

学习情境一 半导体二极管及其应用

单元一 半导体的基础知识	2
单元二 二极管	13
单元三 特殊二极管	22
拓展实训 模拟电子实验中常用仪器仪表的使用	27
学习检测	31

学习情境二 晶体管 and 场效应管

单元一 晶体管	34
单元二 场效应管	46
拓展实训 半导体管的测试实验	52
学习检测	57

学习情境三 放大电路基础

单元一 共发射极放大电路	60
单元二 共集电极和共基极放大电路	72
单元三 场效应管放大电路	85
拓展实训 单管放大电路实验	89
学习检测	96

学习情境四 差动放大电路与集成运算放大器

单元一 差动放大电路	100
单元二 集成运算放大器	113
拓展实训 差动放大电路实验	123



学习检测..... 128

学习情境五 反馈放大电路

单元一 反馈放大电路的类型和判定方法..... 134
单元二 深度负反馈放大电路的估算..... 147
拓展实训 负反馈放大电路实验..... 150
学习检测..... 155

学习情境六 功率放大电路

单元一 认识功率放大电路..... 158
单元二 掌握几种基本的功率放大电路..... 161
拓展实训 OTL 功率放大电路实验 171
学习检测..... 175

学习情境七 信号产生电路

单元一 正弦波振荡信号产生电路..... 180
单元二 非正弦波发生电路..... 187
拓展实训 比较器..... 194
学习检测..... 198

学习情境八 直流稳压电路

单元一 小功率单相整流滤波电路..... 202
单元二 直流稳压电源..... 208
拓展实训 集成稳压器..... 217
学习检测..... 223

参考文献





学习情境一 半导体二极管及其应用

目 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二极管的使用为切入点，要求学生掌握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。市场上台灯种类很多，其中LED台灯偏贵，这是因为LED台灯有节能、护眼功能，而且无频闪。LED台灯性能优越，它是如何制作的？制作某种LED台灯的元器件清单为：灯壳、灯罩、灯板（或者万能板）、导线若干、电阻（ $100\text{ k}\Omega$ 一个、 $470\ \Omega$ 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（ $100\text{ k}\Omega$ ）降压，电阻（ $100\text{ k}\Omega$ ）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，它和电阻（ $470\ \Omega$ ）组成滤波电路，推动 12 个发光二极管发光；全灯实测功耗约为 1 W。

▶ 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. 了解二极管整流电路等常用电路。
3. 学习二极管极性的判断方法，掌握万用表的使用方法。
4. 了解特殊二极管，如发光二极管、整流二极管、稳压二极管等。

育人目标

了解先辈们为我国电子技术做出的贡献，激发学生的奋斗精神和家国情怀。



单元一 半导体的基础知识

知识目标

1. 了解半导体的导电特性。
2. 了解杂质半导体的特点。
3. 掌握 PN 结的导电特性及击穿特性。

技能目标

通过本单元的学习，能合理使用热敏电阻并能制作热敏电阻电路。

基础知识

一、半导体的导电特性

二极管、晶体管、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。人们通常把导电性差的材料称为绝缘体，如金刚石、人工晶体、琥珀、陶瓷等；把导电性比较好的材料称为导体，如金、银、铜、铁、锡、铝等。根据物体导电能力的不同，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，半导体的发现是最晚的，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。典型的半导体有硅(Si)、锗(Ge)及砷化镓(GaAs)等。

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。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。

金属导体的原子中外层电子受原子核的束缚力很小，在常温下有大量电子能够挣脱束缚而成为自由电子。这些自由电子称为载流子，它们在外电场的作用下做定向运动就形成了电流。由于金属的载流子很多，所以导电性很好。绝缘体的原子中外层电子受原子核的束缚力很大，在常温下不容易挣脱出来。由于绝缘体的载流子很少，所以导电性很差。半



导体的原子结构比较特殊，在常温下，其载流子数目比导体少很多，但比绝缘体多得多，所以半导体的导电性介于导体和绝缘体之间。为了定量描述导体、绝缘体、半导体，人们引入了电阻率这个物理量。通常将电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料称为导体；电阻率大于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料称为绝缘体；电阻率为 $10^{-4} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为半导体。

半导体材料之所以备受人们关注，并且得到广泛的应用，是由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，随温度升高而明显减小（负温度系数），而一般金属的电阻率随温度升高而增大。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。例如硫化铝薄膜电阻，无光照时，其电阻为几十兆欧姆，有光照时，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，其电阻率虽有增大但变化不大。而半导体不同，在纯净的半导体中掺入极微量的杂质，就能使其导电性大幅提高。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。

（二）本征半导体

本征半导体就是纯净（不含杂质）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。

典型的本征半导体有硅和锗。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、化学性质主要由这四个价电子决定。在实际问题中，为了突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。于是就可以得到原子的简化模型，如图 1-1 所示。

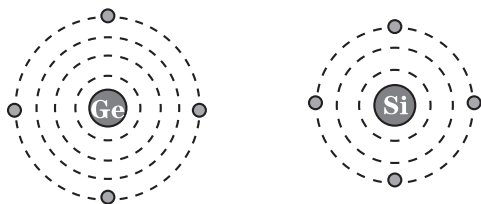


图 1-1 原子结构简化模型

以硅原子为例，硅原子的每个价电子分别与相邻硅原子的一个价电子组成一个价电子对，这个价电子对为相邻两个原子所共有。价电子对中的每一个价电子，既围绕原来的原子核运动，又围绕相邻的原子核转动，它们同时受到两个原子核的吸引作用。人们把这种对共有价电子所形成的束缚作用称为共价键，如图 1-2a 所示。共价键中的价电子为这些原子所共有，并为它们所束缚，形成排列有序的晶体，如图 1-2b 所示。

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，半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，价电子的能量增高，有的价电子可以挣脱原子核的束缚，成为自由电子。在外电场的作用下，自由电子做定向运动形成电流。这与金属导体是相同的。

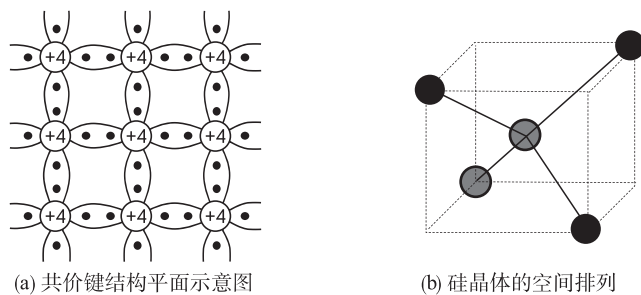


图 1-2 共价键结构平面示意图及硅原子的空间排列

自由电子产生的同时，在其原来的共价键中会出现一个空位，这个呈现正电性的空位称为空穴。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，自由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，称为自由电子-空穴对。游离的部分自由电子也可能回到空穴中，称为复合，如图 1-3 所示(图中电子用“·”表示，空穴用“○”表示)。本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。

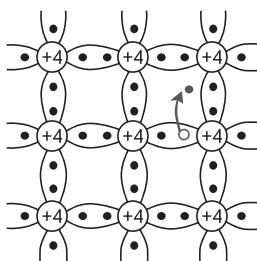


图 1-3 自由电子-空穴对的产生

自由电子的定向运动可形成电子电流，空穴的定向运动可形成空穴电流，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。

在本征半导体中，电流由两部分组成：电子电流和空穴电流。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，本征半导体的导电能力就越强。温度是影响半导体导电性的一个重要的外部因素，这是半导体的一大特点。



课堂讨论

自然界中有没有本征半导体？



二、杂质半导体

在常温下，本征半导体的导电能力很差，而且不好控制，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。按掺入杂质的不同(主要是三价或五价元素)，杂质半导体可分为



N 型半导体和 P 型半导体。

(一) N 型半导体

在本征半导体的硅晶体内掺入微量的五价元素，如磷，可形成 N 型半导体，也称电子型半导体。由于掺入的磷原子数量极微，并不会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。

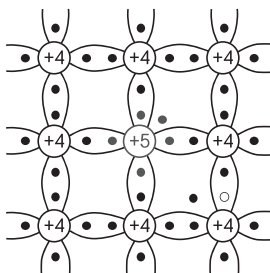


图 1-4 N 型半导体的结构示意图

磷原子有五个价电子，除了四个价电子与相邻的四个硅原子的价电子组成共价键外，多余的一个价电子不会组成共价键，只受磷原子核的微弱吸引。在常温下，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，失去价电子的磷原子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，自由电子的数量远大于空穴的数量。

课堂讨论

N 型半导体中多数载流子和少数载流子分别是什么？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)，可形成 P 型半导体，也称空穴型半导体。由于硼的价电子只有三个，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个空位，如图 1-5 所示。

由于结构不稳定，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，硼原子夺取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因失去一个束缚电子而出现一个新的空位(即空穴)。在常温下，几乎每一个硼原子均会夺取硅原子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。这种掺杂三价杂质元素的半导体中，空穴是多数载流子。

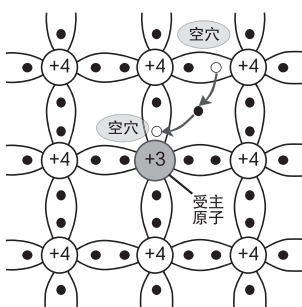


图 1-5 P 型半导体的结构示意图



知识链接

在 N 型半导体中，存在着本征激发的现象，有自由电子-空穴对产生，但比起掺杂产生的自由电子来说数量很少，传递电流的主要载流子是自由电子，故自由电子称为多数载流子，空穴相应地称为少数载流子。由于自由电子的增多，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，自由电子的浓度几乎由掺杂浓度决定。

P 型半导体中也存在着本征激发的现象，有自由电子-空穴对产生，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，自由电子相应地称为少数载流子，自由电子的浓度远小于同温度下本征半导体中自由电子的浓度。在 P 型半导体中，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。



课堂讨论

P 型半导体中多数载流子和少数载流子分别是什么？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，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. 扩散运动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 区内自由电子很多空穴很少，而 P 区内空穴很多自由电子很少，在它们的交界处会出现自由电子和空穴的浓度差别。这样自由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，有一些自由电子要从 N 区向 P 区扩散，也有一些空穴要从 P 区向 N 区扩散。它们扩散的结果就是 P 区一侧失去空穴，留下了带负电的杂质离子，N 区一侧失去自由电子，留下了带正电的杂质离子，如图 1-6 所示。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会在 P 区和 N 区交界面附近形成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，因此空间电荷区又称耗尽层，它的电阻率很高。扩散越强，空间电荷区越宽。

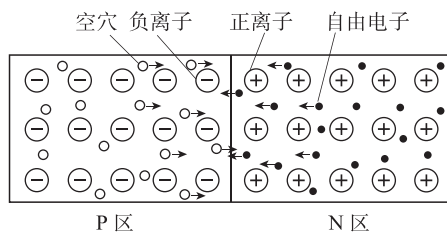


图 1-6 PN 结的扩散运动



PN 结的形成

2. 内建电场的形成和漂移运动

在出现空间电荷区以后，由于正、负电荷之间的相互作用，在空间电荷区会形成一个内电场，其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。这个内电场是由载流子（内部）的扩散运动形成的，故称为内建电场。显然，内建电场是阻止扩散运动的。

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（自由电子）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 区的自由电子补充了原来交界面上 N 区所失去的自由电子，这就使正、负电荷减少，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

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

为了便于理解才分上述三步来说明 PN 结的形成，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。

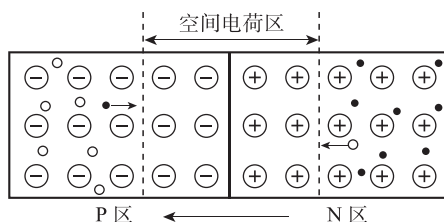


图 1-7 PN 结的稳定状态

(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。

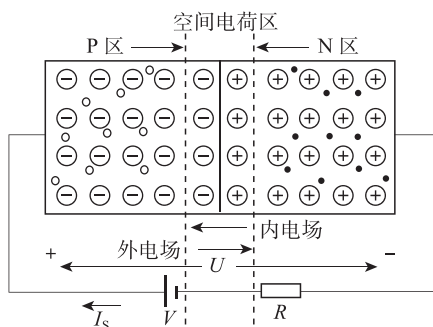


图 1-8 PN 结加正向电压时的导电情况



PN结正向偏置

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 结处于正偏。电流从 P 区流向 N 区，空穴和自由电子都向界面运动，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，内电场对多数载流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。

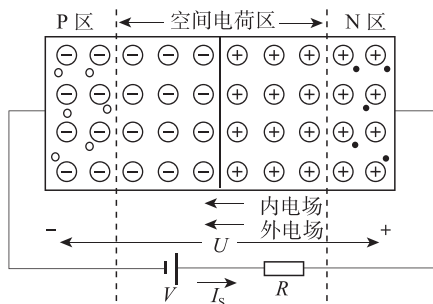


图 1-9 PN 结加反向电压时的导电情况



PN结反向偏置

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 结处于反偏。空穴和自由电子都向远离交界面的方向运动，使空间电荷区变宽，电流不能通过，方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场。内电场对多数载流子扩散运动的阻碍增强，扩散电流大大减小。此时，PN 结区的少数载流子在内电场作用下形成的漂移电流远大于扩散电流，可忽略扩散电流的影响，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数载流子浓度是一定的，故少数载流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阻性，具有较大的正向扩散电流；PN 结加反向电压时呈现高阻性，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。

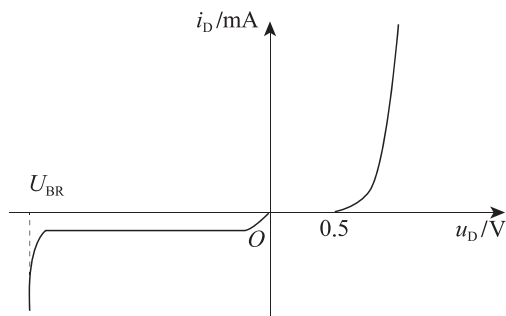


图 1-10 PN 结的伏安特性

伏安特性的表达式为

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

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 为温度电压当量； I_S 为反向饱和电流，对于分立器件，其典型值在 $10^{-14} \sim 10^{-8}$ A 的范围内，集成电路中二极管 PN 结的 I_S 值更小。

$$U_T = \frac{kT}{q} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.026 \text{ V} \quad (1-2)$$

式中， k 为波耳兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K)； T 为热力学温度 (常温相当于 300 K)； q 为电子电荷量 (1.6×10^{-19} C)。

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 $u_D > U_T$ ，当 u_D 比 U_T 大几倍时，PN 结的电流与电压成指数关系，如图 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， $i_D \approx -I_S \approx 0$ ，如图 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

势垒区是由空间电荷区的离子薄层形成的。当外加电压使 PN 结上的压降发生变化时,离子薄层的厚度也相应地随之改变,这相当于 PN 结中储存的电荷量也随之变化。势垒区类似平板电容器,其交界面两侧储存着数量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。利用该特性可制作变容二极管。

当 PN 结反偏时,结电阻很大, C_B 的作用不能忽视,特别是高频时,它对电路有较大的影响。

2. 扩散电容

PN 结正向导电时,多数载流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,正向电流随之加大,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 区的自由电子或 N 区的空穴也相应减少,这样当外加电压变化时,有载流子向 PN 结“充入”和“放出”。PN 结的扩散电容描述了积累在 P 区的自由电子或 N 区的空穴随外加电压的变化而变化的电容效应。

扩散电容是非线性电容,PN 结正偏时,扩散电容较大;PN 结反偏时,载流子数目很少,扩散电容很小,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,内电场增强。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为击穿电压(U_{BR})。基本的击穿机构有两种,即雪崩击穿和齐纳击穿(也称隧道击穿),前者的击穿电压小于 5 V,有负温度系数,后者的击穿电压大于 8 V,有正温度系数。

1. 雪崩击穿

阻挡层中载流子的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,再去碰撞其他的中性原子,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。

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,形成自由电子-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,可将硅 PN 结的雪崩击穿电压控制在 8~1 000 V,而齐纳击穿电压低于 5 V,在 5~8 V 范围内两种击穿可能同时发生。

知识拓展

杂质扩散工艺

杂质扩散工艺是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。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、二极管和晶体管等元器件，也用于元器件之间的隔离。

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硅平面工艺的基础上发展起来的，它在大规模和超大规模集成电路制造中已被采用，但杂质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 $1\ \mu\text{m}$ 或 $2\ \mu\text{m}$ 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。

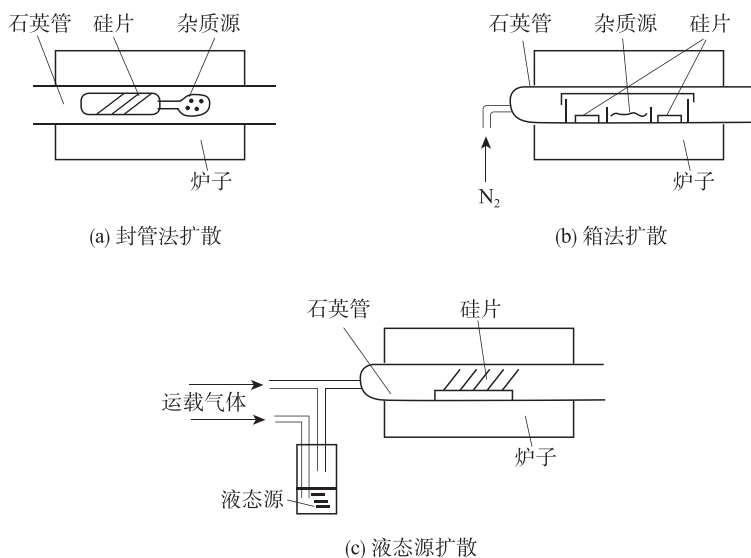


图 1-11 扩散装置示意图

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。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。



液态源扩散是采用气体携带杂质源的一种扩散方法，即将气体通过液态源，把杂质蒸气引入石英管内，在高温下分解并与硅表面发生反应产生杂质原子，然后向硅片内部扩散。

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取决于杂质源的情况，当杂质源足量时则取决于温度，因为杂质的固溶度决定杂质在半导体表面的浓度。半导体片内的扩散均匀性在很大程度上取决于表面的严格处理；而片与片间、批与批间的均一性，除要求恒温区稳定，气流形式合适和杂质源稳定外，还要求保持扩散环境洁净(包括炉管和洁净室等)。



学习案例

热敏电阻电路(电热水器温控电路)

热敏电阻器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，不同温度下表现出不同的电阻值。正温度系数热敏电阻器在温度越高时电阻值越大，负温度系数热敏电阻器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器为例，当热敏电阻电路正常工作时，热敏电阻器的温度与室温相近，此时电阻值很小，串联在电路中不会阻碍电流通过；而当电路因故障出现过大大电流时，热敏电阻器因发热功率增大致温度上升，若温度超过开关温度，电阻值瞬间剧增，回路中的电流迅速减小到安全值。

案例分析：图 1-12 所示电路是电热水器温控电路，主要由热敏电阻器、比较器(IC741)、驱动电路及加热电路等组成。调节 R_p 可得到要求的水温，当温度低于设定的数值时，比较器第 3 脚的电压升高，当电压比第 2 脚的电压高时，比较器输出端变为高电位，二极管导通，晶体管也导通，继电器 K 通电工作，加热电路启动，开始加热。当水温高于 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，比较器输出端变为低电位，两个二极管截止，晶体管也截止，继电器 K 不通电，断开加热电路，停止加热。

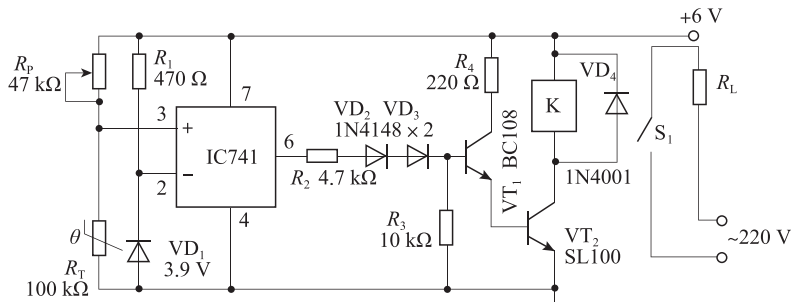


图 1-12 电热水器温控电路



单元二 二极管

知识目标

1. 了解二极管的结构及表示方法。
2. 熟悉二极管的伏安特性、主要参数、温度对特性的影响。
3. 掌握二极管的几种等效方法及基本电路。

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，能正确使用和合理选择二极管；掌握二极管的等效方法，并能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

半导体二极管简称二极管，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，如图 1-13 所示。二极管的图形符号如图 1-14 所示。



图 1-13 二极管的外形

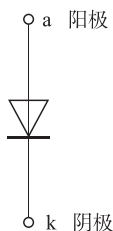


图 1-14 二极管的图形符号

(一) 二极管的结构

二极管种类很多，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)；按照用途的不同，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，可分为点接触型二极管、面接触型二极管及平面型二极管，如图 1-15 所示。

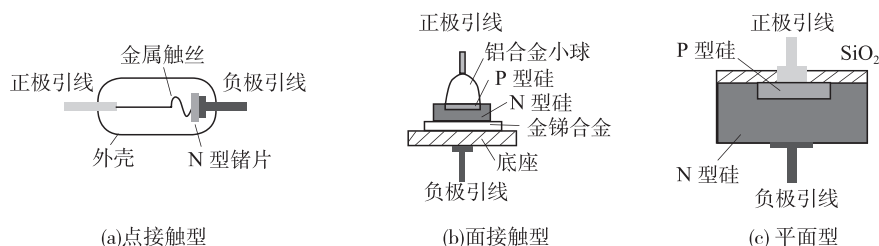


图 1-15 二极管的结构

(1)点接触型二极管。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，如收音机的检波电路等。

(2)面接触型二极管。面接触型二极管PN结的面积较大，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。

(3)平面型二极管。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。

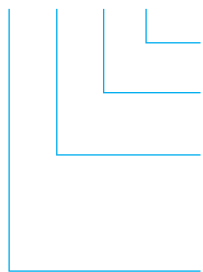
课堂讨论

在日常生活中，哪些地方用到了二极管？它们的作用是什么？

(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。

2 A P 9



- 用数字代表同类型器件的不同型号
- 用字母代表器件的类型，P代表普通管
- 用字母代表器件的材料，A代表N型锗，B代表P型锗，C代表N型硅，D代表N型硅
- 2代表二极管，3代表晶体管

二、二极管的伏安特性

二极管的伏安特性曲线如图 1-16 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。

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



式中, I_s 为反向饱和电流; U 为二极管两端的电压降; U_T 为温度电压当量。对于常温(相当于 $T=300\text{ K}$), 则有 $U_T=26\text{ mV}$, 见式(1-2)。

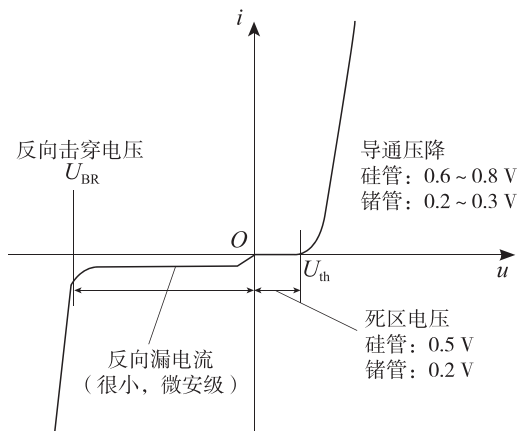


图 1-16 二极管的伏安特性曲线



二极管的伏安特性

(一) 正向特性

当 $U>0$ 时, 处于正向特性区域。正向区分为两段。

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} 为 0.5 V 左右, 锗二极管的死区电压 U_{th} 为 0.2 V 左右。

(二) 反向特性

当 $U<0$ 时, 处于反向特性区域。反向区也分为两段。

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} 为 $5\sim 8\text{ V}$ 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

由于半导体的导电性与温度有关, 所以二极管的特性对温度很敏感, 温度升高时二极管正向特性曲线向左移动, 反向特性曲线向下移动, 如图 1-17 所示。变化的规律是: 从正向特性看, 在接近常温, 同一电流的作用下, 温度每升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$, 正向电压减小 $2\sim 2.5\text{ mV}$; 从反向特性看, 温度每升高 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 反向电流增大一倍。此外, 当温度升高时, 二极管的反向击穿电压也会有所减小。

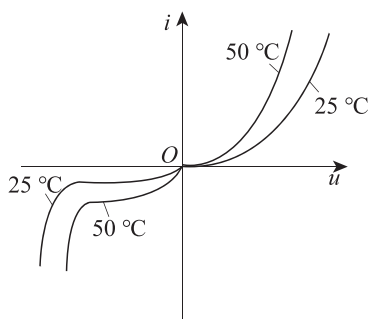


图 1-17 温度对二极管特性的影响

四、二极管的主要参数

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 、正向压降 U_F 、动态电阻 r_d 和最高工作频率 f_{max} 等。

(1) 最大整流电流 I_F 。最大整流电流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 °C 左右，锗管为 90 °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 1 A。

(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} 。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 °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，管子的单向导电性越好。值得注意的是，反向电流与温度有着密切的关系，温度每升高 10 °C，反向电流约增大一倍。例如 2AP1 型锗二极管，在 25 °C 时反向电流约为 250 μA ，温度升高到 35 °C，反向电流将上升到 500 μA ，以此类推，在 75 °C 时，它的反向电流已达 8 mA，不仅失去了单向导电特性，还会使管子过热而损坏。又如，2CP10 型硅二极管，在 25 °C 时反向电流仅为 5 μA ，温度升高到 75 °C 时，反向电流也不过 160 μA 。硅二极管的反向电流一般在纳安(nA)级；锗二极管在微安(μA)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 。正向压降是指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 0.6~0.8 V；锗二极管为 0.2~0.3 V。

(5) 动态电阻 r_d 。动态电阻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} 。最高工作频率是二极管工作的上限频率。因二极管与 PN 结一样，其结电容由势垒电容组成。所以 f_{max} 的值主要取决于 PN 结结电容的大小。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

二极管是一种非线性器件，对二极管电路的精确分析一般采用非线性电路的分析方法，这具有一定的困难。为便于分析，在一定条件下，常用线性元件所构成的电路来近似模拟二极管的特性，并用之取代电路中的二极管。能够模拟二极管特性的电路称为等效电路，又称二极管的等效模型。

(一)理想模型

如图 1-18 所示，虚线表示二极管的实际伏安特性曲线，实线为二极管的理想特性曲线。由图可见，在正偏时，二极管压降为 0，而当二极管处于反偏时，它的电阻视为无穷大，电流为零。

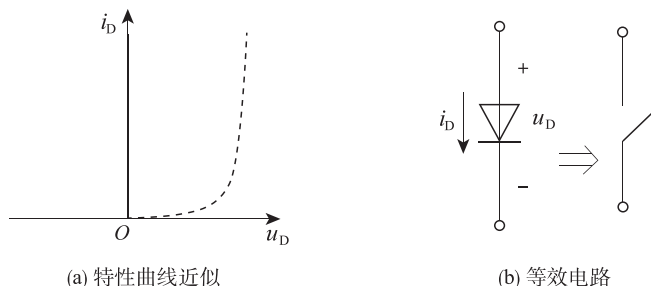


图 1-18 二极管的理想模型和等效电路

虽然理想二极管和实际二极管的特性有一定的差别，但在电路中如果二极管的正向电压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。

(二)恒压降模型

为了反映二极管的导通电压，可以采用如图 1-19 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 0.7 V，锗管取 0.2 V），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。

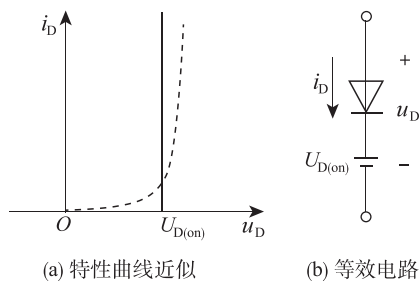


图 1-19 二极管的恒压降模型和等效电路

(三)折线模型

折线模型如图 1-20 所示，为了较真实地描述二极管的伏安特性，在恒压降模型的基础上作一定的修正，即认为二极管的管压降不是恒定的，而是随着二极管电流的增大而增加。由图可见，二极管两端的电压小于导通电压时，电流为零，

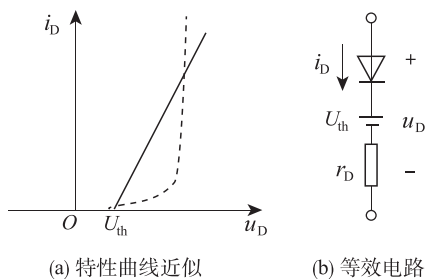


图 1-20 二极管的折线模型和等效电路



超过导通电压后，特性曲线用一条斜线来近似。

(四)微变等效模型

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这一小段曲线，如图 1-21 所示。在这种情况下二极管可等效为一个微变等效电阻 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 $r_D \approx \frac{U_T}{I_D}$ 。

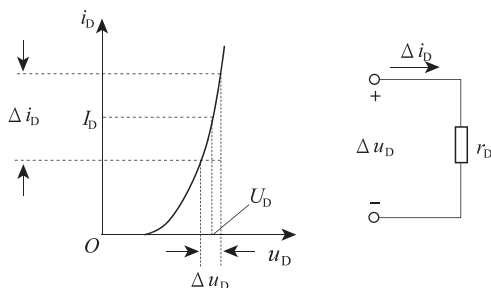


图 1-21 二极管的微变等效模型和等效电路

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，如图 1-22 所示。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，习惯上称为单向脉动性直流电压。

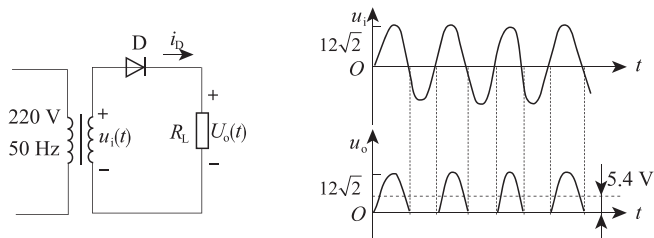


图 1-22 二极管的整流电路



(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。限幅电路常用于以下几个方面。

(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压时产生限幅作用。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 1-23 所示。

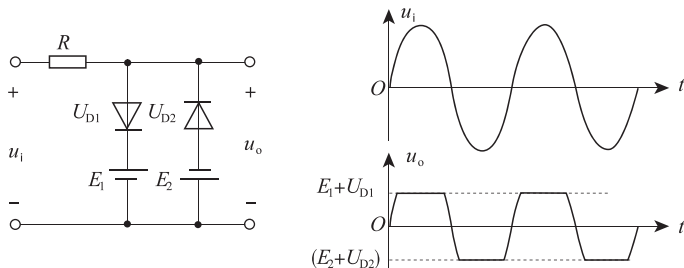


图 1-23 二极管的双向限幅电路

(三)钳位电路

二极管钳位电路是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压上，如图 1-24 所示。

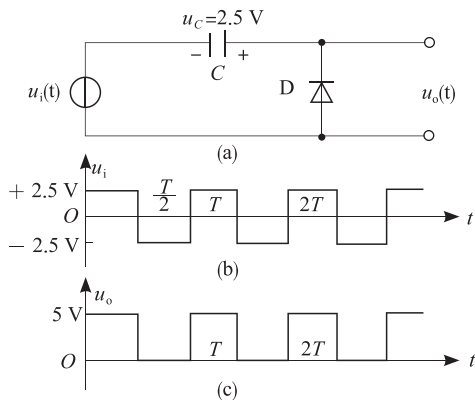


图 1-24 二极管钳位电路



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为正极。还有的二极管上标有色环，带色环的一端为负极。

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

(4) 观察二极管外壳，带有银色带的一端为负极。

2. 检测好坏

普通二极管(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 $1 k\Omega$ 左右，反向电阻值为 $300 k\Omega$ 左右。硅材料二极管的电阻值为 $5 k\Omega$ 左右，反向电阻值为 ∞ (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，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。



二极管的极性识别和性能检测



三组 9 个 LED 旋转灯

LED 的种类很多，在现实生活中也经常用到，如大型活动装饰灯光、广告显示屏等，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，要求工作电压为 4.5 V 直流电压，每组 LED 轮流发光，并有一定的时间间隔。

案例分析：图 1-25 所示为 3 个晶体管 and 9 个 LED 组成的循环灯。当电路接通电源时，3 个晶体管都争先导通，但由于元器件有差异，只有某一个管子最先导通。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，接在 Q_2 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， Q_3 也将迅速导通。在这段时间内， 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，使晶体管 Q_2 基极电压逐渐升高，当超过 0.6 V 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。同时， Q_2 集电极电压的下降通过电容器 C_2 的作用使 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 个晶体管便轮流导通和截止，三组发光二极管就不停地循环发光。

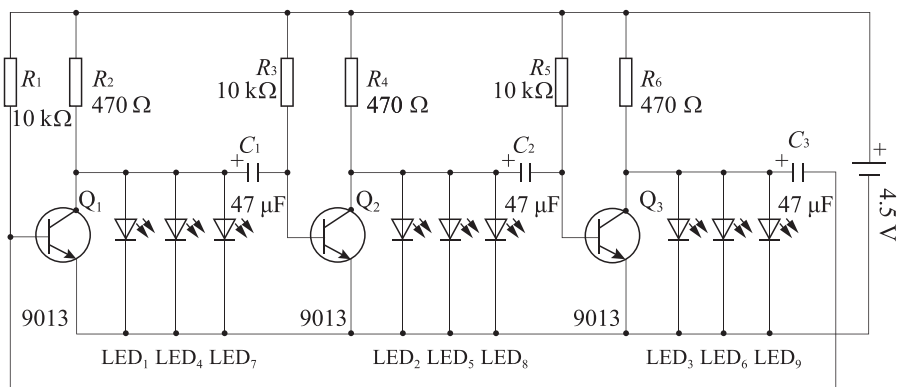


图 1-25 三组 9 个 LED 旋转灯电路图