

半导体电路基础

(上册 第一分册)

北京工业学院 编

科学出版社

73.67
171.1
1-1:2

第一章 半导体二极管和三极管

我们都知道,半导体电路的应用很广,种类也很多,但是就其组成内容来看,主要是由半导体管和交直流电路两部分组成的。所以要研究半导体电路,不仅要用到已经学过的交直流电路的基本概念和分析计算方法,而且还要用到有关半导体管工作原理和特性的基本知识。因此,在研究半导体电路之前,首先介绍一下半导体管的工作原理和特性是十分必要的。这里所说的半导体管主要是指半导体二极管和三极管,也就是我们常说的晶体二极管和三极管。

第一节 半导体的基本知识

半导体管都是用半导体材料做成的,因此,要了解半导体管的工作原理和特性,首先必须对半导体的性质有所认识。

一、什么是半导体

大家常见的电线,主要是由两种材料做成的,里面的铜线或铝线是用来传送电能的,外面裹着的橡皮或塑料是用来隔离外界,防止触电的,可见选用这两种材料的原因,主要是因为它们的导电能力有很大差别。我们把容易导电的物体通称为导体,如金、银、铜、铝等;而把不容易导电的物体通称为绝缘体,如陶瓷、云母、塑料、橡胶等。可是除了导体和绝缘体之外,还存在着一大类物质,其导电能力介于导体和绝缘体之

间,通称为半导体,如锗、硅、砷化镓等。

其实,半导体之所以能成为制做半导体管的材料,并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而是由于它具有一些独特的导电性能。举例来说,同一块半导体,在不同的温度下或不同强度的光线照射下,它的导电能力会有非常大的区别;在纯的半导体中,适当掺入极微量的有用的杂质元素,它的导电能力会有成百万倍的增加等等。我们正是利用半导体的这些独特性能,制出了各种不同功能的电子器件。半导体为什么会有这些独特的导电性能呢?这要从半导体的内部结构谈起。

二、半导体的内部结构和导电特性

1. 半导体的内部结构

我们知道,物质是由原子组成的,原子是由带正电的原子核和若干带负电的电子组成的,电子分几层围绕原子核不停地运动。在同一个原子中,内层电子受原子核的吸引力较大,外层电子受原子核的吸引力较小,影响物质导电性能的主要是外层电子。

现在让我们具体看看如图 1-1 所示的半导体材料硅和锗的原子结构。

由图 1-1 (a) 可见,硅原子由带正电的原子核和围绕着它的 14 个带负电的电子组成,14 个电子按一定的规律分布在三层电子轨道上,由于原子核带 14 个电子电量的正电,所以正常情况下原子呈现中性。靠近原子核的里面两层的 10 个电子,由于受原子核的束缚力较大,很难有活动的余地,所以它们和原子核组成一个惯性核,它的净电量是 $14 - 10 = +4$ 个电子电量,而最外层的四个电子,受原子核的束缚力较小,

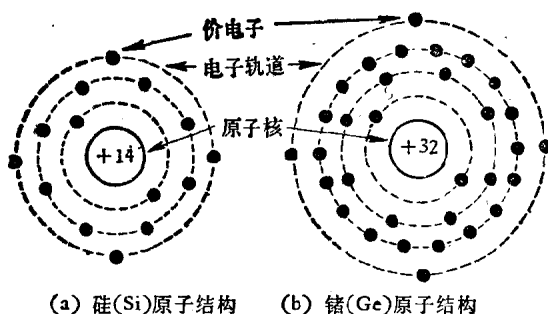


图 1-1 硅、锗原子结构平面示意图

通常称为价电子。为了讨论方便，可以根据这种设想，把图 1-1 (a) 所示的硅原子结构改画成如图 1-2 (a) 所示的简化结构。同理，也可以把图 1-1 (b) 所示的锗原子结构改画成如图 1-2 (b) 所示的简化结构。

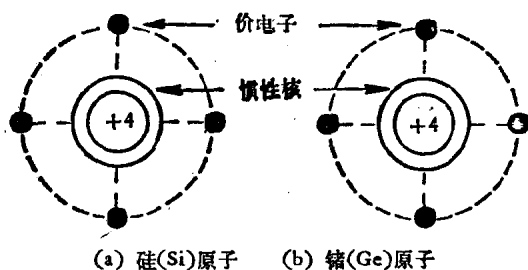


图 1-2 原子结构简化图

由图 1-2 可见，硅和锗原子的特点都是在一个惯性核周围环绕着四个价电子，通常有几个价电子就叫几价元素，所以硅和锗都是四价元素。

为了搞清半导体的独特导电性能，还需要进一步了解硅、锗半导体晶体中的原子排列情况。应当指出，用于制作半导体管的硅、锗材料，都必须是经过加工提炼成的纯净的单晶半导体，在单晶半导体中，其原子排列已由杂乱无章的状态变成了

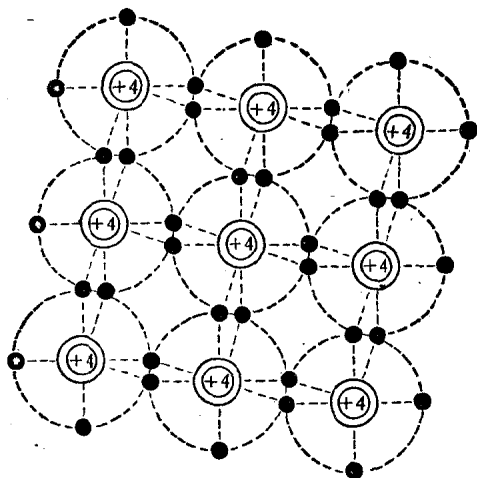


图 1-3 硅或锗单晶体的结构平面示意图(共价键结构)

非常整齐的状态,图 1-3 是硅或锗单晶体的结构平面示意图,本来应该画成立体结构,为了便于观察,画成了平面结构。

由图可见,各原子之间的距离都相等,而且相距很近。由于每个原子的最外层有四个价电子,而且原子的外层电子要有八个才是稳定状态,因此,原子与原子在组成晶体时,每一个原子都要争夺周围相邻的四个电子组成稳定状态,这样一来,每相邻两个原子都共用一对电子,叫“共有”电子对。“电子对”中的任何一个电子,一方面围绕自己原子核运动,另一方面也出现在相邻原子所属的轨道上,这种运动方式形成了联系两个原子的束缚作用,就象链条一样把两个原子互相拉住,不易远离。我们把这两个“共有”的价电子所形成的束缚作用叫做“共价键”。所以,在单晶体内,各个原子都要分别和相邻近的四个原子组成四个共价键,而所有共价键中的价电子都被束缚在相邻两原子的外层轨道上。这样的组合方式称为“共价键结构”,如图 1-3 所示的情形。

2. 半导体的导电特性

半导体硅、锗共价键结构的特点是：共价键内的共有价电子所受到的束缚力，并不那么紧，在一定温度下或在一定强光的照射下，由于热能或光能转化为电子的动能，其中少数电子就可能挣脱束缚而成为自由电子。由于自由电子是带负电荷的粒子，在外电场的作用下可以作定向运动形成电子流，所以自由电子又称为带负电的载流子。

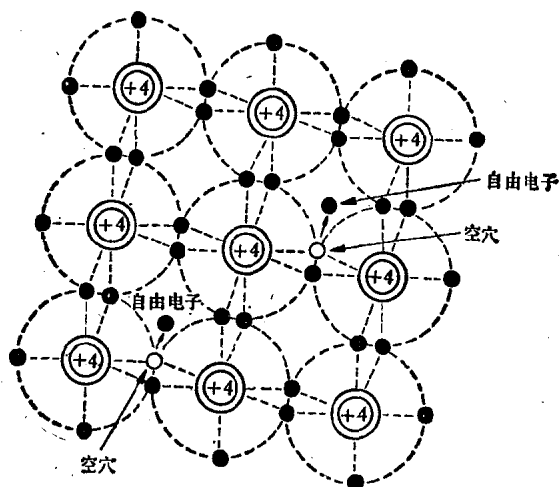


图 1-4 热运动产生的电子-空穴对

值得注意的是：共有价电子在挣脱束缚成为自由电子以后，同时留下了一个空位，如图 1-4 所示的情形，有了这样一个空位，附近的共有价电子就能很容易地过来填补，当然过来的电子又会在其原址留下新的空位，这个新空位又会被其附近的共有价电子所填补，依次递补，必然形成一种共有价电子的运动。不过由于空位的出现是原子失去电子的结果，而原子失去电子必然要显正电性，因此可以认为空位是带正电的。

所以又可以把上述共有价电子的运动，想像成为一个带正电的空位在半导体中作与价电子反向的移动。为了区别于带负电的自由电子的运动，就把这种空位的运动称为“空穴”运动，空位称为“空穴”，可见空穴也是一种载流子，而且是带正电的载流子。

打个通俗的比喻，大家坐在礼堂里开会，如果前边走了人出现了空位，坐在后面的人就喜欢往前坐，这样人们依次递补空位向前坐，看起来就好象空位子向后运动一样。显然，这种移动和没有座位的人到处走动是不一样的，后一种好比是自由电子的运动，而有座位的人依次递补空位的移动则好比空穴运动。

由此可见，在一定温度下，半导体中存在着两种载流子，一种是带负电的自由电子，另一种是带正电的空穴，所以半导体在外加电压作用下，将同时产生两种载流子的导电现象，如图 1-5 所示的情形。其中的自由电子向正极移动形成电子电流，而空穴向负极移动形成空穴电流，因此流过外电路的电流等于电子电流和空穴电流的代数和，这就是纯单晶半导体的导电方式。下面我们再作一些说明。

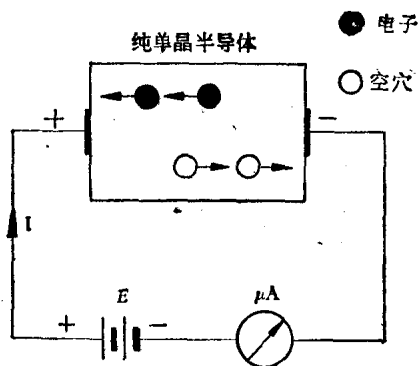


图 1-5 半导体中载流子的移动

(1) 图 1-5 中所示的空穴电流, 实际上是由共有价电子依次递补空穴, 而向正极移动的另一种电子电流, 不过为了区别于自由电子所形成的电子电流, 还是叫空穴电流更为方便。

(2) 在一般室温下, 硅、锗单晶半导体中的电子和空穴的数量还是非常少的, 因此电路中的电流也是非常小的, 不过, 硅、锗单晶半导体对温度十分敏感, 温度越高, 电流越大。

(3) 当温度升高时, 半导体里由于热运动而不断产生自由电子, 同时也出现相应数量的空穴, 这种过程称为“热激发”, 并且把产生的电子和空穴称为“电子-空穴对”。不过, 在一定温度下, 半导体里的“电子-空穴对”却能维持一定的数目, 这是因为随着“电子-空穴对”的增多, 自由电子在运动中与空穴相遇的机会也在增多, 当自由电子与空穴相遇后, 就会重新结合而消失, 这是一个逆变过程, 我们称之为“复合”。可见, “复合”的机会是随着“电子-空穴对”的增多而增多的, 因而“电子-空穴对”的增多是有限制的, 在一定温度下, 两种运动过程可以达到动态平衡, 这时, 热激发和复合的过程虽然仍在继续不断地进行, 但实际存在的“电子-空穴对”数目却是一定的。

三、N 型和 P 型半导体

通过以上讨论可知, 纯单晶半导体在室温下的导电性能是很差的, 但是它有一些独特的导电性能是很可贵的, 那就是它的导电性能容易为人们所控制。例如, 温度的升高, 光线的照射, 有选择地掺入杂质等, 就可以使其导电能力显著提高, 尤其是掺杂作用, 效果非常显著。例如, 在纯单晶半导体中只要掺入千万分之一的有用杂质, 它的导电能力就能有十几倍的增加。

为什么杂质能有这样巨大的作用呢? 这仍然是由于半导体的内部结构——共价键所决定的。

1. N 型半导体

若在硅单晶半导体中掺入少量的五价元素,例如磷,磷原子就会与硅原子组成共价键结构,如图 1-6 所示。

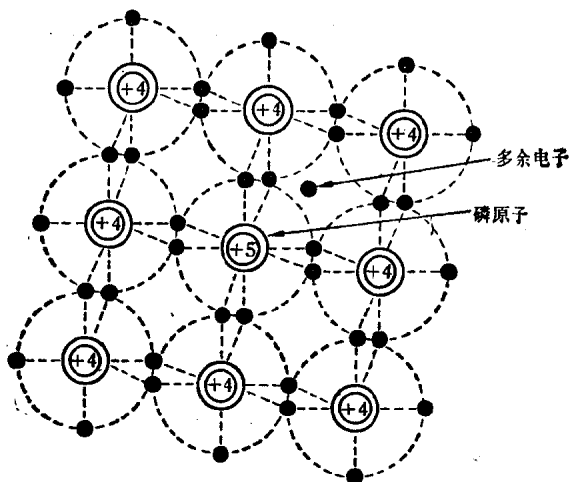


图 1-6 N 型半导体(硅掺入磷形成电子载流子)

由于磷原子的数目比硅原子要少的多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上硅原子被磷原子所代替,但由于磷原子具有五个价电子,所以一个磷原子同相邻的四个硅原子结成共价键时,还多余一个价电子,这个价电子没有被束缚在共价键内,只受到磷原子核的吸引,所以它受到的束缚力小得多,很容易挣脱束缚变成自由电子,从而使硅单晶半导体中的电子载流子数目大大增加。可见这种半导体主要是靠电子导电,所以叫做电子型半导体,或简称为N型半导体。

在N型半导体中,除了由于掺杂产生的大量自由电子外,还有由于热激发产生的少量“电子-空穴对”,因此在这种半导体中,空穴的数目相对于自由电子的数目是极少的,所以把空

穴称为“少数载流子”，而把电子称为“多数载流子”。

2. P 型半导体

若在硅单晶半导体中掺入少量的三价元素，例如硼，硼原子也会与硅原子组成共价键结构，如图 1-7 所示。

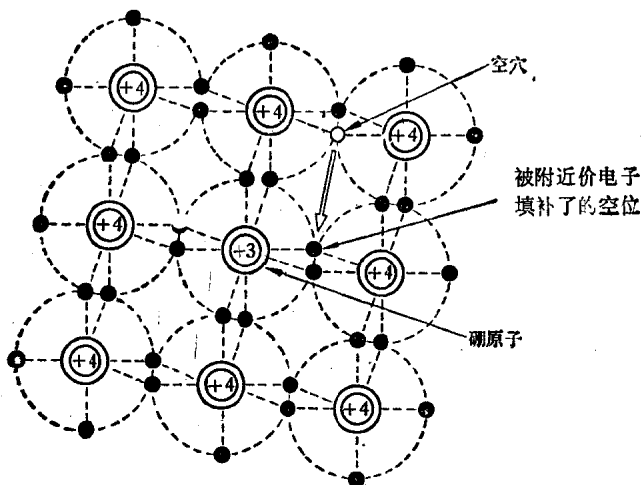


图 1-7 P 型半导体(硅掺入硼形成空穴载流子)

显然，图示情况与N型半导体完全不同，因为硼原子只有三个价电子，当它同相邻的四个硅原子结成共价键时，还缺少一个价电子，因而在一个共价键上要出现一个空位置，但是为了满足结成四对共价键的需要，这个空位置很容易接受一个外来电子的填补，而附近硅原子的共有价电子在热激发下，也很容易转移到这个空位置上来，于是就在那个硅原子的共价键上出现了一个空穴，而硼原子接受了一个价电子之后也成了带负电的硼离子。这样，每个硼原子都能接受一个价电子，同时在附近产生一个空穴，从而使硅单晶半导体中的空穴载流子数目大大增加，可见这种半导体主要是靠空穴导电，所以

叫空穴半导体,或简称为P型半导体。同样,在P型半导体中也有由于热激发而产生的少量“电子-空穴对”,所以在P型半导体中,与N型相反,空穴是“多数载流子”,而电子是“少数载流子”。

通过以上讨论可知:

(1) 在纯单晶半导体硅或锗中,掺入少量不同的有用的杂质元素,可使半导体的导电性能大大增强,由此可以获得两种类型的半导体——N型和P型半导体。

(2) 在N型半导体中,电子是多数载流子,空穴是少数载流子;在P型半导体中,则相反。

最后还应该指出,N型和P型半导体都是电中性的,对外不显电性。这主要是由于单晶半导体和掺入的杂质都是电中性的,而且在掺杂过程中既不丧失电荷也不从外界得到电荷,只是由于杂质原子的价电子数目比晶体原子的价电子数目多一个或少一个,而使半导体中出现了大量可以运动的电子或空穴,并没有破坏整个半导体内正负电荷的平衡状态。

第二节 P-N 结

在第一节中,我们讨论了N型和P型半导体的导电特性。如果在—块完整的半导体内,设法制成一边是N型,一边是P型,将会产生什么现象呢?这是一个十分重要的问题。

一、从一个实验谈起

半导体二极管就是上面所说的那种半导体,它的一部分是P型,另一部分是N型,分别用导线引出,从P型引出的一端称为二极管的正极,从N型引出的一端称为二极管的负极,

正式产品还要把半导体密封在特制的管壳内。

现在用一个二极管,两节干电池和一个手电筒的小灯泡,按图 1-8 (a) 所示的电路连接起来,小灯泡就会发光,这表明电路畅通,也意味着二极管电阻很小。如果把电池的接法倒换过来,如图 1-8 (b) 所示,小灯泡就不亮,这表明电路不通,也意味着二极管的电阻变得很大,如果用一根导线代替二极管,则不管电池按图 (a) 或图 (b) 连接,小灯泡都会发光。

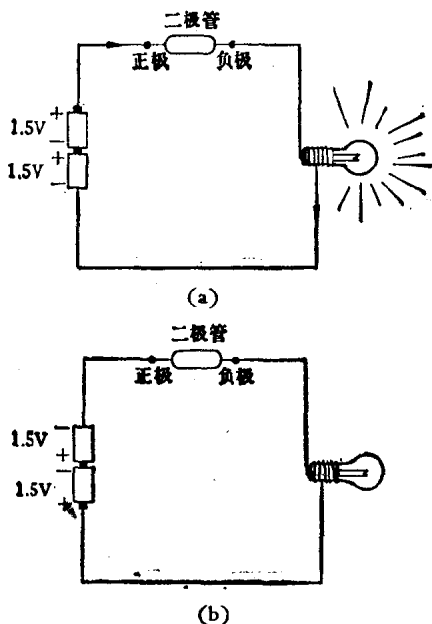


图 1-8 半导体二极管单向导电特性实验

通过这个实验可以看出, 半导体二极管的导电特性与导体不同, 只有当二极管的正极 (即半导体的 P 型部分) 与电池正极相接, 而二极管的负极 (即半导体的 N 型部分) 与电池负极相接时, 二极管的电阻才会变得很小, 使电流畅通; 反之, 电阻就会变得很大, 使电流很难通过。也就是说, 在二极管的半

导体中,只允许电流由P型流向N型,而不允许电流由N型流向P型,这种导电特性就是半导体二极管的单向导电特性,如图1-9(a),(b)所示的情形。

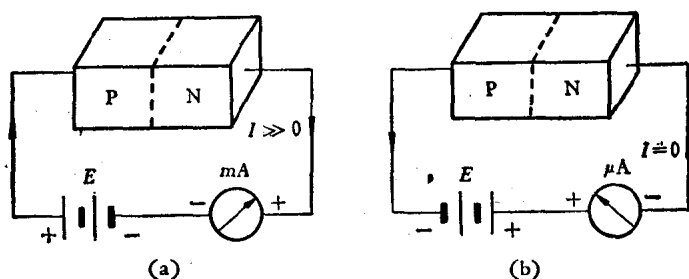


图1-9 单向导电性示意图

为什么在一块完整的半导体中,一边是P型另一边是N型时,会有单向导电特性呢?这就需要进一步研究这种半导体中电子和空穴的运动规律,以及这种半导体中所形成的特殊结构——P-N结。

二、P-N 结 的 形 成

P-N 结是半导体二极管和三极管中最基本的结构,它的性能如何,直接影响着二极管和三极管的质量指标,因此弄清楚 P-N 结的形成原因及其特性,是十分必要的。下面分三步来研究。

1. 多数载流子的扩散运动

综合上节所述,可以看出:

在N型半导体里,五价的杂质原子在室温下一般都把自己多余的一个价电子施放出来,形成多数载流子。而杂质原子本身由于放出了一个价电子成为带正电的离子。离子被固定在晶体结构内是不会移动的。此外,由于热激发还会产生

少量的“电子-空穴对”。总之，N型半导体内存在着可以运动的多数载流子——自由电子和少数载流子——空穴，以及不能移动的正离子。所以通常用图 1-10 (a) 表示N型半导体，为了简化画面，图中没有画出少数载流子和半导体原子，但是必须指出，在N型半导体里，正电荷的数量和负电荷的数量总是相等的，因而整个N型半导体总是电中性的。

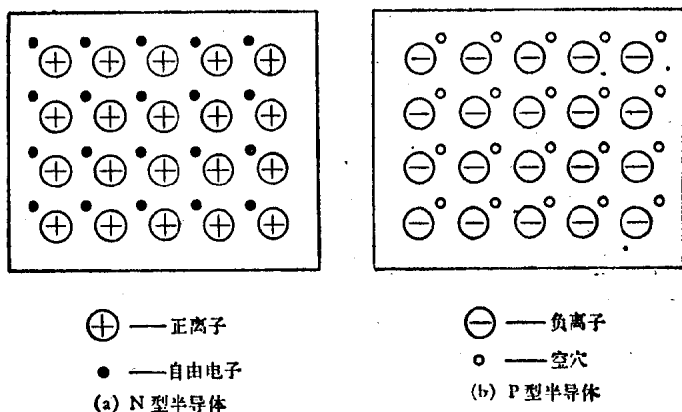


图 1-10 N型和P型半导体示意图

在P型半导体里，三价的杂质原子都能接受一个附近的价电子而提供一个空穴，形成多数载流子，而杂质原子本身由于接受了一个价电子成为带负电的离子，此外，由于热激发也会产生少量的“电子-空穴对”。总之，P型半导体内存在着可以运动的多数载流子——空穴和少数载流子——自由电子，以及不能移动的负离子。所以通常用图 1-10 (b) 表示。同样，整个P型半导体也是电中性的。

如果有一块单晶半导体由于两部分掺杂不同，一边是P型半导体，另一边是N型半导体，如图 1-11 所示的情形。那么由上述可知，在P型区域里，空穴很多，电子很少；而在N型

区域里,电子很多,空穴很少。这时将有什么现象发生呢?为了便于说明将要发生的现象,先介绍一下常见的“扩散”现象。

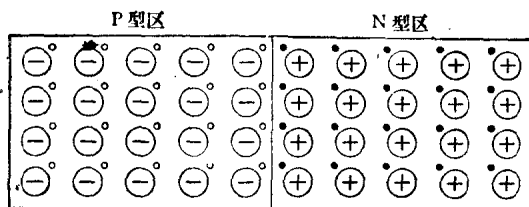


图 1-11 形成 P-N 结前的载流子情况

我们知道,在一杯清水中,滴入一滴蓝墨水,这滴蓝墨水逐渐扩展开来,过一会,整杯清水都会变成淡蓝色的了,这种现象称为“扩散”。蓝墨水中蓝色物质的浓度大,清水中没有蓝色物质,所以“扩散”就是浓度大的物质向浓度小的物质中渗透的过程。可见,物质的浓度差别是产生扩散的原因,当浓度差别等于零时,扩散也就停止了。

下面我们再来研究前面提出的问题,很明显,在图 1-11 所示 P 型半导体和 N 型半导体的交界面(以下简称 P-N 交界面)两边,电子或空穴的浓度都是不相等的。因为 P 型区内空穴浓度大于 N 型区内空穴的浓度,所以空穴要从 P 型区向 N 型区扩散。同理,电子也要从 N 型区向 P 型区扩散。这里应该指出, P 型区的空穴和 N 型区的电子都是它们各自的多数载流子,所以这时进行扩散的都是多数载流子。

现在要问:当扩散进行一段时间之后,交界面两边的电子和空穴的浓度差别,是否会完全消失呢?要回答这个问题,还需要了解多数载流子扩散过交界面以后,会出现什么新问题。

2. 空间电荷区的形成

在没有发生扩散之前, P 型区和 N 型区都是电中性的,我

们可以想象,当多数载流子的扩散开始后,首先在 P-N 交界面附近进行. 在靠近交界面附近的 P 型区中,必然有一批空穴扩散到靠近交界面附近的 N 型区中去,并和那里的电子复合掉,从而使那里露出一批带正电荷的杂质离子;同时,在交界面附近的 P 型区中,也由于跑掉了那批空穴而露出一批带负电荷的杂质离子. 如图 1-12 所示.

同样,在靠近交界面附近的 N 型区中,也必然有一批电子扩散到靠近交界面附近的 P 型区中去,并和那里的空穴复合掉,从而使那里露出一批带负电荷的杂质离子;同时,在交界面附近的 N 型区中,也由于跑掉了那批电子而露出一批带正电荷的杂质离子.

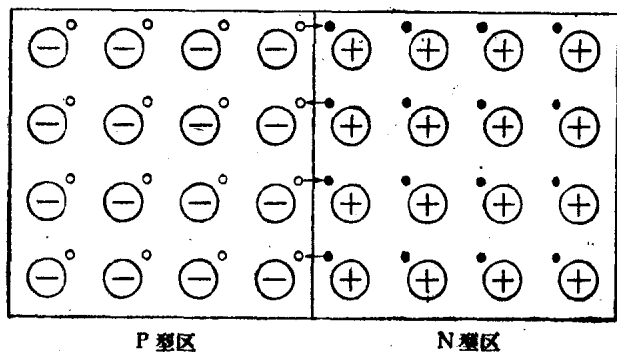


图 1-12 形成 P-N 结时,载流子的扩散过程

这样扩散的结果,就在交界面附近的 P 型区中,暴露出很薄一层不能移动的负离子,同时在交界面附近的 N 型区域中,暴露出很薄一层不能移动的正离子. 因此,在 P-N 交界面两边,就形成了一边带正电荷,另一边带负电荷的一层很薄的区域,称为“空间电荷区”,这就是我们所说的 P-N 结,如图 1-13 所示.

下面还需要进一步说明,空间电荷区的宽度是怎样确定

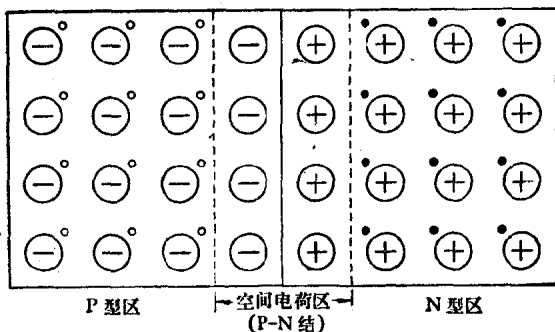


图 1-13 空间电荷区

下来的。我们知道，在空间电荷区内靠近N型区的一边存在着正电荷，在靠近P型区的一边存在着负电荷。因此在空间电荷区内，就会产生一个方向由正电荷指向负电荷的电场，或者说，在P-N结内产生一个由N型区指向P型区的电场。因为这个电场是由P-N结内部的电荷产生的，不是外加的电场，所以叫做“内电场”，如图1-14所示。

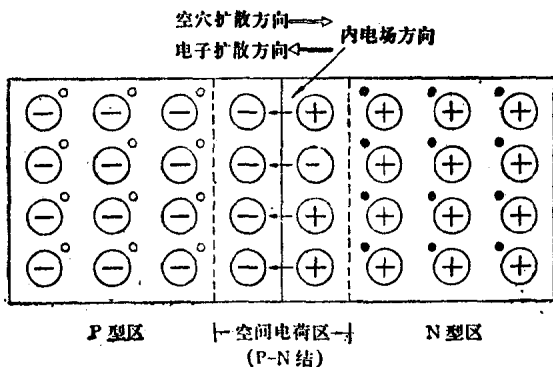


图 1-14 内电场

这个内电场有什么作用呢？我们知道，电场对电荷是有作用力的，电场会推动正电荷顺着电场方向运动，而阻止其逆