



模拟电子技术

学习情境一 半导体二极管及其应用

第一单元 半导体的基础知识

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。

第一单元 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。

第一单元 半导体的基础知识

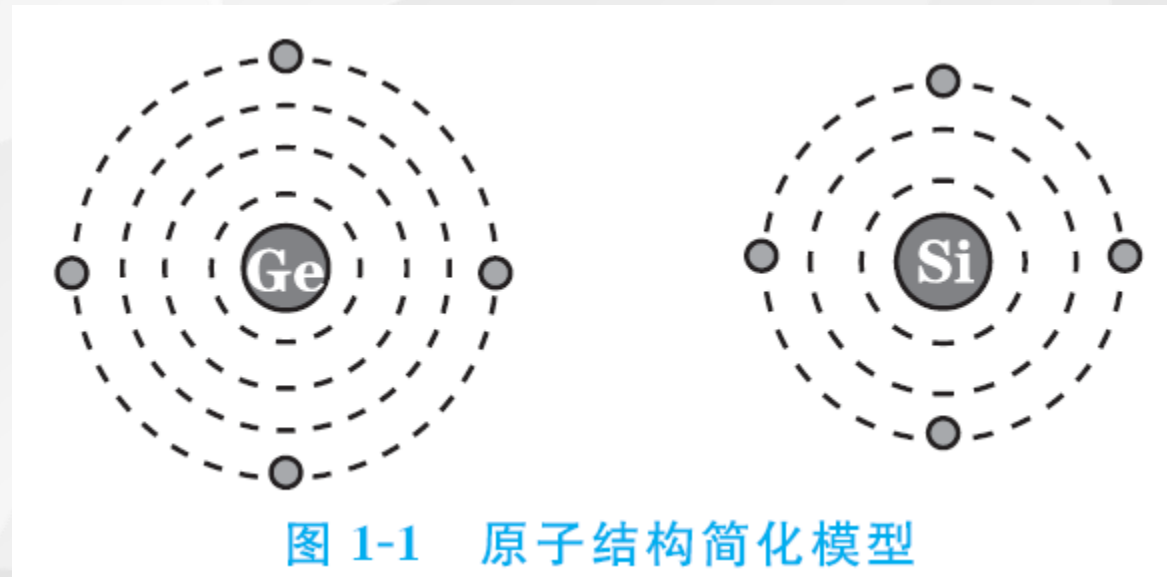
半导体材料之所以备受人们关注，并且得到广泛的应用，是由于它们具有**独特的区别于导体和绝缘体的物理特性**。**第一**，半导体的电阻率具有热敏性，随温度升高而明显减小（负温度系数），而一般金属的电阻率随温度升高而增大。利用半导体的这种特性，很容易制成热敏电阻或其他对温度敏感的传感器。**第二**，半导体的电阻率具有光敏性，即光照可改变半导体的导电特性，光照越强，电阻率越低。例如硫化铝薄膜电阻，无光照时，其电阻为几十兆欧姆，有光照时，其电阻仅为几万欧姆。**第三**，半导体的电阻率受杂质的影响很大，这种杂质性与导体和绝缘体截然不同。在金属导体中掺入少量杂质后，其电阻率虽有增大但变化不大。而半导体不同，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。

第一单元 半导体的基础知识

(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**。

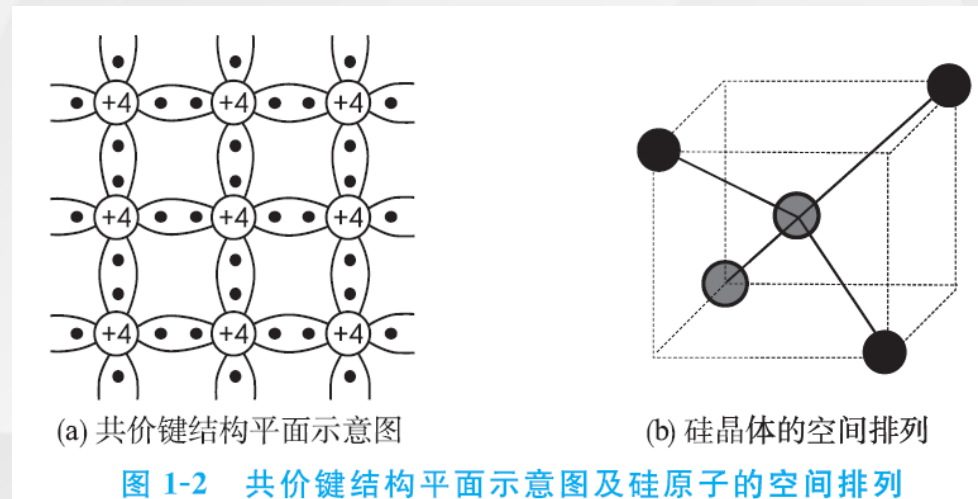
典型的本征半导体有硅和锗。硅和锗是四价元素，在原子最外层轨道上的四个电子称为价电子。**硅和锗的物理性质、化学性质主要由这四个价电子决定**。在实际问题中，为了突出价电子的作用和便于讨论，通常把原子核和内层电子看作一个整体，称为惯性核。于是就可以得到原子的简化模型，如图1-1所示。



第一单元 半导体的基础知识

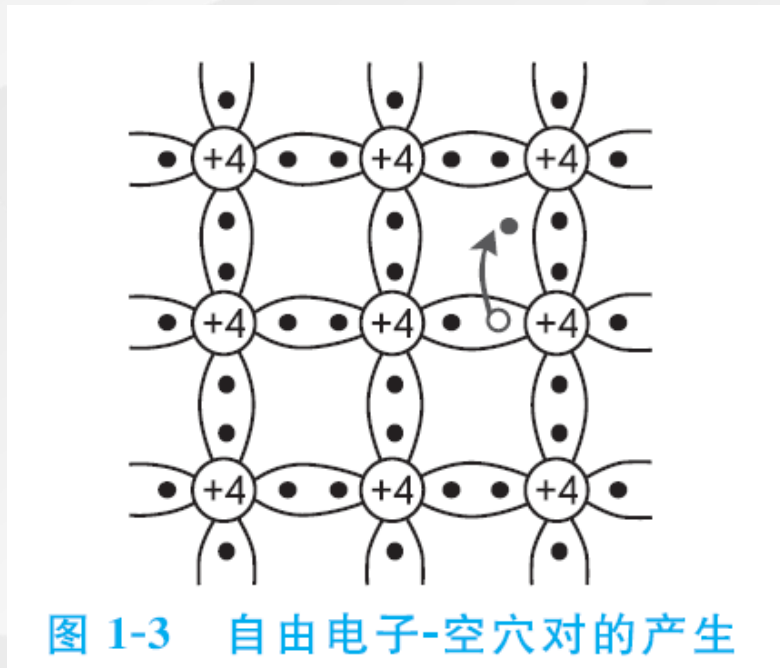
以硅原子为例，硅原子的每个价电子分别与相邻硅原子的一个价电子组成一个价电子对，这个价电子对为相邻两个原子所共有。价电子对中的每一个价电子，既围绕原来的原子核运动，又围绕相邻的原子核转动，它们同时受到两个原子核的吸引作用。人们把这种对共有价电子所形成的束缚作用称为**共价键**，如图1-2a所示。共价键中的价电子为这些原子所共有，并为它们所束缚，形成排列有序的晶体，如图1-2b所示。

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。



第一单元 半导体的基础知识

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。



第一单元 半导体的基础知识

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。

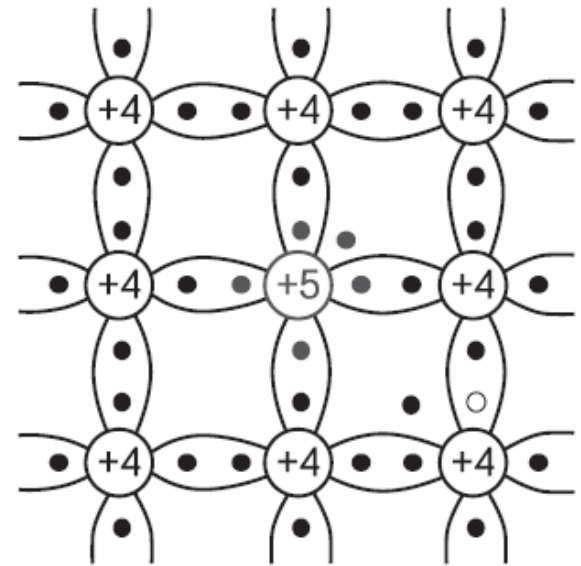


图 1-4 N型半导体的结构示意图

第一单元 半导体的基础知识

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？

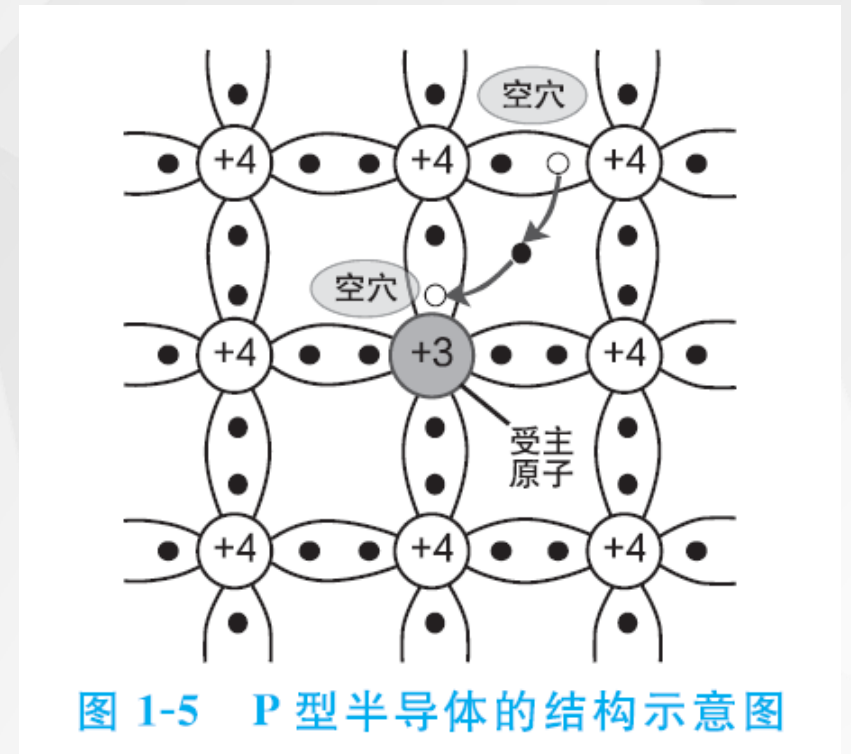
第一单元 半导体的基础知识

(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。

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？



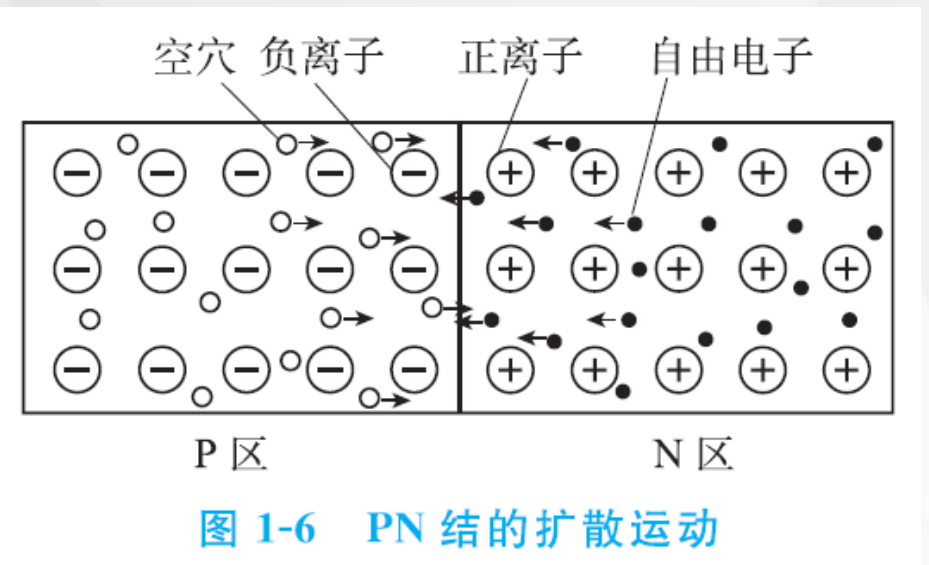
三、PN结的特性

(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。

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。



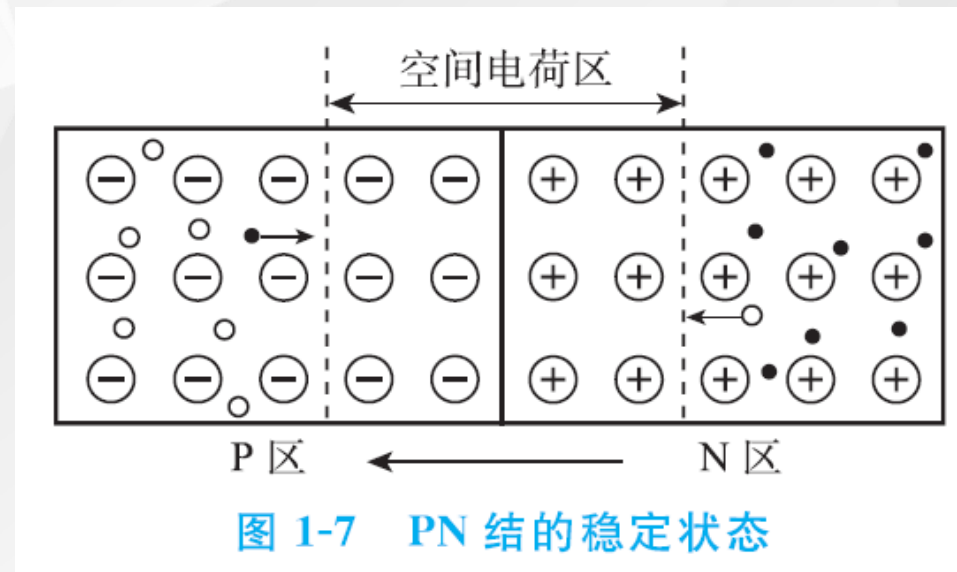
2. 内建电场的形成和漂移运动

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。



(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结处于正偏。电流从P区流向N区，空穴和自由电子都向交界面运动，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。

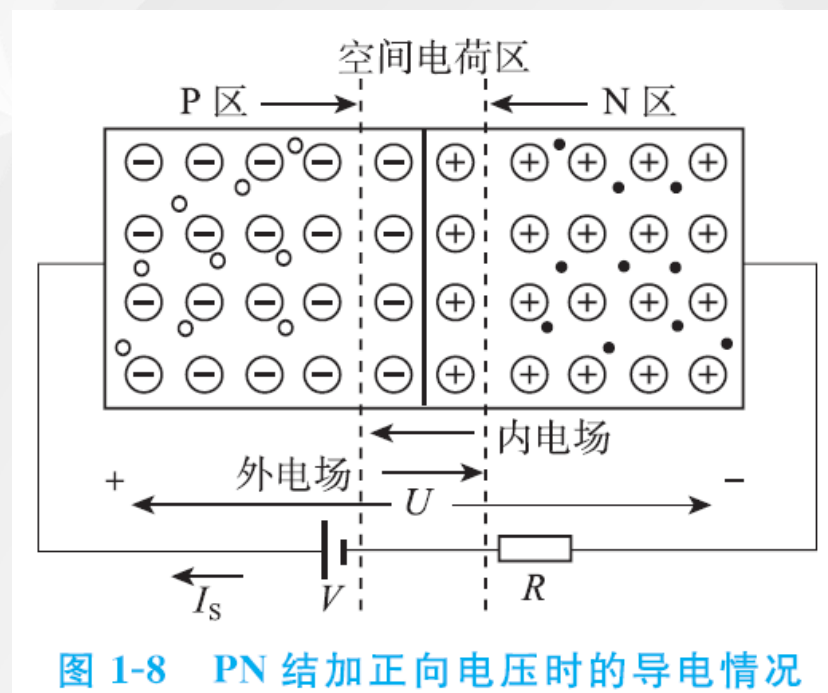


图 1-8 PN 结加正向电压时的导电情况

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。

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。

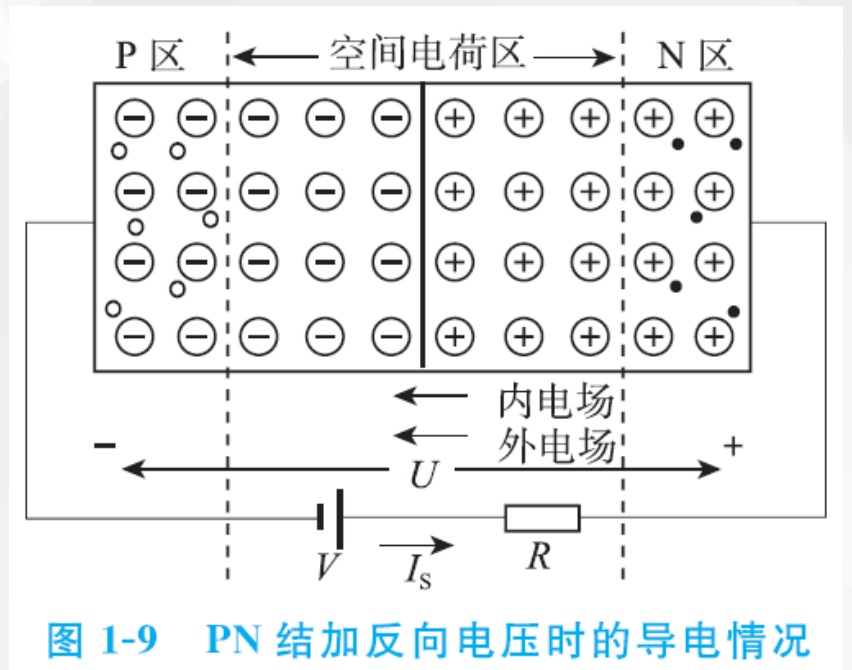


图 1-9 PN 结加反向电压时的导电情况

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。

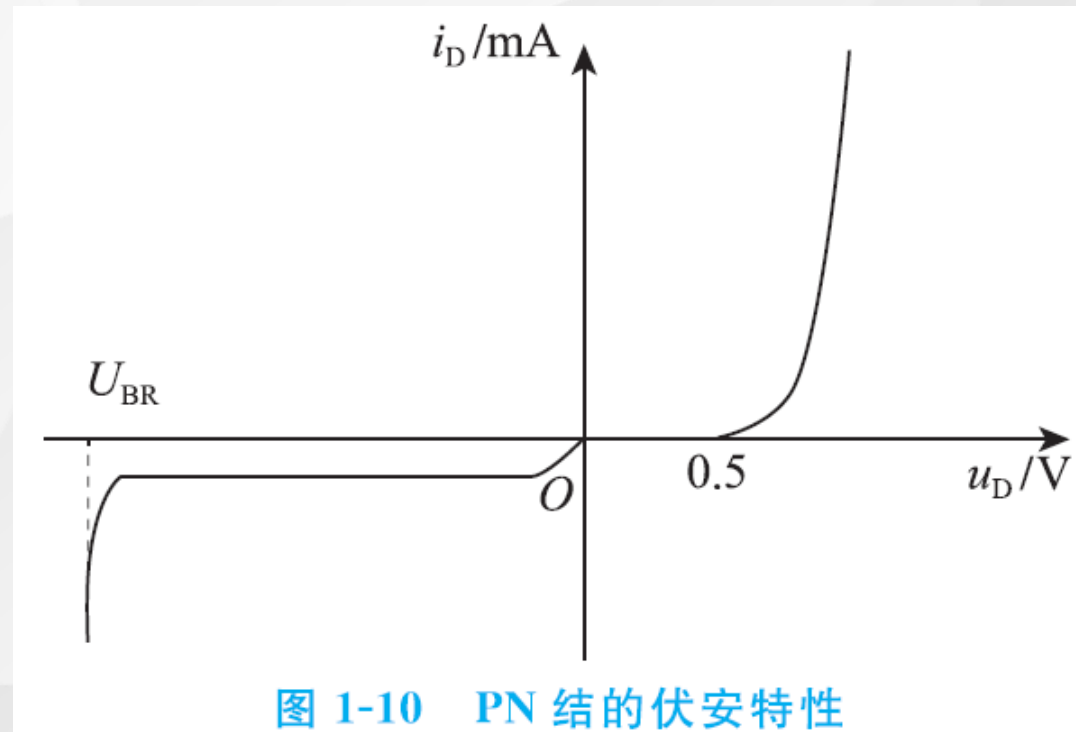


图 1-10 PN 结的伏安特性

第一单元 半导体的基础知识

伏安特性的表达式为

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

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。

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

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）。

(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。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/165020114343012014>