

# 学习情境一

## 半导体二极管及其应用



### 情境导入

以二极管的单向导电性实验、发光二极管的亮灭现象和稳压管的使用为切入点，要求学生要掌握半导体二极管的单向导电性和伏安特性以及发光二极管的工作电压和稳压二极管的稳压原理。对比市场上台灯种类，为什么LED台灯偏贵呢？LED台灯有节能、护眼功能，而且无频闪，LED台灯有这么多种性能特点，它的制作成本是不是很贵呢？不是，实际上它的制作成本只要区区几元钱，但它的组成元件比一般的台灯成本更高。制作LED台灯需要的元件清单有：灯壳、灯罩、灯板（或者万能板）、导线若干、电阻（100 k 一个，470 两个）、二极管（1N4007 四个）、涤纶电容（0.22  $\mu\text{F}$ ）、电解电容（4.7  $\mu\text{F}$ ）、发光二极管（5 mm 白色 12 个）。这个电路采用220 V市电供电，利用涤纶电容和电阻（100 k）降压，电阻（100 k）是涤纶电容的放电电阻，二极管（1N4007 四个）构成桥式整流，电解电容（4.7  $\mu\text{F}$ ）是滤波电容，和电阻（470）组成滤波电路，推动12只LED发光，全灯实测功耗约为1 W。那么LED台灯是如何实现一般台灯无法实现的功能呢？



### 学习导航

1. 学习电子技术基础知识，了解常用电子元器件的功能。
2. 学习了解二极管整流电路等常用电路。
3. 学习对二极管极性的判断，掌握万用表的使用方法。
4. 学习了解特殊二极管，如发光二极管、整流二极管、稳压二极管等。

## 单元一 半导体的基础知识

### 知识目标

学习本征半导体的特点、导电原理、杂质半导体的特点、PN结的特性。

### 技能目标

通过本单元的学习，重点掌握半导体的特点和导电原理，掌握光敏电阻、热敏电阻的使用，熟悉制作光敏电阻、热敏电阻电路。

### 基础知识

#### 一、半导体的导电特性

半导体二极管、双极性三极管、场效应管和集成电路等半导体器件都是由半导体材料构成的。下面介绍半导体材料的一些基本特性。

##### （一）什么是半导体

物质存在的形式多种多样，如固体、液体、气体、等离子体等。我们通常把导电性差或不好的材料，如金刚石、人工晶体、琥珀、陶瓷等，称为绝缘体。而把导电性比较好的金属，如金、银、铜、铁、锡、铝等，称为导体。根据物体导电能力（电阻率）的不同，来划分导体、绝缘体和半导体，可以简单地把介于导体和绝缘体之间的材料称为半导体。与导体和绝缘体相比，半导体材料的发现是最晚的，典型的半导体有硅（Si）和锗（Ge）以及砷化镓（GaAs）等。直到20世纪30年代，当材料的提纯技术改进以后，半导体的存在才真正被学术界认可。

为什么有的物质容易导电，有的物质不容易导电呢？根本原因在于物质内部的原子结构，看其内部运载电荷的粒子（简称载流子）有多少。原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的，电子分成几层围绕原子核不停地运动。原子核对内层电子的吸引力较大，对外层电子的吸引力较小。

金属导体的外层电子受原子核的束缚力很小，在室温下有大量电子能够挣脱束缚而成为自由电子。这些自由电子成为载流子，它们在外电场的作用下作定向运动就形成了电流。由于金属的载流子很多，所以导电性能很好。绝缘体中的原子的外层电子受原子核的束缚力很大，在室温下不容易挣脱出来。由于载流子很少，所以绝缘体导电性能很差。半导体的原子结构比较特殊，在室温下，载流子数目比导体少很多，但比绝缘体多得多，所以导电性能介于导体和绝缘体之间。为了定量描述导体、绝缘体、半导体，引入了电阻率这个物理量，用电阻率的大小来区分导体、绝缘体、半导体。通常将电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为导体；电阻率大于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为绝缘体；电阻率介

于  $10^{-4} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  的一大类物质统称为半导体。

半导体材料之所以备受人们关注，并且得到广泛的应用，不是源于它们的电阻率在数值上与导体和绝缘体的区别，而是在于它们具有独特的区别于导体和绝缘体的物理特性。第一，半导体的电阻率具有热敏性，随温度的升高而明显地降低（负温度系数），而一般金属的电阻率随温度升高而增加。利用半导体的这种特性，很容易制成热敏电阻或其他对温度敏感的传感器。第二，半导体的电阻率具有光敏性，即光照可改变半导体的导电特性，光照越强，电阻率越低。这是半导体区别于导体和绝缘体的另一特性。例如硫化铝薄膜电阻，无光照时，电阻为几十兆欧姆，当光照时，其电阻仅为几万欧姆。第三，半导体的电阻率受杂质的影响很大，这种杂质性与导体和绝缘体截然不同。在金属导体中掺入少量杂质后，其电阻率虽有增加但变化不大；而半导体却不同，在纯净的半导体中掺入极微量的杂质，就能使其导电性能大幅度地改变。不仅如此，选择不同类型的杂质，还可以改变半导体的导电类型。



## 知识拓展

### 半导体技术

半导体技术就是以半导体为材料，制作成组件及集成电路的技术。把组件做得越小，芯片上能制造出来的 IC 数也就越多。尽管每片芯片的制作成本会因技术复杂度增加而上升，但是每颗 IC 的成本却会下降。因此价格不但不会因性能变好或功能变强而上涨，反而是越来越便宜。正因如此，综观其它科技的发展，从来没有哪一种产业能够像半导体这样，持续维持三十多年的快速发展。

纳米技术有很多种，基本上可以分成两类，一类是由下而上的方式或称为自组装的方式，另一类是由上而下所谓的微缩方式。前者以各种材料、化工等技术为主，后者则以半导体技术为主。以前我们都称 IC 技术是微电子技术，那是因为晶体管的大小是在微米（ $10^{-6} \text{m}$ ）等级。但是半导体技术发展得非常快，每隔两年就会进步一个时代，尺寸会缩小成原来的一半，这就是有名的摩尔定律。半导体由次微米，即小于微米的时代，进入深次微米，即比微米小很多的时代。到了 2001 年，晶体管尺寸甚至已经小于  $0.1 \mu\text{m}$ ，也就是小于 100 nm，因此是纳米电子时代。未来的 IC 大部分会由纳米技术做成。但是为了达到纳米的要求，半导体制程的改变须从基本步骤做起。每进步一个时代，制作步骤的要求都会变得更严格、更复杂。

### （二）本征半导体

本征半导体就是纯净（不含杂质）而且具有完整晶体结构的半导体，它在物理结构上呈单晶体形态。

典型的半导体有硅和锗，硅和锗是四价元素，在原子最外层轨道上的四个电子称为价电子。硅和锗的物理性质、化学性质主要由这 4 个价电子决定。在实际问题中，为了突

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

出价电子的作用和便于讨论，通常把原子核和内层电子看作一个整体，称为惯性核。它的静电量为 4 个电子电量。于是就可以得到原子的简化模型，如图 1-1 所示。

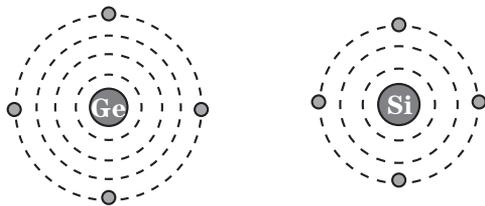


图 1-1 简化原子结构模型

以硅原子为例，硅原子的每个价电子分别与相邻硅原子的 1 个价电子组成 1 个价电子对，这个价电子对为相邻 2 个原子所共有。共价键中的价电子为这些原子所共有，并为它们所束缚，在空间形成排列有序的晶体。价电子对中的每一个价电子，一方面围绕原来的原子核运动，同时又围绕相邻原子核转动，它们同时受到两个原子核的吸引作用。我们把这种对共有价电子所形成的束缚作用叫做共价键，如图 1-2 所示。

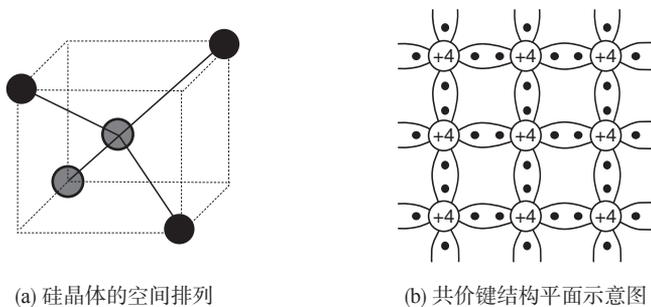


图 1-2 硅原子空间排列及共价键结构平面示意图

当温度为绝对零度（约  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）时，价电子不能从外界获得能量，不能挣脱原子核的束缚，导体中没有可以自由运动的自由电子，如同绝缘体一样。当温度升高或受到光的照射时，价电子能量增高，有的价电子可以挣脱原子核的束缚，而参与导电，成为自由电子。自由电子是一种可以参与导电的带电粒子，称为载流子。在外电场的作用下，自由电子作定向运动形成电流。这与金属是相同的。

自由电子产生的同时，在其原来的共价键中就出现了一个空位，人们常称呈现正电性的这个空位为空穴。在本征半导体中，受激发产生一个自由电子，必然相伴产生一个空穴，电子和空穴是成对出现的，这种现象称为本征激发。可见因热激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的，称为电子空穴对。游离的部分自由电子也可能回到空穴中去，称为复合，如图 1-3 所示（图中电子用“ $\bullet$ ”表示，空穴用“ $\circ$ ”表示）。本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。

自由电子的定向运动形成了电子电流，空穴的定向运动也可形成空穴电流，它们的方向相反，空穴的运动是靠相邻共价键中的价电子依次充填空穴来实现的。

本征半导体中电流由两部分组成：自由电子移动产生的电流和空穴移动产生的电流。本征半导体的导电能力取决于载流子的浓度。温度越高，载流子的浓度越高，因此本征半导体的导电能力越强。温度是影响半导体性能的一个重要的外部因素，这是半导体的一大特点。

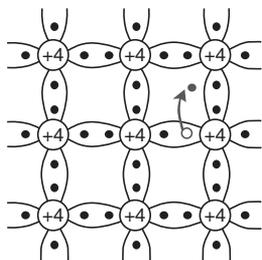


图 1-3 自由电子 - 空穴对的产生



### 课堂讨论

自然界有没有纯净的本征半导体？



## 二、杂质半导体

在室温下，本征半导体的导电能力很差，而且也不好控制，不能用来制造半导体器件。如果在本征半导体中适当地掺入少量的有用杂质元素，则可以大大提高半导体的导电能力，而且可以利用掺杂元素的多少来精确地控制半导体的导电能力。这种人为掺入杂质的半导体称为杂质半导体。按掺入的杂质的不同（主要是三价或五价元素），可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

### （一）N 型半导体

在本征半导体中硅晶体内掺入微量的五价元素，例如磷，可形成 N 型半导体，也称电子型半导体。由于掺入的 P 原子数量极微，并不改变硅单晶的共价键结构，只是使某些晶格节点上的硅原子被磷原子所取代，如图 1-4 所示。

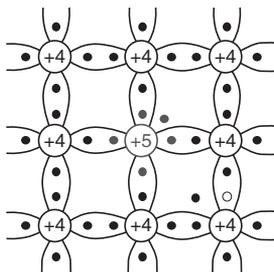


图 1-4 N 型半导体的结构示意图

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08

磷原子有 5 个价电子，除了 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子组成共价键外，多余的一个价电子不参加共价键，只受磷原子核的微弱吸引，在室温下这个价电子受热激发获得的能量足以使它摆脱磷原子核的束缚而成为一个自由电子，几乎每个磷原子都能提供一个这样的自由电子，失去价电子的磷本身成为一个带正电的不能移动的正离子，所以磷原子仅提供一种载流子，即自由电子，故磷原子称为施主杂质。掺入施主杂质的半导体中，自由电子的数量远远大于空穴的数量，这类杂质的半导体成为电子型半导体，或 N 型半导体。



### 课堂讨论

N 型半导体中多子和少子分别是什么？N 型半导体带电吗？带正电还是负电？

## （二）P 型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质元素（如硼、镓、铟等），形成了 P 型半导体，也称为空穴型半导体。由于硼的价电子只有 3 个，当它与周围的硅原子形成共价键时，因缺少一个价电子而在共价键中留下一空位，如图 1-5 所示。

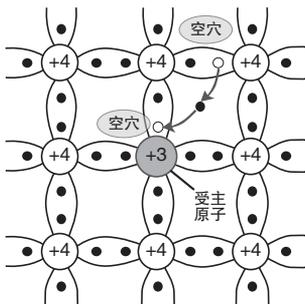


图 1-5 P 型半导体的结构示意图

由于结构的不稳定，硼原子很容易从相邻硅原子的共价键中夺取一个束缚电子而形成稳定结构，硼原子接受一个电子而变成带负电的不能移动的负离子，同时硅原子的共价键失去一个束缚电子便出现了一个新的空位（即空穴）。在常温下几乎每一个硼原子均接受硅晶体中的一个束缚电子而产生一个空穴，从而提供了与杂质硼原子相等的空穴，所以硼原子称为受主杂质。受主杂质仅产生空穴（一种载流子）。这种掺杂三价杂质元素的半导体中，空穴是多数载流子，所以称为空穴型半导体，或 P 型半导体。



### 知识链接

在 N 型半导体中，也同样存在着本征激发的现象，有电子—空穴对的产生，但比起掺杂而产生的电子来说数量少，传递电流的主要载流子是电子，故电子成为多数载流子（简称“多子”），空穴相应地称为少数载流子（简称“少子”）。而且由于电子的增多，空穴遇到电子

而被复合的概率增大，N型半导体中空穴的浓度远小于同温度下本征半导体中空穴的浓度。在N型半导体中多子电子的浓度几乎由掺杂浓度决定。

P型半导体中也同样存在本征激发的现象，有电子—空穴对的产生，但比起掺杂产生的空穴来说数量很少，传递电流的主要载流子是空穴，故空穴称为多数载流子，电子相应地称为少数载流子，电子的浓度远小于同温度下本征半导体中电子的浓度。在P型半导体中多子空穴的浓度几乎由掺杂浓度决定。

实际的半导体材料，尽管纯度很高，但其中难免有杂质存在，而且还经常需要在同一块半导体中同时掺入施主杂质和受主杂质。施主杂质和受主杂质对半导体导电性能的影响可以互相抵消，这种现象称为杂质补偿。在一块半导体中，如果受主杂质的浓度大于施主杂质的浓度，半导体为P型半导体；如果施主杂质的浓度大于受主杂质的浓度，半导体为N型半导体。



### 思考与分析

P型半导体中多子和少子分别是什么？P型半导体带电吗？带正电还是负电？



## 三、PN 结的导电特性

### (一) PN 结的形成

在一块完整的晶片上，通过一定的掺杂工艺，使晶片的一边为P型半导体，另一边为N型半导体，则在这两种半导体的交界处会形成一个具有特殊物理性质的带电薄层，称为PN结。PN结的形成可分成三个阶段来说明。

#### 1. 扩散的进行和空间电荷区的形成

在P型半导体和N型半导体结合后，由于N型区内电子很多而空穴很少，而P型区内空穴很多电子很少，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别。这样，电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。于是，有一些电子要从N型区向P型区扩散，也有一些空穴要从P型区向N型区扩散。它们扩散的结果就是P区一边失去空穴，留下了带负电的杂质离子，N区一边失去电子，留下了带正电的杂质离子。半导体中的离子不能任意移动，因此不参与导电。这些不能移动的带电粒子在P和N区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，即PN结。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，因此空间电荷区有时又称为耗尽区，它的电阻率很高。扩散越强，空间电荷区越宽。如图1-6所示。

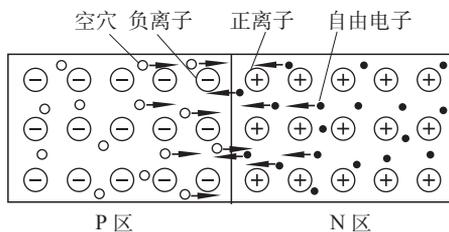


图 1-6 PN 结的扩散运动

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

## 2. 内建电场的形成和漂移运动的形成

在出现了空间电荷区以后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间电荷区就形成了一个内电场，其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。由于这个内电场是由载流子（内部）扩散运动形成的，故称为内建电场。显然，这个内建电场的方向是阻止扩散运动的。

另外，这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移，使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴，从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子，这就使空间电荷减少，内电场减弱。因此，漂移运动的结果是使空间电荷区变窄，其作用正好与扩散运动相反。

## 3. 扩散运动与漂移运动相平衡

由上述可见，扩散运动和漂移运动是互相联系又互相矛盾的。扩散使空间电荷区加宽，电场增强，对多数载流子扩散的阻力增大，但使得少数载流子的漂移增强；而漂移使得空间电荷区变窄，电场减弱，又使得扩散容易进行。最后，多子的扩散和少子的漂移到动态平衡，此时，PN 结处于稳定状态，如图 1-7 所示。

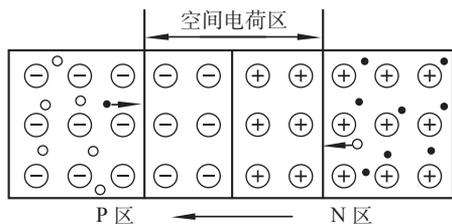


图 1-7 PN 结的形成

在 P 型半导体和 N 型半导体的结合面两侧，留下离子薄层，这个离子薄层形成的空间电荷区称为 PN 结。PN 结的内电场方向由 N 区指向 P 区。在空间电荷区，由于缺少多子，所以也称耗尽层。为便于理解才分上述三步讨论，实际上扩散运动与漂移运动是同时进行的，并且 PN 结在很短时间内即处于稳定状态。

## (二) PN 结的单向导电性

### 1. PN 结加正向电压时的导电情况

PN 结加正向电压时的导电情况如图 1-8 所示。

如果电源的正极接 P 区，负极接 N 区，外加的正向电压有一部分降落在 PN 结区，PN 结处于正向偏置。电流便从 P 型一边流向 N 型一边，空穴和电子都向界面运动，使空间电荷区变窄，电流可以顺利通过，方向与 PN 结内电场方向相反，削弱了内电场。于是，内电场对多子扩散运动的阻碍减弱，扩散电流加大。扩散电流远大于漂移电流，可忽略漂移电流的影响，PN 结呈现低阻性。

## 2. PN 结加反向电压时的导电情况

PN 结加反向电压时的导电情况如图 1-9 所示。

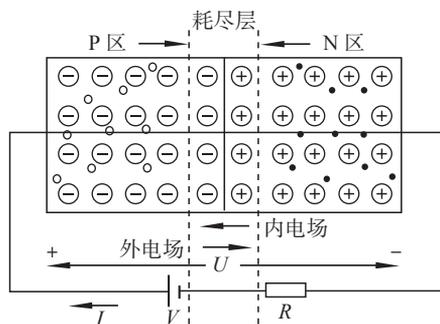


图 1-8 PN 结加正向电压时的导电情况

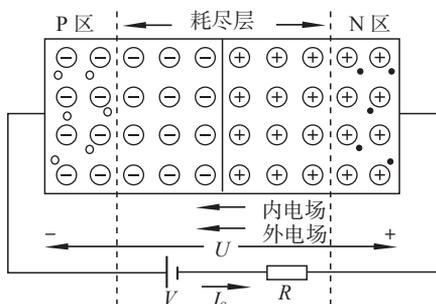


图 1-9 PN 结加反向电压时的导电情况

如果电源的正极接 N 区，负极接 P 区，外加的反向电压有一部分降落在 PN 结区，PN 结处于反向偏置。则空穴和电子都向远离界面的方向运动，使空间电荷区变宽，电流不能流过，方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场。内电场对多子扩散运动的阻碍增强，扩散电流大大减小。此时 PN 结区的少子在内电场作用下形成的漂移电流大于扩散电流，可忽略扩散电流，PN 结呈现高阻性。在一定的温度条件下，由本征激发决定的少子浓度是一定的，故少子形成的漂移电流是恒定的，基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为反向饱和电流。

## 3. PN 结的伏安特性

PN 结加正向电压时，呈现低电阻，具有较大的正向扩散电流；PN 结加反向电压时，呈现高电阻，具有很小的反向漂移电流。由此可以得出结论：PN 结具有单向导电性。PN 结的伏安特性（外特性）如图 1-10 所示，它直观形象地表示了 PN 结的单向导电性。

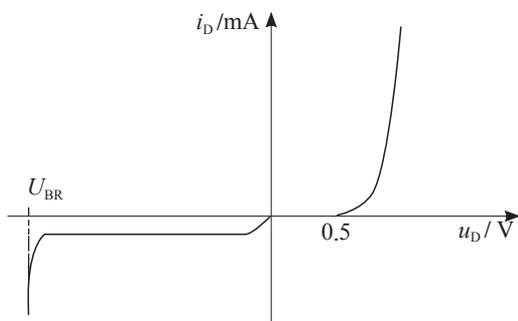


图 1-10 PN 结的伏安特性

伏安特性的表达式为：

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

$$U_T = \frac{kT}{q} = \frac{300}{11600} = 0.026 \text{ (V)} \quad (1-2)$$

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08

式中  $i_D$  为通过 PN 结的电流,  $U_D$  为 PN 结两端的外加电压,  $U_T$  为温度的电压当量, 其中  $k$  为玻耳兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T$  为热力学温度, 即绝对温度 (300 K),  $q$  为电子电荷 ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )。  $I_S$  为反向饱和电流, 对于分立器件, 其典型值在  $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{ A}$  的范围内。集成电路中二极管 PN 结的  $I_S$  值则更小。

当 PN 结两端的外加电压  $U_D$  为正向电压时, 电压  $U_D$  为正值, 且  $U_D > U_T$  时, 当  $U_D$  比  $U_T$  大几倍时, PN 结的电流与电压成指数关系, 即图 1-10 的正向电压部分所示。

当 PN 结两端的外加电压  $U_D$  为反向电压时, 电压  $U_D$  为负值, 指数项趋近于零, 因此,  $i_D \approx -I_S \approx 0$ , 即图 1-10 的反向电压部分所示。

### (三) PN 结的电容效应

PN 结加反向电压时, 空间电荷区中的正负电荷构成一个电容性的器件。它的电容量随外加电压的改变而改变, 主要有势垒电容 ( $C_B$ ) 和扩散电容 ( $C_D$ )。势垒电容和扩散电容均是非线性电容。

#### 1. 势垒电容

势垒电容是由空间电荷区的离子薄层形成的。当外加电压使 PN 结上压降发生变化时, 离子薄层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。势垒区类似平板电容器, 其交界两侧存储着数值相等极性相反的离子电荷, 电荷量随外加电压的变化而变化, 称为势垒电容, 用  $C_B$  表示。

在 PN 结反偏时结电阻很大,  $C_B$  的作用不能忽视, 特别是在高频时, 它对电路有较大的影响。  $C_B$  不是恒值, 而是随  $V$  而变化, 利用该特性可制作变容二极管。

#### 2. 扩散电容 $C_D$

PN 结正向导电时, 多子扩散到对方区域后, 在 PN 结边界上积累, 并有一定的浓度分布。积累的电荷量随外加电压的变化而变化, 当 PN 结正向电压加大时, 正向电流随着加大, 这就要求有更多的载流子积累起来以满足电流加大的要求; 而当正向电压减小时, 正向电流减小, 积累在 P 区的电子或 N 区的空穴就要相对减小, 这样, 当外加电压变化时, 有载流子向 PN 结“充入”和“放出”。PN 结的扩散电容  $C_D$  描述了积累在 P 区的电子或 N 区的空穴随外加电压的变化而变化的电容效应。

$C_D$  是非线性电容, PN 结正偏时,  $C_D$  较大, 反偏时载流子数目很少, 因此反偏时扩散电容数值很小, 一般可以忽略。

### (四) PN 结的击穿特性

PN 结加反向电压时, 空间电荷区变宽, 区中电场增强。反向电压增大到一定程度时, 反向电流将突然增大。如果外电路不能限制电流, 则电流会大到将 PN 结烧毁。反向电流突然增大时的电压称击穿电压 ( $U_{BR}$ )。基本的击穿机构有两种, 即隧道击穿 (也叫齐纳击穿) 和雪崩击穿, 前者击穿电压小于 5 V, 有负的温度系数, 后者击穿电压大

于 8 V，有正的温度系数。

### 1. 雪崩击穿

阻挡层中的载流子漂移速度随内部电场的增强而相应加快到一定程度时，其动能足以把束缚在共价键中的价电子碰撞出来，产生自由电子 - 空穴对，新产生的载流子在强电场作用下，再去碰撞其它中性原子，又产生新的自由电子 - 空穴对，如此连锁反应，使阻挡层中的载流子数量急剧增加，像雪崩一样。雪崩击穿发生在掺杂浓度较低的 PN 结中，阻挡层宽，碰撞电离的机会较多，雪崩击穿的击穿电压高。

### 2. 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，这样即使施加较小的反向电压（5 V 以下），在强电场作用下，也会强行促使 PN 结内原子的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，它们在反向电压的作用下，形成很大的反向电流，出现了击穿。显然，齐纳击穿的物理本质是场致电离。

采取适当的掺杂工艺，将硅 PN 结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。

## 知识拓展

### PN 结的制作工艺

利用固态扩散原理将杂质元素按要求的深度掺入半导体表面或体内指定区域的工艺。在硅集成电路工艺中，主要是掺化学元素 III 族和 V 族杂质。掺入 III 族元素形成 P 区；掺入 V 族元素形成 N 区。杂质扩散工艺用于制作 PN 结或构成集成电路中的电阻、电容、互连布线、二极管和晶体管等器件，也用于器件之间的隔离。

早在 20 世纪 50 年代，人们就开始对一些元素在硅中的扩散性状进行研究。利用这些研究成果发展起来的扩散工艺很快成为制造硅器件的一种主要掺杂技术。20 世纪 50 年代末至 60 年代初，扩散工艺与氧化、光刻等技术相结合，运用于平面晶体管的制造，形成了由扩散、氧化、光刻等技术所组成的一种先进的硅器件加工工艺，称为硅平面工艺。单片硅集成电路工艺就是在平面工艺的基础上发展起来的，在大规模和超大规模集成电路制造中，已被逐步采用，但扩散工艺仍是集成电路制造中的一种主要掺杂工艺。

集成电路的衬底通常是硅片。常温下杂质在硅内扩散很慢，尽管多数集成电路要求的杂质扩散只有零点几到 1 μm 或 2 μm 的深度，但对多数杂质（如硅中的 III 族、V 族元素）来说，要求扩散温度很高，掺杂过程才能在较短时间内完成。因此，制造集成电路的扩散工艺，就是在一个系统内把硅片和杂质源以一定的温度加热一定的时间，以达到所需的掺杂浓度和深度，如图 1-11 所示。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

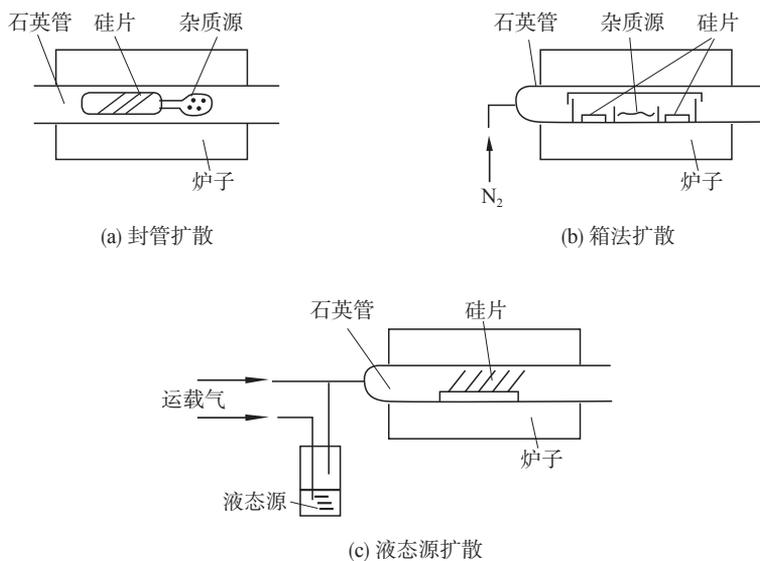


图 1-11 扩散装置示意图

杂质扩散工艺最早使用的是封管法扩散，这是把杂质源和硅片一起封入一个抽成一定真空状态的石英管中加热，使杂质元素扩散到硅中去。箱法扩散是对封管法扩散的改进，采用一个石英或硅制成的带盖子的箱子，扩散时把硅片和杂质源一起放入箱内，盖上盖子送入扩散炉管中，炉管内的惰性气体起保护作用。硅片并不与杂质源接触，只是暴露在杂质源形成的气氛中。如果杂质源是气体，则可用运载气体直接把气体或蒸气引入石英管内，由气相杂质与硅表面反应而向硅片内扩散相应的杂质。这时往往使用通气的开放性石英管，常称开管扩散。另一类扩散方法是把杂质源淀积在硅片上，然后把这种硅片放在高温下进行扩散。在硅片上淀积杂质源薄膜的方法很多，如金扩散时就是先把金蒸发或溅射到硅片上生成金膜。至于扩散磷、砷和硼等杂质，可用化学气相淀积在硅片上，生成含有上述杂质的氧化硅膜或多晶硅膜；还可用含杂质元素或其化合物的二氧化硅乳胶在硅片上生成含杂质的二氧化硅薄膜等，这种方法称为固-固扩散，即杂质从固相薄膜向固相的硅中扩散。利用乳胶生成薄膜，有时直接称为乳胶源扩散。平面源或片状源扩散是一种新的扩散工艺，其实是接近于箱法的一种扩散法，只是把固态的扩散杂质源和一些其他成型物质一起制成陶瓷或微晶玻璃圆片，与硅片交替地插在石英扩散舟中进行扩散。用这方法可以获得较均匀的扩散层，而且换源也比较方便。

对杂质扩散工艺的要求是：准确控制浓度和深度；在整个半导体片内扩散均匀；片间和批次间有均一性。扩散浓度在很大程度上决定于源的情况，当源足量时则决定于温度，因为杂质的固溶度决定杂质在半导体表面的浓度。一个圆片内的扩散均匀性，在很大程度上取决于表面的严格处理；而片与片以及批与批间的均一性，除恒温区稳定，气流形式合适和源稳定外，还要求保持扩散环境的洁净（包括炉管和洁净室等）。杂质

扩散不仅仅是在扩散这一道工序中进行，而是在掺入杂质后的任何一道加温处理的工序中继续进行。因此，关于扩散结深和分布参数，还要计入后道工序的效应（除扩散外还要考虑分凝等）。

## 学习案例

### 热敏电阻电路（电热水器温控电路）

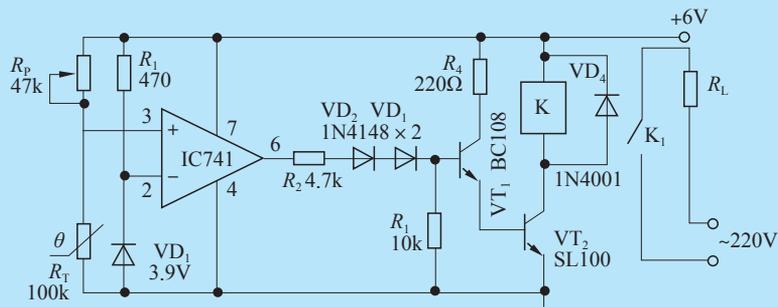
热敏电阻器是敏感元件的一类，按照温度系数不同分为正温度系数热敏电阻器（PTC）和负温度系数热敏电阻器（NTC）。热敏电阻器的典型特点是对温度敏感，不同的温度下表现出不同的电阻值。正温度系数热敏电阻器（PTC）在温度越高时电阻值越大，负温度系数热敏电阻器（NTC）在温度越高时电阻值越小，它们同属于半导体器件。

以正温度系数热敏电阻为例，当热敏电阻电路正常工作时，热敏电阻温度与室温相近、电阻很小，串联在电路中不会阻碍电流通过；而当电路因故障而出现过大电流时，热敏电阻由于发热功率增加导致温度上升，当温度超过开关温度，电阻瞬间会剧增，回路中的电流迅速减小到安全值。热敏电阻动作后，电路中电流有了大幅度的降低。

## 案例分析

1. 原理分析：当温度低于其设定的数值之后，传感器通过电流电压的进阶控制电路开关，给电热丝通电，加热，当温度达到  $100^{\circ}\text{C}$  后，断开加热。下图所示电路是电热水器温度控制器电路，电路主要由热敏电阻、比较器、驱动电路及加热电路等组成。当水温高于  $90^{\circ}\text{C}$  时，比较器输出端变为低电位，两个二极管截止，三极管也截止，继电器 K 则不通电，断开加热器电路，停止加热。调节  $R_p$  可得到要求的水温；当水温降低时，3 端的电压升高，当电压比 2 端电压高时，比较器输出端变为低电位，二极管导通，三极管也导通，继电器 K 通电工作，加热器电路启动，开始加热。

2. 电路图，见下图。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

## 单元二 半导体二极管

### 知识目标

1. 了解半导体二极管的结构。
2. 熟悉半导体二极管的单向导电性、图形符号、伏安特性、主要参数、温度对特性的影响、简单应用等。
3. 掌握二极管的几种等效方法。
4. 二极管常用的电路，如整流电路、限幅电路等。

### 技能目标

通过本单元的学习，重点掌握二极管的外特性和参数，正确使用和合理选择二极管。重点掌握理想二极管的等效方法，熟练运用到二极管电路中。熟悉制作二极管电路的方法。

### 基础知识

#### 一、二极管的结构及表示方法

半导体二极管，也称晶体二极管，它是由一个 PN 结加上欧姆接触电极、引线和管壳封装而成的电子器件。

二极管种类有很多，按照所用的半导体材料，可分为锗二极管（Ge 管）和硅二极管（Si 管）。根据其不同用途，可分为检波二极管、整流二极管、稳压二极管、开关二极管、隔离二极管、肖特基二极管、发光二极管、硅功率开关二极管、旋转二极管等。按照管芯结构，又可分为点接触型二极管、面接触型二极管及平面型二极管。点接触型二极管是用一根很细的金属丝压在光洁的半导体晶片表面，通以脉冲电流，使触丝一端与晶片牢固地烧结在一起，形成一个“PN 结”。由于是点接触，只允许通过较小的电流（不超过几十毫安），所以适用于高频小电流电路，如收音机的检波等。面接触型二极管的“PN 结”面积较大，允许通过较大的电流（几安到几十安），主要用于把交流电变换成直流电的“整流”电路中。平面型二极管是一种特制的硅二极管，它不仅能通过较大的电流，而且性能稳定可靠，多用于开关、脉冲及高频电路中，如图 1-12 所示。

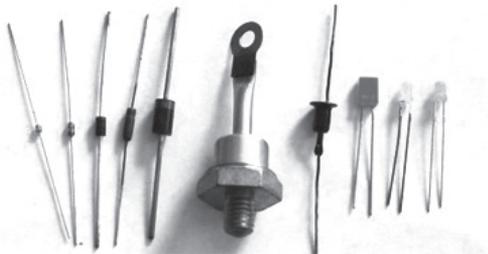


图 1-12 小功率管、大功率管、稳压管、发光二极管

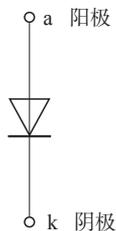


图 1-13 二极管的符号



### 课堂讨论

在日常生活中，哪些地方用到了二极管？它们的作用是什么？

#### (一) 二极管的构造

在 PN 结上加上引线 and 封装，就成为二极管。二极管按结构分有点接触型、面接触型和平面型三大类。二极管的符号如图 1-13 所示。它们的结构示意图如图 1-14a、b、c 所示。

- ①点接触型二极管——PN 结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路。
- ②面接触型二极管——PN 结面积大，用于低频大电流整流电路。
- ③平面型二极管——往往用于集成电路制造工艺中。PN 结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中。

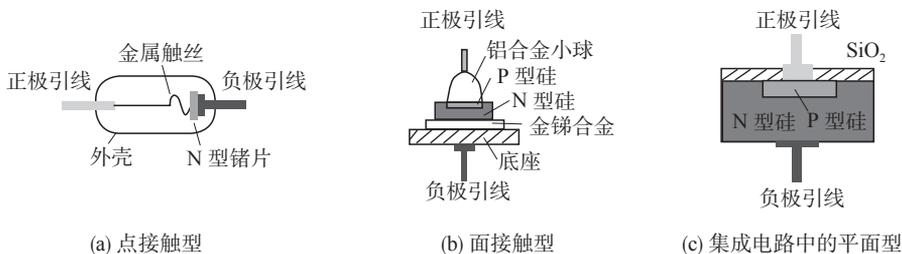
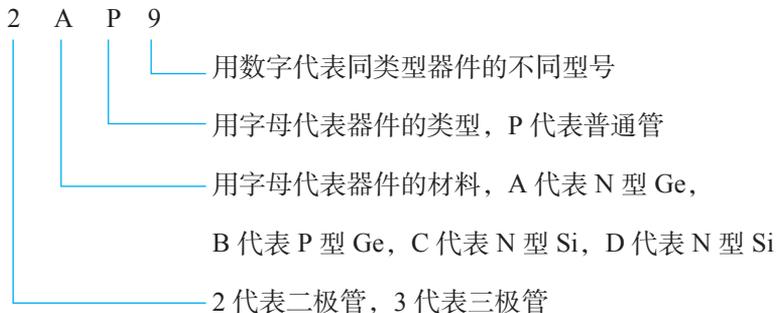


图 1-14 二极管的结构

#### (二) 二极管的表示方法

国家标准对半导体器件型号的命名举例如下：



#### 二、二极管的伏安特性

半导体二极管的伏安特性曲线如图 1-15 所示。处于第一象限的是正向伏安特性曲线，处于第三象限的是反向伏安特性曲线。根据理论推导，二极管的伏安特性曲线可用式 (1-3) 表示

$$I = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1-3)$$

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08

式中,  $I_S$  为反向饱和电流,  $U$  为二极管两端的电压降,  $U_T = kT/q$  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 (相当于  $T=300\text{ K}$ ), 则有  $U_T=26\text{ mV}$ 。

### 1. 正向特性

当  $U > 0$ , 即处于正向特性区域。正向区又分为两段:

当  $0 < U < U_{th}$  时, 正向电流为零,  $U_{th}$  称为死区电压或开启电压。

当  $U > U_{th}$  时, 开始出现正向电流, 并按指数规律增长。

硅二极管的死区电压  $U_{th}=0.5\text{ V}$  左右,

锗二极管的死区电压  $U_{th}=0.1\text{ V}$  左右。

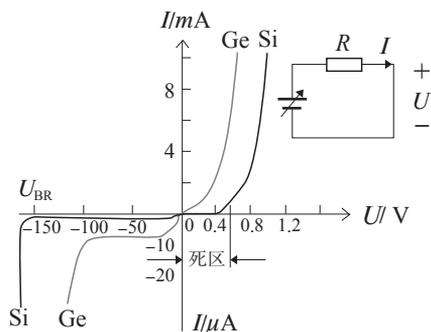


图 1-15 二极管的伏安特性曲线

### 2. 反向特性

当  $U < 0$  时, 即处于反向特性区域。反向区也分两个区域:

当  $U_{BR} < U < 0$  时, 反向电流很小, 且基本不随反向电压的变化而变化, 此时的反向电流也称反向饱和电流  $I_S$ 。

当  $U \geq U_{BR}$  时, 反向电流急剧增加,  $U_{BR}$  称为反向击穿电压。

在反向区, 硅二极管和锗二极管的特性有所不同。硅二极管的反向击穿特性比较硬、比较陡, 反向饱和电流也很小; 锗二极管的反向击穿特性比较软, 过渡比较圆滑, 反向饱和电流较大。从击穿的机理上看, 对硅二极管而言, 若  $|U_{BR}| \geq 8\text{ V}$  时, 主要是雪崩击穿; 若  $U_{BR} \leq 5\text{ V}$ , 则主要是齐纳击穿; 当  $U_{BR}$  在  $5 \sim 8\text{ V}$  之间时两种击穿都有, 有可能获得零温度系数点。

## 三、温度对二极管特性的影响

温度对二极管的性能有较大的影响, 温度升高时, 反向电流将呈指数规律增加, 如硅二极管温度每增加  $8^\circ\text{C}$ , 反向电流将增加约一倍; 锗二极管温度每增加  $12^\circ\text{C}$ , 反向电流大约增加一倍。另外, 温度升高时, 二极管的正向压降将减小, 每增加  $1^\circ\text{C}$ , 正向压降  $U_F(U_d)$  大约减小  $2\text{ mV}$ , 即具有负的温度系数。这些可以从图 1-16 所示二极管的伏安

特性曲线上看出。

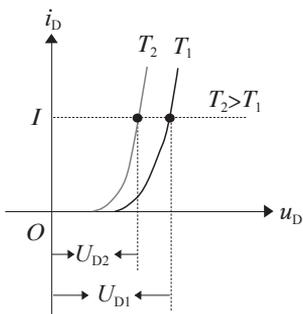


图 1-16 温度对二极管伏安特性曲线的影响

#### 四、二极管的主要参数

半导体二极管的参数包括最大整流电流  $I_F$ 、反向击穿电压  $U_{BR}$ 、最大反向工作电压  $U_{RM}$ 、反向电流  $I_R$ 、最高工作频率  $f_{max}$  和结电容  $C_j$  等。几个主要的参数介绍如下：

①最大整流电流  $I_F$ ——是指二极管长期连续工作时，允许通过的最大正向平均电流值，其值与 PN 结面积及外部散热条件等有关。因为电流通过管子时会使管芯发热，温度上升，温度超过容许限度（硅管为  $141^\circ\text{C}$  左右，锗管为  $90^\circ\text{C}$  左右）时，就会使管芯过热而损坏。所以在规定散热条件下，二极管使用中不要超过二极管最大整流电流值。例如，常用的 1N4001 ~ 4007 型锗二极管的额定正向工作电流为 1A。

②反向击穿电压  $U_{BR}$  和最大反向工作电压  $U_{RM}$ ——二极管反向电流急剧增加时对应的反向电压值称为反向击穿电压  $U_{BR}$ 。为安全计，在实际工作时，最大反向工作电压  $U_{RM}$  一般只按反向击穿电压  $U_{BR}$  的一半计算。

③反向电流  $I_R$ ——反向电流是指二极管在常温（ $25^\circ\text{C}$ ）和最高反向电压作用下，流过二极管的反向电流。反向电流越小，管子的单方向导电性能越好。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  $10^\circ\text{C}$ ，反向电流增大一倍。例如 2AP1 型锗二极管，在  $25^\circ\text{C}$  时反向电流若为  $250\ \mu\text{A}$ ，温度升高到  $35^\circ\text{C}$ ，反向电流将上升到  $500\ \mu\text{A}$ ，依此类推，在  $75^\circ\text{C}$  时，它的反向电流已达  $8\ \text{mA}$ ，不仅失去了单方向导电特性，还会使管子过热而损坏。又如，2CP10 型硅二极管， $25^\circ\text{C}$  时反向电流仅为  $5\ \mu\text{A}$ ，温度升高到  $75^\circ\text{C}$  时，反向电流也不过  $160\ \mu\text{A}$ 。硅二极管的反向电流一般在纳安 (nA) 级；锗二极管在微安 ( $\mu\text{A}$ ) 级，因此在高温下硅二极管比锗二极管具有更好的稳定性。

④正向压降  $U_F$ ——在规定的正向电流下，二极管的正向电压降。小电流硅二极管的正向压降在中等电流水平下，为  $0.6 \sim 0.8\ \text{V}$ ；锗二极管为  $0.2 \sim 0.3\ \text{V}$ 。

⑤动态电阻  $r_d$ ——反映了二极管正向特性曲线斜率的倒数。显然， $r_d$  与工作电流的大小有关，即  $r_d = U_F / I_F$ 。

⑥最高工作频率  $f_{max}$ ——是二极管工作的上限频率。因二极管与 PN 结一样，其结

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

电容由势垒电容组成。所以 $f_{\max}$ 的值主要取决于PN结电容的大小。若是超过此值，则单向导电性将受影响。

## 五、二极管的等效电路

二极管的伏安特性曲线是非线性的。为了分析计算方便，在特定的条件下，可以进行分段线性化处理，常用方式如下：

### 1. 将二极管理想化

如图1-17所示，虚线为二极管的实际伏安曲线，实线为二极管的理想特性曲线，由图可以看到，正向偏置时电压降为零，反向偏置时电流为零。

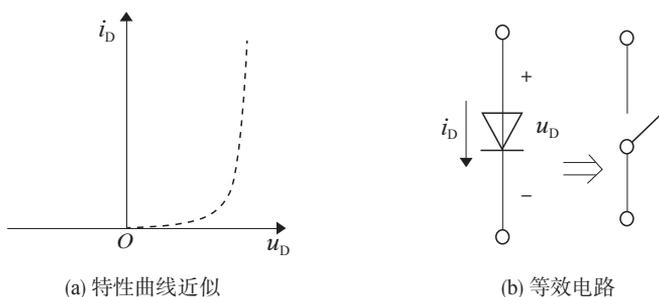


图 1-17 二极管的理想特性曲线和等效电路

虽然理想二极管和实际二极管的特性有一定的差别，但是在电路中如果二极管的正向压降远远小于和它串联的电路，那么利用理想二极管的特性近似表示实际二极管进行电路分析和计算能得出比较满意的结果。

### 2. 将二极管用理想二极管串联电压源来代替

为了反映二极管的导通电压，可以采用如图1-18所示的特性和等效电路来近似表示实际的二极管。只有当正向电压超过导通电压时二极管才导通，其两端电压为常量（通常硅管取0.7V，锗管取0.2V），否则二极管不通，电流为零。显然这种等效电路比前一种更接近实际二极管的特性。

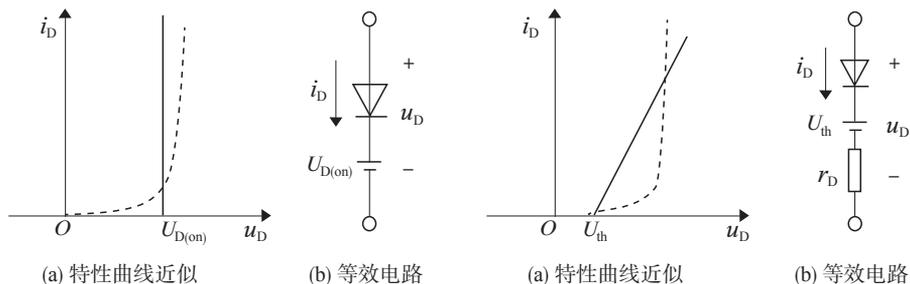


图 1-18 二极管的电压源模型和等效电路

图 1-19 二极管的折线模型和等效电路

(1) 折线等效电路。为了得到更好的近似效果，可以用折线来近似二极管的特性曲

线，如图 1-19 所示。由图可见，二极管两端的电压小于导通电压时，电路为零，超过导通电压后，特性曲线用一条斜线来近似。

(2) 微变等效电路。如果只考虑二极管两端的电压在某一固定值附近作微小变化时所引起的电流变化，或只考虑二极管两端的电流在某一固定值附近作微小变化时所引起的电压变化，可以用曲线在该固定值处的切线来近似表示着一小段曲线，如图 1-20 所示。在这种情况下二极管的等效电路是一个微变等效电阻  $r_D$ ，利用 PN 结方程求出：

$$\frac{1}{r_D} = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_D} \approx \frac{di_D}{du_D} = \frac{I_s}{U_T} e^{\frac{u_D}{U_T}} \approx \frac{I_D}{U_T} \quad (1-4)$$

即，  $r_D \approx \frac{U_T}{I_D}$

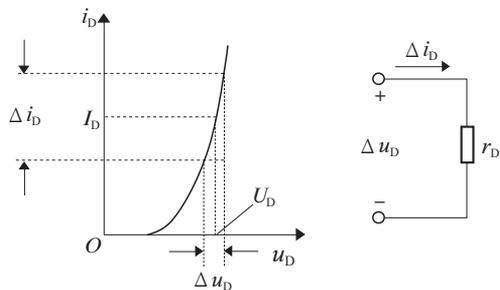


图 1-20 二极管的微变等效模型和等效电路

## 六、二极管的基本电路

### (一) 整流电路

利用二极管的单向导电特性，将交流变成单向（即直流）脉动电压的过程，称为整流。整流电路的作用是将交流降压电路输出的电压较低的交流电转换成单向脉动性直流电，这也就是交流电的整流过程。整流电路主要由整流二极管组成。经过整流电路之后的电压已经不是交流电压，而是一种含有直流电压和交流电压的混合电压，习惯上称之为单向脉动性直流电压，如图 1-21 所示。

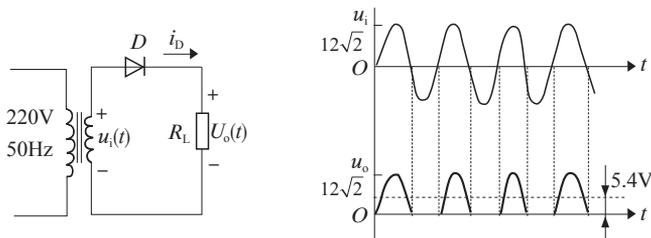


图 1-21 二极管的整流电路

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08

## (二) 限幅电路

能按限定的范围削平信号电压波幅的电路, 又称限幅器或削波器。限幅电路常用于:

①整形, 如削去输出波形顶部或底部的干扰;

②波形变换, 如将输出信号中的正脉冲削去, 只留下其中的负脉冲;

③过压保护, 如强的输出信号或干扰有可能损坏某个部件时, 可在这个部件前接入限幅电路。限幅电路按功能分为上限限幅电路、下限限幅电路和双向限幅电路三种。在上限限幅电路中, 当输入信号电压低于某一事先设计好的上限电压时, 输出电压将随输入电压而增减; 但当输入电压达到或超过上限电压时, 输出电压将保持为一个固定值, 不再随输入电压而变, 这样, 信号幅度即在输出端受到限制。同样, 下限限幅电路在输入电压低于某一下限电平时产生限幅作用。双向限幅电路则在输入电压过高或过低的两个方向上均产生限幅作用, 如图 1-22 所示。

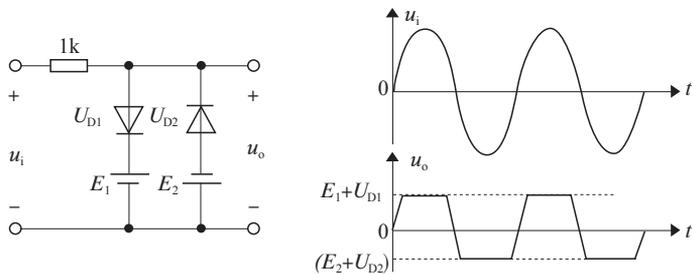


图 1-22 二极管的双向限幅电路

## (三) 钳位电路

二极管钳位保护电路是指由两个二极管反向并联组成的, 一次只能有一个二极管导通, 而另一个处于截止状态, 那么它的正反向压降就会被钳制在二极管正向导通压降 0.5 V 以下, 从而起到保护电路的目的。钳位电路的作用是将周期性变化的波形的顶部或底部保持在某一确定的直流电平上, 如图 1-23 所示。

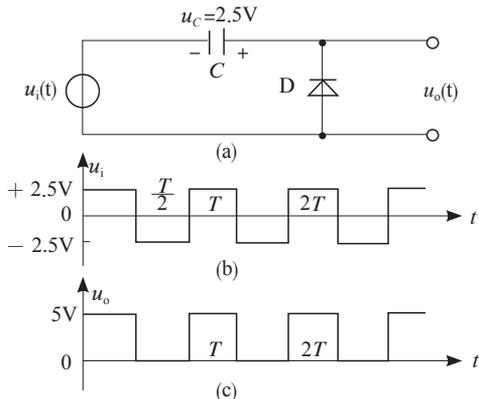


图 1-23 二极管钳位电路

## 知识拓展

### 检测小功率二极管

#### 1. 判别正、负电极

①观察外壳上的符号标记。通常在二极管的外壳上标有二极管的符号，带有三角形箭头的一端为正极，另一端是负极。

②观察外壳上的色点。在点接触二极管的外壳上，通常标有极性色点（白色或红色）。一般标有色点的一端即为正极。还有的二极管上标有色环，带色环的一端则为负极。

③以阻值较小的一次测量为准，黑表笔所接的一端为正极，红表笔所接的一端则为负极。

④观察二极管外壳，带有银色带一端为负极。

#### 2. 检测好坏

普通二极管的检测（包括检波二极管、整流二极管、阻尼二极管、开关二极管、续流二极管）是由一个PN结构成的半导体器件，具有单向导电特性。通过用万用表检测其正、反向电阻值，可以判别出二极管的电极，还可估测出二极管是否损坏。

①极性的判别。将万用表置于 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1k$ 挡，两表笔分别接二极管的两个电极，测出一个结果后，对调两表笔，再测出一个结果。两次测量的结果中，有一次测量出的阻值较大（为反向电阻），一次测量出的阻值较小（为正向电阻）。在阻值较小的一次测量中，黑表笔接的是二极管的正极，红表笔接的是二极管的负极。

②单向导电性能的检测及好坏的判断。通常，锗材料二极管的正向电阻值为 $1\text{ k}\Omega$ 左右，反向电阻值为 $300\text{ k}\Omega$ 左右。硅材料二极管的电阻值为 $5\text{ k}\Omega$ 左右，反向电阻值为 $\infty$ （无穷大）。正向电阻越小越好，反向电阻越大越好。正、反向电阻值相差越悬殊，说明二极管的单向导电特性越好。若测得二极管的正、反向电阻值均接近0或阻值较小，则说明该二极管内部已击穿短路或漏电损坏。若测得二极管的正、反向电阻值均为无穷大，则说明该二极管已开路损坏。

#### 3. 检测反向击穿电压

二极管反向击穿电压（耐压值）可以用晶体管直流参数测试表测量。其方法是：将测试表的“NPN/PNP”选择键设置为NPN状态，再将被测二极管的正极插入测试表的“C”插孔内，负极插入测试表的“e”插孔，然后按下“ $V_{(BR)}$ ”键，测试表即可指示出二极管的反向击穿电压值。

## 学习案例

### 三组9只LED旋转灯

LED的种类很多，在现实生活中也经常用到，例如大型活动装饰灯光、广告显

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

示屏等，这些应用一般都需要 LED 灯实现轮流循环发光。某次大型活动需要使用三种颜色的 LED，要求 3 只 LED 轮流地循环发光。具体要求为：工作电压：DC4.5 V，要求每组 LED 轮流发光，并有一定的时间间隔。我们来分析其原理。

### 案例分析

(1) 原理分析：电路如图 1-24 所示，由 3 只三极管和 9 只 LED 组成的循环灯。电路是这样工作的，当电源一接通，3 只三极管就要争先导通，但由于元器件有差异，只有某一只管子最先导通。假如  $Q_1$  最先导通，那么  $Q_1$  集电极电压下降，使电容  $C_1$  的左端接近零电压，由于电容器两端的电压不能突变，所以  $Q_2$  基极也被拉到近似零电压，使  $Q_2$  截止。 $Q_2$  集电极为高电压，那么接在它上面的发光二极管就亮了。此刻  $Q_2$  集电极上的高电压通过电容器  $C_2$  使  $Q_3$  基极电压升高，三极管  $Q_3$  也将迅速导通。因此在这一段时间内， $Q_1$  与  $Q_3$  的集电极均为低电压，只有接在  $Q_2$  集电极上的发光二极管亮，而其余两组发光二极管不亮。随着电源通过电阻  $R_3$  对  $C_1$  的充电，使三极管  $Q_2$  基极电压逐渐升高，当超过 0.6 伏时， $Q_2$  由截止状态变为导通状态，集电极电压下降，发光二极管熄灭。与此同时三极管  $Q_2$  集电极电压的下降通过电容器  $C_2$  的作用使三极管  $Q_3$  的基极电压也下跳， $Q_3$  由导通变为截止。接在  $Q_3$  集电极上的发光二极管就亮了。如此循环，电路中 3 只三极管便轮流导通和截止，三组发光二极管就不停地循环发光。

(2) 电路图，如图 1-24 所示。

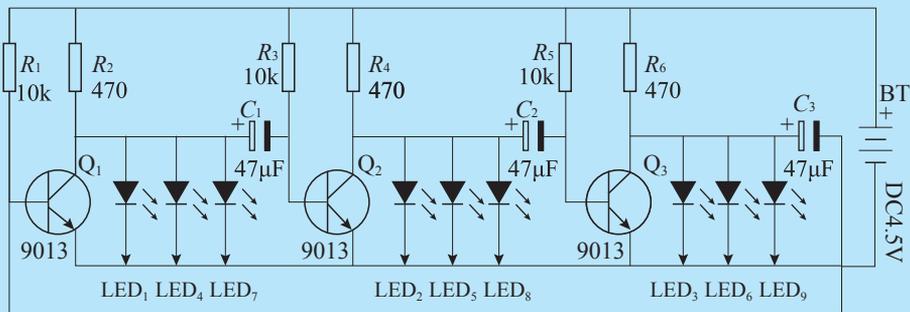


图 1-24 三组 9 只 LED 旋转灯电路图

## 单元三 特殊二极管

### 知识目标

了解二极管的种类，如光电二极管、发光二极管等；熟悉稳压二极管的伏安特性、图形符号及主要参数，稳压原理。

### 技能目标

通过本单元的学习，了解特殊二极管的使用；会使用万用表来判断二极管的好坏；熟练使用稳压二极管制作稳压电路。

### 基础知识

#### 一、稳压二极管的特性及应用

##### （一）稳压二极管的伏安特性

稳压二极管是应用在反向击穿区的特殊硅二极管。稳压二极管的伏安特性曲线与硅二极管的伏安特性曲线完全一样，稳压二极管伏安特性曲线的反向区、符号和典型应用电路如图 1-25 所示。

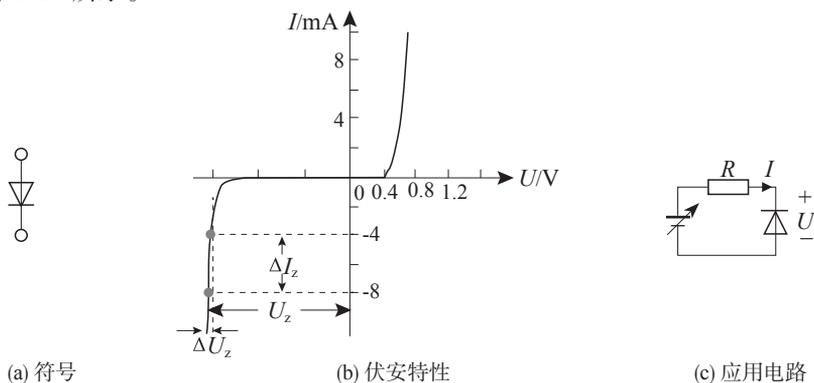


图 1-25 稳压二极管的伏安特性

稳压二极管的基本特性是：在击穿区，反向电流随电压的微小变化增加很快，而电压几乎保持不变。由于硅的热稳定性好，因此一般稳压管都是用硅二极管制成。

### 课堂讨论

怎么区分普通整流二极管和稳压二极管？

##### （二）稳压二极管的参数

- ① 稳定电压  $U_Z$ ——在规定的稳压管反向工作电流  $I_Z$  下，所对应的反向工作电压。
- ② 动态电阻  $r_Z$ ——其概念与一般二极管的动态电阻相同，只不过稳压二极管的动态

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

电阻是从它的反向特性上求取的。 $R_Z$  愈小, 反映稳压管的击穿特性愈陡。

$$r_Z = U_Z / I_Z$$

③最大耗散功率  $P_{ZM}$  —— 稳压管的最大功率损耗取决于 PN 结的面积和散热等条件。反向工作时, PN 结的功率损耗为  $P_Z = U_Z I_Z$ , 由  $P_{ZM}$  和  $U_Z$  可以决定  $I_{Zmax}$ 。

④最大稳定工作电流  $I_{Zmax}$  和最小稳定工作电流  $I_{Zmin}$  —— 稳压管的最大稳定工作电流取决于最大耗散功率, 即  $P_{Zmax} = U_Z I_{Zmax}$ 。而  $I_{Zmin}$  对应  $U_{Zmin}$ 。若  $I_Z < I_{Zmin}$ , 则不能稳压。

⑤稳定电压温度系数  $\alpha_{U_Z}$  —— 温度的变化将使  $U_Z$  改变, 在稳压管中, 当  $|U_Z| > 7V$  时,  $U_Z$  具有正温度系数, 反向击穿是雪崩击穿。

当  $|U_Z| < 4V$  时,  $U_Z$  具有负温度系数, 反向击穿是齐纳击穿。

当  $4V < |U_Z| < 7V$  时, 稳压管可以获得接近零的温度系数。这样的稳压二极管可以作为标准稳压管使用。

稳压二极管在工作时应反接, 并串入一只电阻。

电阻的作用一是起限流作用, 以保护稳压管; 二是当输入电压或负载电流变化时, 通过该电阻上电压降的变化, 去除误差信号以调节稳压管的工作电流, 从而起到稳压作用。

### 知识链接

从外形上看, 金属封装稳压二极管管体的正极一端为平面形, 负极一端为半圆面形。塑封稳压二极管管体上印有彩色标记的一端为负极, 另一端为正极。对标志不清楚的稳压二极管, 也可以用万用表判别其极性, 测量的方法与普通二极管相同, 即用万用表  $R \times 1k$  档, 将两表笔分别接稳压二极管的两个电极, 测出一个结果后, 再对调两表笔进行测量。在两次测量结果中, 阻值较小那一次, 红表笔接的是稳压二极管的正极, 黑表笔接的是稳压二极管的负极。

【例 1.1】硅稳压管电路如图 1-26 所示。其中待稳定的直流电压  $U_1 = 18V$ ,  $R = 1k\Omega$ ,  $R_L = 2k\Omega$ , 硅稳压管  $VD_Z$  的稳定电压  $U_Z = 10V$ , 动态电阻及未被击穿时的反向电流均可忽略。

(1) 试求  $U_O$ 、 $I_O$ 、 $I_R$  和  $I_Z$  的值。

(2) 试求  $R_L$  值降低到多大时, 电路的输出电压将不再稳定。

解: (1)  $U_1 \times \frac{R_L}{R + R_L} = 18 \times \frac{2}{1+2} = 12(V) > U_Z$

$$U_O = U_Z = 10V \quad I_O = \frac{U_O}{R_L} = \frac{10}{2} = 5(mA)$$

$$I_R = \frac{U_1 - U_O}{R} = \frac{18 - 10}{1} = 8(mA)$$

$$I_Z = I_R - I_O = 8 - 5 = 3(mA)$$

$$U_1 \times \frac{R_L}{R + R_L} < U_Z$$

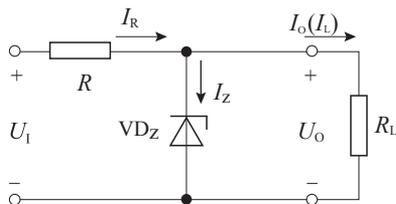


图 1-26 硅稳压管电路

$$\text{即 } 18 \times \frac{R_L}{1 + R_L} < 10$$

$$\text{故 } R_L < 1.25(\text{k}\Omega)$$

## 知识链接

### 电视机里的过压保护电路

EC 是电视机主供电电压, 当 EC 电压过高时, D 导通, 三极管 BG 导通, 其集电极电位将由原来的高电平 (5V) 变为低电平, 通过待机控制线的控制使电视机进入待机保护状态, 如图 1-27 所示。

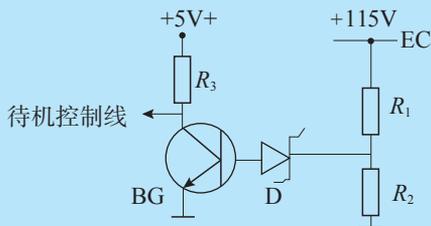


图 1-27 电视机里的过压保护电路

## 二、发光二极管

它是半导体二极管的一种, 可以把电能转化成光能, 常简称为 LED。发光二极管与普通二极管一样, 由一个 PN 结组成, 也具有单向导电性。当给发光二极管加上正向电压后, 从 P 区注入到 N 区的空穴和由 N 区注入到 P 区的电子, 在 PN 结附近数微米内分别与 N 区的电子和 P 区的空穴复合, 产生自发辐射的荧光。不同的半导体材料中电子和空穴所处的能量状态不同, 电子和空穴复合时释放出的能量不同。释放出的能量越多, 则发出的光的波长越短。常用的是发红光、绿光或黄光的二极管, 如图 1-28 所示。



图 1-28 发光二极管

发光二极管的反向击穿电压约 5 V。它的正向伏安特性曲线很陡, 使用时必须串联限流电阻以控制通过管子的电流。限流电阻  $R$  可用式 (1-5) 计算:

$$R = (E - U_F) / I_F \quad (1-5)$$

式中,  $E$  为电源电压,  $U_F$  为 LED 的正向压降,  $I_F$  为 LED 的一般工作电流。发光二极管的两根引线中较长的一根为正极, 应按电源正极。有的发光二极管的两根引线一样长, 但管壳上有一凸起的小舌, 靠近小舌的引线是正极。

与小白炽灯泡和氖灯相比, 发光二极管的特点是: 工作电压很低 (有的仅一点几伏); 工作电流很小 (有的仅零点几毫安即可发光); 抗冲击和抗震性能好, 可靠性高, 寿命长; 通过调节通过的电流强弱可以方便地调节发光的强弱。由于有这些特点, 其在一些光电控制设备中被用作光源, 在许多电子设备中被用作信号显示器。把它的管芯做成条状, 用 7 条条状的发光管组成 7 段式半导体数码管, 每个数码管可显示 0 ~ 9 十个数字。

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

chapter 07

chapter 08



### 发光二极管 (LED) 的分类

LED 产品分类很多, 我们简单地来看看分类方法。LED 根据发光管发光颜色、发光管出光面特征、发光管结构、发光强度和工作电流、芯片材料、功能等标准有不同的分类方法。下面简单介绍前六种分类方法。

#### 1. 根据发光管发光颜色分类

根据发光管发光颜色的不同, 可分成红光、橙光、绿光 (又细分黄绿、标准绿和纯绿)、蓝光等。另外, 有的发光二极管中包含 2 种或 3 种颜色的芯片。根据发光二极管出光处掺或不掺散射剂、有色还是无色, 上述各种颜色的发光二极管还可分成有色透明、无色透明、有色散射和无色散射四种类型。

#### 2. 根据发光管出光面特征分类

根据发光管出光面特征的不同, 可分为圆灯、方灯、矩形、面发光管、侧向管、表面安装用微型管等。

圆形灯按直径分为  $\phi 2$  mm、 $\phi 4.4$  mm、 $\phi 5$  mm、 $\phi 8$  mm、 $\phi 10$  mm 及  $\phi 20$  mm 等。国外通常把  $\phi 3$  mm 的发光二极管记作 T-1; 把  $\phi 5$  mm 的记作 T-1 (3/4); 把  $\phi 4.4$  mm 的记作 T-1 (1/4)。

由半值角大小可以估计圆形发光强度角分布情况。从发光强度角分布图来分有三类

①高指向性。一般为尖头环氧封装, 或是带金属反射腔封装, 且不加散射剂。半值角为  $5^\circ \sim 20^\circ$  或更小, 具有很高的指向性, 可作局部照明光源用, 或与光检出器联用以组成自动检测系统。

②标准型。通常作指示灯用, 其半值角为  $20^\circ \sim 45^\circ$ 。

③散射型。这是视角较大的指示灯, 半值角为  $45^\circ \sim 90^\circ$  或更大, 散射剂的量较大。

#### 3. 根据发光二极管的结构分类

根据发光二极管的结构, 可分为全环氧包封、金属底座环氧封装、陶瓷底座环氧封装及玻璃封装等。

#### 4. 根据发光强度和工作电流分类

根据发光强度和工作电流, 可分为普通亮度 LED (发光强度  $< 10$  mcd)、高亮度 LED ( $10 \sim 100$  mcd) 和超高亮度 LED (发光强度  $> 100$  mcd)。一般 LED 的工作电流在十几毫安至几十毫安, 而低电流 LED 的工作电流在 2 mA 以下 (亮度与普通发光管相同)。

5. 按功率分有: 小功率 LED ( $0.04 \sim 0.08$  W), 中功率 LED ( $0.1 \sim 0.5$  W), 大功率 LED ( $1 \sim 500$  W), 随着技术的不断发展, LED 的功率越做越大。

6. 按封装形式分: 有 SMD (贴片) 和 DIP (直插) 两种。



### 串联型稳压电路

交流电经过整流可以变成直流电, 但是它的电压是不稳定的: 供电电压的变化或用电电流的变化, 都能引起电源电压的波动。因此要获得稳定不变的直流电源, 还

必须再增加稳压电路。

稳压管是利用反向击穿区的稳压特性进行工作的，因此，稳压管在电路中要反向连接。稳压管的反向击穿电压称为稳定电压，不同类型稳压管的稳定电压也不一样，某一型号的稳压管的稳压值固定在一定范围。稳压管的动态电阻是随工作电流变化的，工作电流越大，动态电阻越小。因此，为使稳压效果好，工作电流要选得合适。工作电流选得大些，可以减小动态电阻，但不能超过管子的最大允许电流（或最大耗散功率）。各种型号管子的工作电流和最大允许电流，可以从手册中查到。稳压管的稳定性能受温度影响，当温度变化时，它的稳定电压也要发生变化，常用稳定电压的温度系数来表示这种性能，例如 2CW19 型稳压管的稳定电压  $U_w = 12\text{ V}$ ，温度系数为  $0.095\%/^{\circ}\text{C}$ ，说明温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，其稳定电压升高  $11.4\text{ mV}$ 。为提高电路的稳定性能，往往采用适当的温度补偿措施。

### 案例分折

(1) 原理分析：电路如图 1-29 所示，三极管 BG 在电路中是调整元件，它很有“见机行事”的本领，每当由于供电或用电发生变化，电路输出电压波动欲起时，它都能及时地加以调节，使输出电压保持基本稳定，因此它被称作调整管。因为在电路中作为调整元件的三极管是与负载相串联的，所以这种电路叫串联型稳压电路。稳压管 DW 为调整管提供基准电压，使调整管基极电位不变。 $R_1$  是 DW 的保护电阻，限制通过 DW 的电流，起保护稳压管的作用。 $R_L$  是负载电阻，是 BG 的直流通路。

BG 和 DW 配合“默契”，保证电路输出稳定的电压。电路稳压过程是这样的：如果输入电压  $U_{sr}$  增大，使输出电压  $U_{sc}$  增大时，由于  $U_b = U_w$  固定不变，调整管基极和发射极间电压  $U_{be} = U_b - U_{sc}$  将减小，基流  $I_b$  随之减小，而管压降  $U_{ce}$ ，随之增大，从而抵消了  $U_{sc}$  增大的部分，使  $U_{sc}$  基本稳定。如果负载电流  $I_{sc}$  增大，使输出电压  $U_{sc}$  减小，由于  $U_b$  固定， $U_{be}$  将增大， $U_{ce}$  减小，也同样地使  $U_{sc}$  基本稳定。

(2) 电路图，如图 1-29 所示。

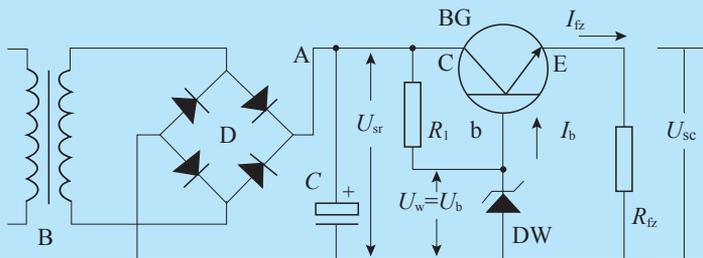


图 1-29 串联型稳压电路图

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

chapter 07

chapter 08

## 拓展实训一 模拟电子实验常用仪器仪表使用与测量

### 实训目的

- (1) 学习电子电路实验中常用的电子仪器：示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表等的主要技术指标性能及正确使用方法。
- (2) 初步掌握用双踪示波器观察正弦信号波形和读取波形参数的方法。

### 实验仪器

①函数信号发生器；②双踪示波器；③交流毫伏表；④多功能计数器；⑤数字万用表

在模拟电子实验中常用的电子仪器设备有函数信号发生器、示波器、直流电源、晶体管交流毫伏表、频率计（多功能计数器）、数字万用表、模拟电子技术实验箱。

各种仪器之间的关系如图 1-30 所示。

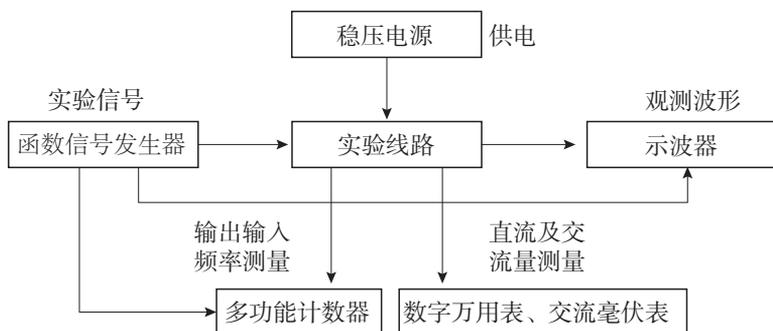


图 1-30 常用电子仪器使用示意图

### 各种仪器用途及使用方法

要想准确地测量数据，观察实验现象，就必须熟练的掌握这些电子仪器的使用方法。只有熟练地掌握这些电子仪器的使用方法，才能更好地学习、验证和应用模拟电子技术基础理论。

#### 1. 各种仪器用途

直流稳压电源：直流供电。

函数信号发生器：给出频率、电压可调的实验信号（波形可变换）。

示波器：用来观察波形，测量信号的频率、周期、电压。

晶体管毫伏表：交流电压的测量。

数字万用表：交直流电压及电流的测量、电阻值电容量的测量、晶体管  $h_{FE}$  测试、二极管测试。

多功能计数器：用来测量信号的频率、周期，也可进行计数。

#### 2. 各种仪器的使用方法

(1) 函数信号发生器。按需要可输出正弦波、方波、三角波三种信号波形。输出信

号电压幅度可由输出幅度调节旋钮进行连续调节。输出信号电压频率可以通过频率分挡开关进行调节，并由频率计读取频率值。函数信号发生器作信号源，它的输出端不允许短路。

(2) 双踪示波器。①使用前的准备。所有的控制键设定后，打开电源。当亮度旋钮顺时针方向旋转时，轨迹大约 15 s 后出现，如仍找不到光点，可调节亮度旋钮，并按下“寻迹”板键，从中判断光点位置，然后适当调节垂直(↑↓)和水平(↔)移位旋钮，将光点移至荧光屏的中心位置。

②使用前的校正。先将示波器面板上各键置于如下位置：“显示方式”位于“X-Y”；“极性”选择位于“+”；“AC-GDN-DC”开关位于“AC”；“微调开关”于“0.5 V/div”挡。然后用同轴电缆将校准信号输出端与 CH1 的输入端相连接，示波器屏幕上应显示幅度为 0.5 V<sub>p-p</sub>、周期为 1 ms 的方波。调节“微调 V/div”“微调”使方波幅值为 1 格(Y 轴)，调节“微调 Time/div”“微调”使方波周期为 1 格(X 轴)，调节“辉度”“聚焦”和“辅助聚焦”各旋钮使屏幕上观察到的波形细而清晰，调节亮度旋钮于适中位置。

③信号的测量。测量直流电压、交流电压、频率和时间、相位差。

(3) 晶体管毫伏表。晶体管毫伏表只能在其工作频率范围内，用来测量正弦交流电压的有效值。为了防止过载而损坏，测量前一般先把量程开关置于量程较大位置处，然后在测量中慢慢减小量程。

接通电源后，将输入端短接，进行调零。然后断开短路线进行测量。

### 实验内容

将所有仪器电源打开预热。

(1) 毫伏表：正确选择量程开关（打至最大量程）通电预热。

(2) 示波器：将工作方式选择旋钮置于正确位置，首先打开电源开关，适当调节“亮度”及“位移”旋钮等，使荧光屏上出现扫描线，然后调节“聚焦”旋钮，使扫描线清晰，调节“触发电平”旋钮使波形稳定。

(3) 频率计：打开电源开关，选择“A 频率”。

(4) 综合练习题：用函数信号发生器输出正弦波，用频率计测量其频率，用毫伏表测量其电压（有效值），用示波器观察波形（也可读出电压值大小峰-峰值）。

①选取频率为 50 Hz，电压为 5 mV 的正弦信号，适当选择仪器旋钮的位置，在示波器上观察 2 个完整的波形，将各旋钮位置记录于表 1 中。

②选取频率为 100 Hz，电压为 50 mV 的正弦信号，适当选择仪器旋钮的位置，在示波器上观察 5 个完整的波形，将各旋钮位置记录于表 1 中。

③选取频率为 1 000 Hz，电压为 500 mV 的正弦信号，适当选择仪器旋钮的位置，在示波器上观察 10 个完整的波形，将各旋钮位置记录于表 1 中。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

④选取频率为 300 kHz，电压为 5 V 的正弦信号，适当选择仪器旋钮的位置，在示波器上观察 5 个完整的波形，将各旋钮位置记录于表 1 中。

表 1 旋钮位置记录表

		50 Hz/5mV	100 Hz/50mV	1 kHz/500mV	300 kHz/5V
信号源	频段选择				
	衰减				
毫伏表	量程				
	读数				
示波器	V/DIV 选择 / 格				
	T/DIV 选择 / 格				
频率计	$f$ 测量读数				
	衰减				
	低通				

### 实训报告及总结

实训结果：

- (1) 根据实训记录，列表整理、计算实训数据，描绘观察到的波形图。
- (2) 通过本实训总结如何正确使用示波器。

学生自评：

---



---



---

教师点评：

---



---



---

### 思考题

(1) YB4320 采用“高频”“常态”“自动”三种触发方式有什么区别？试通过实验对它们的操作特点及适用场合加以总结。

(2) 测一个 1 kHz、1 V 的信号，应选用何种仪表测量？

## 学习检测一



### 一、填空题

1. 在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要取决于掺入的\_\_\_\_，而少数载流子的浓度则与\_\_\_\_有很大关系。
2. 当PN结外加正向电压时，扩散电流\_\_\_\_漂移电流，耗尽层\_\_\_\_。当外加反向电压时，扩散电流\_\_\_\_漂移电流，耗尽层\_\_\_\_。
3. 在N型半导体中，\_\_\_\_为多数载流子，\_\_\_\_为少数载流子。
4. 当半导体二极管正偏时，势垒区\_\_\_\_，扩散电流\_\_\_\_漂移电流。
5. 在常温下，硅二极管的门限电压约\_\_\_\_V，导通后在较大电流下的正向压降约\_\_\_\_V；锗二极管的门限电压约\_\_\_\_V，导通后在较大电流下的正向压降约\_\_\_\_V。
6. 在常温下，发光二极管的正向导通电压约\_\_\_\_，\_\_\_\_硅二极管的门限电压；考虑发光二极管的发光亮度和寿命，其工作电流一般控制在\_\_\_\_mA。
7. 利用硅PN结在某种掺杂条件下反向击穿特性陡直的特点而制成的二极管，称为\_\_\_\_二极管。请写出这种管子四种主要参数，分别是\_\_\_\_、\_\_\_\_、\_\_\_\_和\_\_\_\_。



### 二、判断题

1. 由于P型半导体中含有大量空穴载流子，N型半导体中含有大量电子载流子，所以P型半导体带正电，N型半导体带负电。 ( )
2. 在N型半导体中，掺入高浓度三价元素杂质，可以改为P型半导体。 ( )
3. 扩散电流是由半导体的杂质浓度引起的，即杂质浓度大，扩散电流大；杂质浓度小，扩散电流小。 ( )
4. 本征激发过程中，当激发与复合处于动态平衡时，两种作用相互抵消，激发与复合停止。 ( )
5. PN结在无光照无外加电压时，结电流为零。 ( )
6. 温度升高时，PN结的反向饱和电流将减小。 ( )
7. PN结加正向电压时，空间电荷区将变宽。 ( )



### 三、选择题

1. 二极管加正向电压时，其正向电流是由 ( )。
  - A. 多数载流子扩散形成
  - B. 多数载流子漂移形成
  - C. 少数载流子漂移形成
  - D. 少数载流子扩散形成
2. PN结反向偏置电压的数值增大，但小于击穿电压， ( )。
  - A. 其反向电流增大
  - B. 其反向电流减小
  - C. 其反向电流基本不变
  - D. 其正向电流增大

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

3. 稳压二极管是利用 PN 结的 ( )。

- A. 单向导电性                      B. 反偏截止特性  
C. 电容特性                          D. 反向击穿特性

4. 二极管的反向饱和电流在 20℃ 时是 5 μA，温度每升高 10℃，其反向饱和电流增大一倍，当温度为 40℃ 时，反向饱和电流值为 ( )。

- A. 10 μA                      B. 15 μA                      C. 20 μA                      D. 40 μA

5. 变容二极管在电路中使用时，其 PN 结是 ( )。

- A. 正向运用                          B. 反向运用



#### 四、简答题

- PN 结的伏安特性有何特点？
- 什么是 PN 结的反向击穿？PN 结的反向击穿有哪几种类型？各有何特点？
- PN 结电容是怎样形成的？和普通电容相比有什么区别？
- 温度对二极管的正向特性影响小，对其反向特性影响大，这是为什么？
- 能否将 1.5 V 的干电池以正向接法接到二极管两端？为什么？
- 有 A、B 两个二极管。它们的反向饱和电流分别为 5 mA 和 0.01 mA，在外加相同的正向电压时的电流分别为 20 mA 和 8 mA，你认为哪一个管的性能较好？
- 利用硅二极管较陡峭的正向特性，能否实现稳压？若能，则二极管应如何偏置？
- 什么是齐纳击穿？击穿后是否意味着 PN 结损坏？



#### 五、计算题

- 试用电流方程式计算室温下正向电压为 0.26 V 和反向电压为 1 V 时的二极管电流（设  $I_s=100 \mu\text{A}$ ）。
- 写出题图 T1 所示各电路的输出电压值，设二极管均为理想二极管。

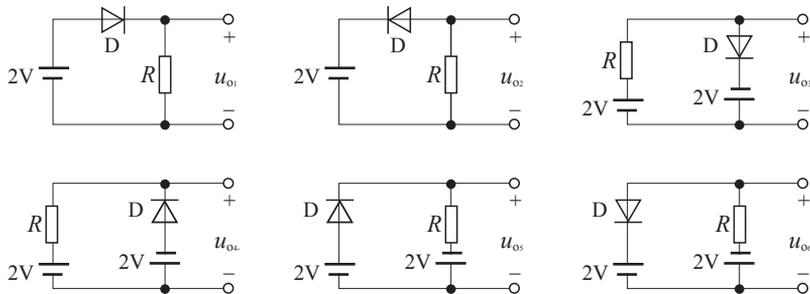


图 T1

- 已知稳压管的稳压值  $U_Z=6 \text{ V}$ ，稳定电流的最小值  $I_{Z\text{min}}=5 \text{ mA}$ 。求图 T2 所示电路中  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  的值。

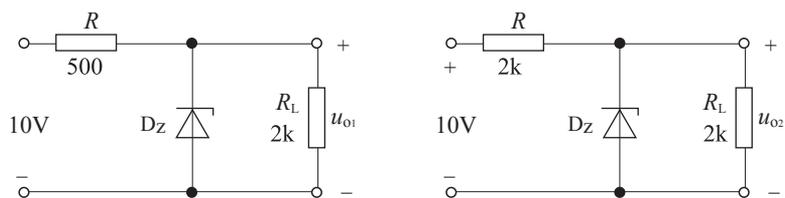


图 T2

4. 电路如图 T3a、b 所示，稳压管的稳定电压  $U_Z=3\text{ V}$ ， $R$  的取值合适， $u_i$  的波形如图 T3c 所示。试分别画出  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  的波形。

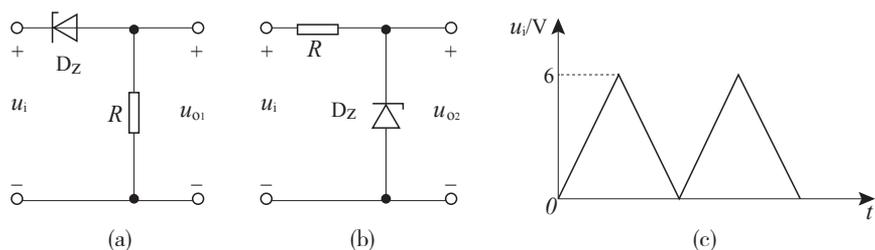


图 T3

5. 在图 T4 所示电路中，发光二极管导通电压  $U_D=1.5\text{ V}$ ，正向电流在  $5\sim 15\text{ mA}$  时才能正常工作。试求电阻  $R$  的选值范围。

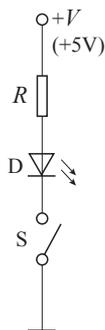


图 T4

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08