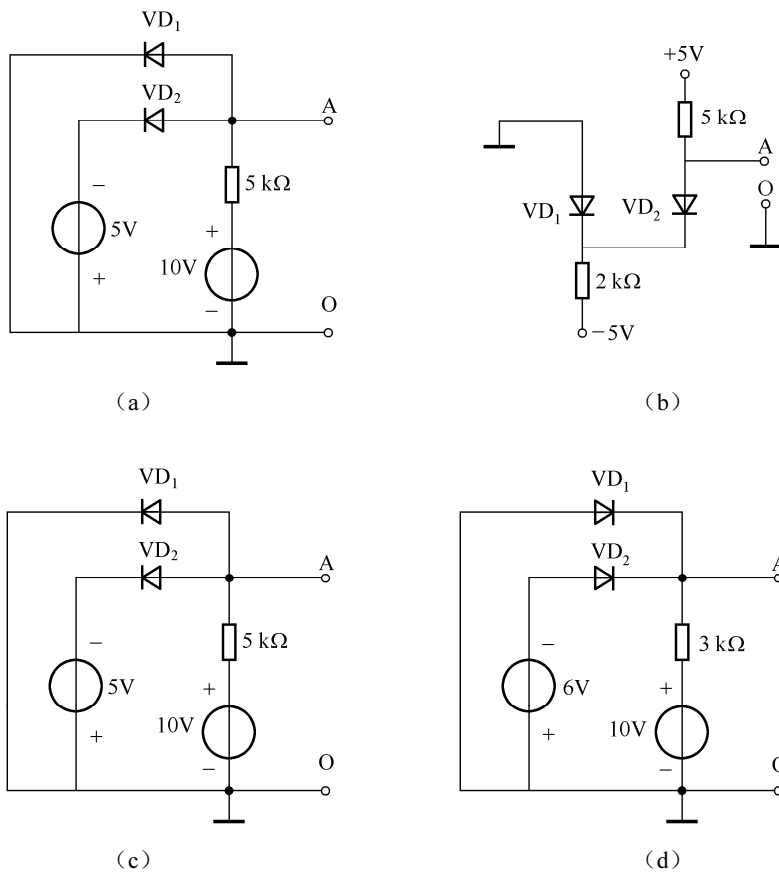
### 1.2 选择题

- 在本征半导体中自由电子的浓度（ ）空穴的浓度。  
A. 等于                      B. 高于                      C. 低于
- 普通二极管的工作区是（ ）。  
A. 反向特性区              B. 正向和反向特性区      C. 击穿区
- PN 结外加正向电压时，空间电荷区将（ ）。  
A. 变窄                      B. 不变                      C. 变宽
- 如果二极管的正、反向电阻都很小或为零时，该二极管（ ）  
A. 已被击穿                  B. 内部断路                  C. 正常

### 1.3 判断题

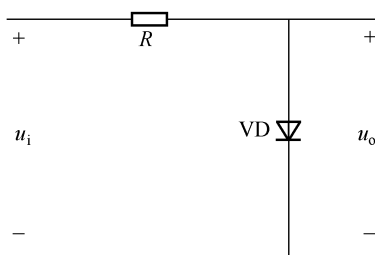
- 在 N 型半导体中，掺入高浓度的三价杂质，可以改型成 P 型半导体。                      ( )
- P 型半导体中空穴数多于自由电子数，所以呈正电性。                                      ( )
- 二极管的伏安特性可大概理解为反向偏置导通，正向偏置截止。                              ( )
- 稳压二极管工作在正常反向击穿状态，切断外加电压后，PN 结应处于反向击穿状态。                                      ( )

1.4 习题图 1.1 所示各电路中, 设二极管为理想二极管, 试判断各二极管是导通还是截止, 并求出 AO 两端的电压  $U_{AO}$ 。



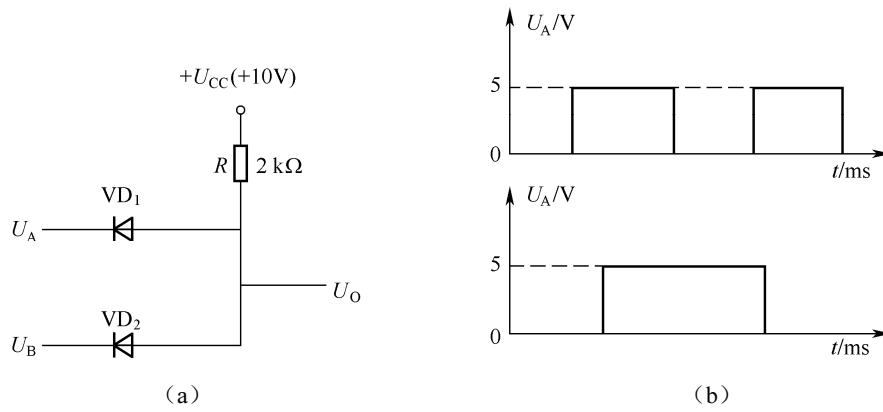
习题图 1.1

1.5 电路如习题图 1.2 所示, 设二极管为理想二极管, 已知  $u_i = 5 \sin \omega t \text{ V}$ , 试画出  $u_i$  和  $u_o$  的波形。



习题图 1.2

1.6 习题图 1.3 (a) 所示电路中,  $VD_1$ 、 $VD_2$  为硅管, 导通压降均为  $0.7\text{V}$ , 习题图 1.3 (b) 为输入  $U_A$ 、 $U_B$  的波形, 试画出输出电压  $u_o$  的波形图。



习题图 1.3

1.7 有两只稳压管  $VZ_1$  和  $VZ_2$ ，其稳定电压值为  $5V$  和  $8V$ ，正向压降都是  $0.5$ 。如果要得到  $3V$  的稳定电压，应如何选择？