

第1章 器件物理

1960 年以前,几乎所有电子电路都依靠真空管实现放大和整流的关键任务。一台规模化生产的普通 AM 收音机需要五只真空管,而一台彩色电视机则需要不少于二十只真空管。真空管体积大,易碎而且昂贵。它们散热量大而且不够稳定可靠。倘若电子学依靠它们,那么得用成千上万的有源元件去构建一个系统,这几乎是不可能的。

1947 年双极型晶体管的出现标志着固态革命的开始,这些新器件体积小、便宜、结实且稳定可靠。固态电路使得袖珍晶体管收音机、助听器、石英手表、按键式电话、光盘播放盒以及个人电脑的发展成为可能。

一个固态器件由一个表面掺有杂质的晶体组成,这些杂质改变了晶体原来的电特性,使得它可以对电信号进行放大或调制。因此我们必须掌握器件的物理特性来理解这些功能是如何发生的。这一章我们不仅涉及到基本的器件物理,还要介绍三种重要的固态器件的特性:结型二极管、双极型晶体管和场效应晶体管。第 2 章将介绍这些以及其他固态器件的制造工艺。

1.1 半导体

本书“译者序”前给出了一个元素周期表。各种具有相似性质的元素被按行和列安排。周期表左边的元素是金属,右边的则为非金属。金属通常是热和电的良导体,它们有延展性和金属光泽。非金属是热和电的不良导体,那些固态的非金属,很脆而且没有耀眼的金属光泽。表中部的一些元素,如硅和锗,电特性介于金属和非金属之间。这些元素被称为半导体。金属,半导体和非金属的差异源于它们各自原子的电子结构。

每个原子由带正电的原子核和环绕它转动的电子云组成。电子云中电子的数目和原子核中质子的数目相等,同时也和该元素的原子序数相等。因此一个碳原子有六个电子因为碳元素的原子序数为六。这些电子就好像一层一层包裹的洋葱一样占据了一系列的壳层。当电子增加时,壳层由内向外得以填补。最外面的那一层或价电子层有可能是不满的。填在最外层的电子叫做价电子。元素的价电子的数目通常决定着它的化学特性和电特性。

元素周期表的每一行代表具有相同的电子层数。每一行的最左边一个元素有一个价电子,而最右边一个元素最外层则是填满的。最外层填满的原子状态是稳定的,而最外层不满的原子将交换电子或共享电子以使双方都填满最外层。电互相吸引的性质使得交换或共享电子的原子之间形成化学键。基于最外层要填满电子的这种特性,会形成三种类型的化

学键。

金属元素的原子之间形成金属键。以钠为例,假设一群钠原子相互靠近,每个原子都有一个价电子围绕着已填满的内层旋转。假设每个钠原子都舍弃它们的价电子,被舍弃的电子仍然被原先那个原子所吸引。不过,现在每个原子最外层都充满了电子,没有原子会接收这些价电子。图 1.1A 示意了晶体钠由于电子间的相互作用力而形成的规则晶格,被舍弃的价电子欲从晶体中获得自由。大量自由电子的出现^①,导致金属钠是极好的导体。这些电子同时也是元素有金属光泽和良好的导热性的原因。其他金属亦有相似的晶体结构,它们都是由大量的自由电子和原子通过金属键形成的稳固的晶格。

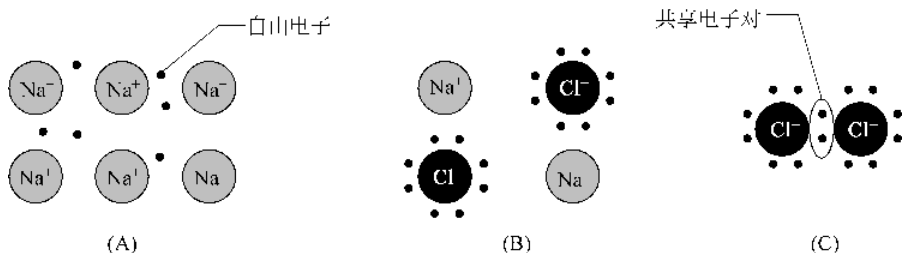


图 1.1 各种化学链接的简图

金属和非金属原子间形成离子键。假设一个钠原子和一个氯原子非常靠近,钠原子有一个价电子,然而氯原子要填满最外层则缺少一个价电子。钠原子将这个电子捐赠给氯原子,这样双方最外层都被填满。交换之后钠原子带一个单位正电荷而氯原子带一个单位负电荷。两个原子(离子)相互吸引。固态氯化钠是由氯离子和钠离子以规则的晶格形成的晶体而组成的(见图 1.1B)。氯化钠晶体是电的不良导体,因为它所有的电子都被固定在不同原子的最外层上。

非金属原子间形成共价键。假设两个氯原子非常接近。每个氯原子只有七个价电子,可是每个原子需要八个去填满它的最外层。假设两个原子各贡献一个电子来形成一个共享电子对,这样每个氯原子就有八个价电子:六个自己的电子,加上两个共享电子。两个氯原子被它们之间的共享电子对联系在一起形成一个分子(见图 1.1C)。共享电子对形成共价键。正因为缺乏自由价电子,非金属元素才不导电和缺乏金属光泽。许多非金属在室温下之所以呈气态,正是因为电中性分子间没有呈现很强的吸引力,不会压缩成液体或固体。

半导体原子间也形成共价键。以典型的半导体——硅原子为例。每个原子有四个价电子,还需要四个价电子来填满最外层。理论上来说,两个硅原子可以共享价电子来填满彼此的最外层。这种情况实际中不会发生,因为八个电子紧紧挤在一起将会互相排斥。实际上,

^① 有些金属是通过空穴而不是电子来导电的,但文中说的通常情况仍然是成立的。

每个硅原子和周围的四个原子各共享一对电子。这样,价电子散落在四个不同的方位,它们相互之间的斥力最小。

图 1.2 为晶体硅的简单示意图。每一个小圆圈代表一个硅原子。圆圈之间的每一条连线代表一个共享电子对之间形成的共价键。每个硅原子可以有八个外层电子(四个共享电子对),所以所有原子的最外层都被填满。这些原子被它们之间的共价键链接成分子网络。无数的晶格代表着晶体硅的结构。整个晶体就是一个独立的分子,这就是为什么晶体硅坚硬而且熔点高的原因。通常硅的导电性不良是因为所有的价电子都被用来形成晶格。

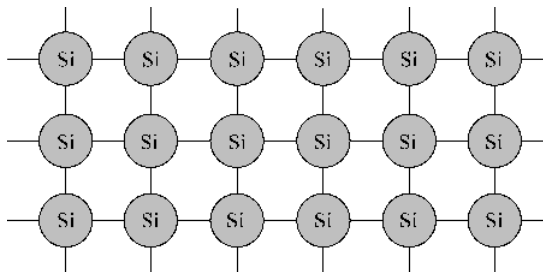


图 1.2 硅晶格的二维简易图

理论上包括碳、硅、锗、锡、铅在内的任何Ⅳ族元素都可以形成相似的大分子晶体^①。碳以金刚石的形式显示了Ⅳ族元素最牢固的连接。金刚石正是以它的坚硬而闻名。硅和锗的共价键相对弱一些,因为在价电子和原子核之间多了一层电子。锡和铅因为存在多层的内层电子,所以链接很弱,它们通常以金属键而非共价键形成晶体分子。Ⅳ族元素中,只有硅和锗呈中等程度的链接强度,因此它们是真正的半导体,而碳是非金属,锡和铅都是金属。

1.1.1 产生与复合

Ⅳ族元素的导电性随着原子数的增加而增加。金刚石形式的碳是典型的绝缘体。硅和锗的导电性要强很多,不过仍然比锡和铅这样的金属差很多。因为它们中等的导电性,硅和锗被归为半导体。

导电性意味着自由电子的存在。半导体中至少有一部分价电子必须挣脱晶格的束缚才能参与导电。实验中的确在纯硅和锗中发现了虽然很少但其浓度是可测量到的自由电子。这些自由电子暗示了半导体需要某种能量去打破共价键这样一种机理。热力学的统计性原理表明,这样的能量来源于与晶格碰撞的无规则热运动。尽管一个电子的平均热能相当小

^① Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ和Ⅵ族元素位于元素周期表的第Ⅲ-B,Ⅳ-B,Ⅴ-B和Ⅵ-B列。Ⅱ族元素既可能位于Ⅱ-A列,也可能位于Ⅱ-B列。关于字母A和B的定义有点历史趣闻,国际纯化学与应用化学联合会(IUPAC)已经取消了对A和B的区分定义。参见 J. Hudson, *The History of Chemistry* (New York: Chapman and Hall, 1992), p. 122-137。

(小于 0.1eV),但根据能量随机分布性质,会有一些电子的能量很大。使晶格中的一个价电子变成自由电子所需要的能量叫做带隙能量。一个有着很强共价键和很大带隙能量的材料几乎不含有自由电子。带隙能量弱的材料则会含有较多的自由电子,因此有较强的导电性(见表 1.1)^①。

表 1.1 第Ⅳ组元素的特性

元 素	原 子 数	熔点/℃	导电性/ Ωcm^{-1}	带隙能量/eV
碳				
金刚石	6	3550	$\sim 10^{-16}$	5.2
硅	14	1410	4×10^{-6}	1.1
锗	32	937	0.02	0.7
白锡	50	232	9×10^4	0.1

一个电子一旦离开晶格后就会产生空缺。一个原本最外层充满的原子现在缺少一个价电子,因此带一个单位的正电荷,如图 1.3 所示。这个离子可以从邻近的原子那里获得一个电子从而使最外层重新充满。因为它仍然和其他三个原子共享电子,因此这一点很容易实现。不过空缺并没有消失,它只是移动到了相邻的原子那里。随着空缺从一个原子转移到下一个原子,它在晶格间就移动起来。这种移动的电子空缺称为空穴(hole)。

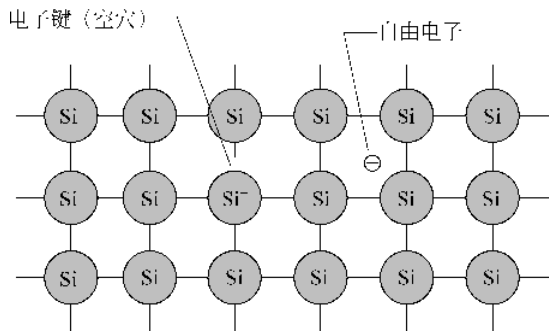


图 1.3 本征硅的热电子生成简图

假设晶体置于电场中。带负电荷的自由电子往晶体正极方向移动,而空穴就好像带正电荷的粒子往晶体负极方向移动。空穴的移动可以比作液体中的气泡,气泡是缺少液体的一块区域,而空穴则是缺少价电子的一块区域。气泡向上移动是由于它周围的液体在向下沉降。空穴向晶体的负极方向移动则是由于它周围的电子在向正极方向移动。

^① Si,Ge的带隙能量: B. G. Streetman, *Solid State Electronic Devices*, 2nd ed. (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1980), p. 443。C的带隙: N. B. Hannay, ed., *Semiconductors* (New York: Reinhold Publishing, 1959), p. 52。Sn的导电性: R. C. Weast, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 62nd ed. (Boca Raton, FL: CRC Press, 1981), p. F135-F136。熔点: Weast, p. B4-B48。

空穴一般被当作实际的微粒对待。空穴向晶体负极的移动被假设成空穴带正电荷。类似地,它们在晶体中的移动速度用一个叫做迁移率(mobility)的参数来衡量。空穴的迁移率比电子慢,在硅中的典型值为 $480\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$,而电子为 $1350\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ ^①。空穴的低迁移率使得它们载流能力差。一个器件的性能依赖于它的载流子是电子还是空穴。

当价电子在晶格中移动的时候,便产生了自由电子和空穴。这两种粒子都带电并在电场的作用下移动。电子向正极移动形成电子电流。空穴向负极移动,形成空穴电流。总电流等于电子电流和空穴电流之和。空穴和电子都称为载流子,因为它们的角色都是载运电荷。

载流子通常成对产生,因为价电子从晶格中移动出来的同时产生空穴。当晶格吸收能量时,便会产生电子-空穴对。诸如发光、核辐射、电子碰撞、快速热传递、机械摩擦以及其他的一些热运动都会产生载流子。仅举一例,波长足够短的光可产生电子-空穴对。当晶格中的一个原子吸收了一个光子,所产生的能量交换可以打开一个共价键时,就会产生一个自由电子和一个空穴。只有当光子有足够的能量去打开共价键的时候,光学生成电子空穴对现象才会发生,因此要求光有足够短的波长。在绝大部分半导体中,可见光已有足够的能量产生电子空穴对。太阳能电池正是利用这种现象把光能转化为电流。光电池和固态照相机探测器也用到了光学生成。

因为载流子成对产生,它们同样成对复合。半导体的特性决定了载流子复合的机制。在直接带隙半导体中复合现象特别简单。当电子遇到空穴时,电子进入空穴内从而修复破损的共价键。电子拥有的能量以光子的形式辐射出来(见图 1.4A)。如果有适当的激发,直接带隙半导体可以发光。发光二极管就是通过电子空穴对的复合发光的。发光二极管产生光的颜色由产生光的半导体的带隙能量决定。类似地,用于制造夜光器和塑料的所谓发光器涂层中也含有直接带隙半导体。当发光器涂层曝光时便产生电子空穴对,在发光器涂层中通常积累了大量的电子和空穴。这些载流子不断复合便发出了光。

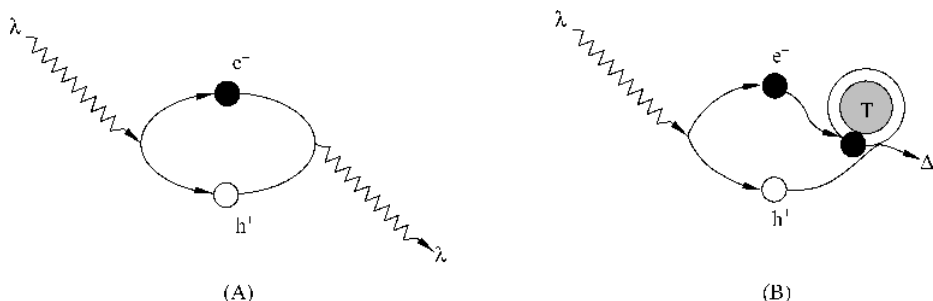


图 1.4 复合过程的示意图

(A) 直接复合(光子 λ 产生空穴 H^+ 和电子 e^- , 两者复合产生光子 λ)

(B) 间接复合(陷阱捕获载流子, 产生复合释放出能量 Δ)

① Streetman, p. 443.

硅和锗是间接带隙半导体。在这些半导体中,电子和空穴的相遇不会产生载流子的复合。电子可能会进入空穴中,不过量子效应阻止了光子的产生。因为电子不能携带过多的能量,因此它很快又会从晶格中跳出,电子空穴对便重新产生。在间接带隙半导体中,复合只在晶格的特定地方发生,这些地方叫做陷阱,这里有裂缝或者其他原子使晶格产生了扭曲(见图 1.4B)。一个陷阱可以瞬间捕获一个经过的载流子。被捕获的载流子变得容易复合,因为陷阱吸收了多余的能量。

帮助载流子进行复合的陷阱叫做复合中心。一个半导体包含的复合中心越多,载流子的产生与复合的平均时间越短。这个叫作载流子寿命的量限制了半导体器件开关的速度。有时半导体中故意加入复合中心来加快半导体的开关速度。金原子会在硅中产生高效的复合中心,因此以硅做成的高速二极管和晶体管中有时含有少量的金。金不是形成复合中心的唯一物质,许多过渡金属如铁和镍都有同样的作用。一些晶体缺陷同样可以用作复合中心,一些纯的单晶物质必须经过加工才能做成满足一定电特性的固态器件。

1.1.2 非本征半导体

半导体的导电性由其纯度决定。完全纯的或本征半导体导电性较弱,因为它们只产生很少的热载流子。适当的掺杂可大大增加可用载流子的数目。这些掺杂(或非本征)半导体的导电性可接近于金属。轻非本征半导体只含有十亿分之几掺杂物。受硅固态可溶度的限制,即使高掺杂的半导体也只含有百万分之几百的掺杂物。半导体对出现杂质的高敏感度使得人们几乎不可能生产出本征半导体。因此实际的半导体器件几乎毫无例外地都是用非本征材料制作出来的。

非本征半导体的一个例子便是在晶体硅加入少量的磷变成掺磷硅。磷原子进入晶格中原本由硅原子占据的位子(见图 1.5)。磷作为 V 族元素,有五个价电子。磷原子与周围的四个原子共享其中的四个价电子,四个共享电子对使磷原子有八个共享电子。加上一个未共享的电子,使得磷原子有了九个外层电子。因为八个电子已填满了最外层,第九个已没有存在的空间。这个电子被磷原子释放,并从晶格中获得自由。这样硅中加入的每一个磷原子都产生一个自由电子。

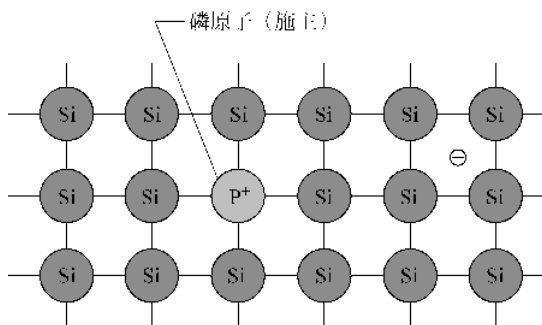


图 1.5 磷掺杂的硅晶格结构示意图

磷原子由于失去了第九个电子而带一个单位正电荷。尽管原子变成了离子,但并没有产生空穴。电子从充满的电子层中离开才产生空穴。虽然带正电但磷原子最外层是满的,因此,磷原子带的离子电荷不能移动。

其他V族元素和磷有同样的作用。每一个V族元素的原子加入晶格都会产生一个自由电子。向半导体贡献电子的元素因此叫做施主。砷,锑都是作为硅的施主用于半导体中。

一个掺入了大量施主杂质的半导体以在数量上占优势的电子作为载流子。热运动产生的少量空穴仍然存在,不过因为多余电子的存在,空穴会消失。随着多余电子的增加,空穴捕获电子完成复合的概率增加。N型硅中大量的自由电子显著地增强了它的导电性(显著降低了电阻)。

掺杂了施主元素的半导体叫做N型半导体。重掺杂的N型硅有时被记做 N^+ ,轻掺杂的N型硅有时被记做 N^- 。加号和减号指示了施主的相对数目,不是电的极性。由于电子的数目众多,被称为是N型硅中的多数载流子。类似地,空穴被看作是N型硅中的少数载流子。严格地说,本征硅既没有多数载流子也没有少数载流子,因为两者数目相等。

当少量的硼原子加入硅晶格后(见图1.6),掺硼的硅就形成另一种类型的非本征半导体。Ⅲ族元素硼有三个价电子。一个硼原子力图与周围的四个原子共用价电子。不过因为它只有三个价电子,无法形成第四个键,因此硼原子周围只有七个价电子,这个电子空缺就形成了一个空穴。这个空穴可以移动,离开硼原子。该空穴一旦离开,硼原子便因为最外层多了一个额外的电子而带一个单位负电荷。与磷的情况一样,这个电荷不能移动,因此不能用于导电。加入硅的每一个硼原子产生一个可移动的空穴。

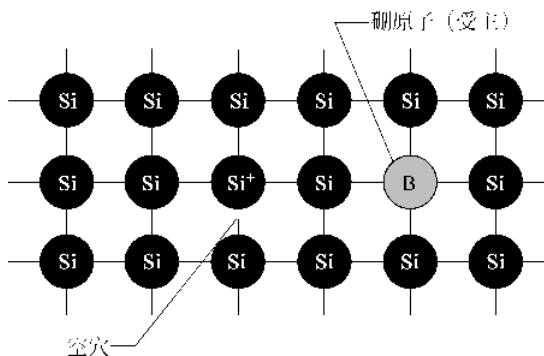


图1.6 硼掺杂的硅晶格结构示意图

其他Ⅲ族的元素同样可以接受电子而产生空穴。技术上的难度阻碍了其他Ⅲ族元素对硅的掺杂,倒是有时用镉来对锗掺杂。任何Ⅲ族元素作为杂质将接受周围原子的电子,因此这些元素叫做受主。掺杂受主的半导体称为P型半导体,重掺杂的P型硅有时记为 P^+ ,轻掺杂的P型硅记为 P^- 。在P型硅中,空穴是多数载流子而电子是少数载流子。表1.2列举出描述非本征半导体的一些术语。

表 1.2 非本征半导体的术语

半导体类型	掺杂剂类型	硅的典型掺杂剂	多数载流子	少数载流子
N 型	施主	磷、砷和锑	电子	空穴
P 型	受主	硼	空穴	电子

一个半导体可以既掺杂受主又掺杂施主。两种杂质哪一种多,就决定硅的类型和载流子的浓度。类似的,加入受主杂质还可以将一个 N 型硅转化为 P 型硅。故意加入相反极性的杂质去改变半导体类型的过程叫做反掺杂。众多新型的半导体都是通过对硅有选择地进行反掺杂来形成 P 型或 N 型的区域。下一章将更多介绍这方面的实例。

如果反掺杂达到极限,整个晶格中受主原子和施主原子的比率将相同。晶体将几乎没有自由载流子而变成本征半导体。这样合成的半导体的确存在,最熟悉的例子是砷化镓,它由镓(Ⅲ族元素)和砷(Ⅴ族元素)组成。这种类型的物质被叫做Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体。它们不仅包括砷化镓,还有磷化镓、锑化铟等。许多Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体都是直接带隙半导体,用于制造发光二极管和半导体激光器。砷化镓在一定范围内也用于制造包括集成电路在内的超高速固态器件。Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体由等量的第Ⅱ族元素和第Ⅵ族元素化合而成。硫化镉是一种用于制造光敏元件的典型的Ⅱ-Ⅵ族化合物。其他Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体用作阴极射线管中的荧光物。最后一类半导体包括Ⅳ-Ⅳ族化合物,例如最近小规模用于制造蓝色发光二极管的碳化硅。

所有半导体中,只有硅满足集成电路要求的高产量、低成本的物理特性。因此,绝大多数固态器件都是由硅制成的。而其他的半导体都转入小范围的市场。因此本书的其他部分主要着眼于硅集成电路。

1.1.3 扩散与漂移

载流子在硅晶格中的运动取决于扩散与漂移两种不同的过程:扩散是一种随时随地发生的载流子的随机运动,而漂移是载流子在电场影响下发生的单向运动。这两个过程都有助于半导体的导电性。

扩散和布朗运动极为类似,即单个的载流子在半导体中运动直到与晶格中的原子产生碰撞为止。碰撞过程将载流子散射到各个无法预测的角度,经过一系列碰撞,载流子的运动变得完全随机。载流子漫无目的的运动就像醉汉走路留下的轨迹一样(见图 1.7A)。

载流子在半导体中的扩散和染色分子在静水中的扩散过程相类似。一滴染色液体滴入水中后,最初染色分子占据少量的液体空间,渐渐的染色分子从高浓度空间扩散到低浓度空间,最终颜色在溶液中分布均匀。类似地,载流子在不同浓度之间的扩散产生扩散电流。

除非不断地加入更多的载流子,否则扩散最终使得硅中的载流子分布均匀,扩散电流消失。

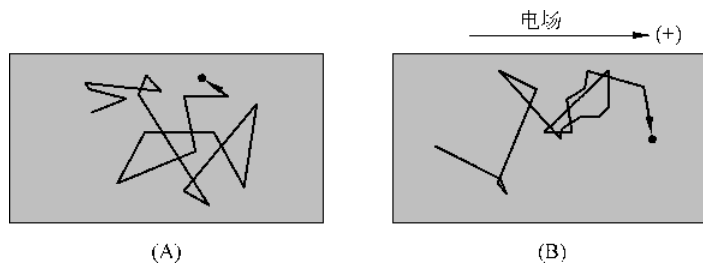


图 1.7 电子的导电机理比较

扩散(A)和与扩散叠加的漂移(B),注意电子向正电势方向逐渐移动

载流子在电场影响下的运动叫做漂移。尽管载流子仍然和晶格碰撞,做醉汉走路似的无规则运动,但渐渐地向一个特定的方向漂移(见图 1.7B)。这种趋向是由电场的存在而引起的。无论载流子向哪个方向运动,电场对它的作用都丝毫没有减弱。如果载流子向着与电场相反的方向运动,它的运动被阻碍;当它顺着电场运动时,它的运动就会加速。频繁地碰撞阻碍了载流子以固定的加速度加速,不过还是出现了整体的运动趋势。电子向正极方向移动,尽管是缓慢的和不安定的。同样的,空穴向负极方向移动。漂移与弹球机器中的钢球的运动类似。尽管桩或碰撞物会使球转向任何其他的方向,但倾斜的板仍然使它最终向下运动。同样,电场使得载流子向着一个固定的方向移动,产生漂移电流。

1.2 PN 结

均匀掺杂的半导体几乎没有实用价值,所以几乎所有的固态器件都含有多个 P 型或 N 型的区域。P 型区域和 N 型区域的界面叫做 PN 结或简称“结”。

图 1.8A 是两段硅片的示意图。左边是一个 P 型硅棒,右边是一个 N 型硅棒,因为两者没有连接在一起,因此不存在结。每一段硅中载流子都是均匀分布的。P 型硅有大量的空穴和少量的电子, N 型硅有大量的电子和少量的空穴。

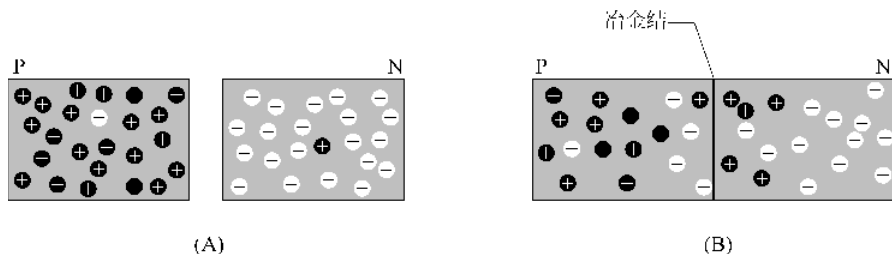


图 1.8 在 PN 结形成前(A)和形成后(B)硅中的载流子分布

现在假设两段硅相互接触形成一个结,载流子可在其中不受障碍地移动。P型硅中的空穴数量大大富余,而N型硅中的电子数量大大富余。一些空穴就从P型硅扩散到N型硅中,同样一些电子从N型硅扩散到P型硅中。图1.8B示出了这一结果。在两个方向上都有一些载流子越过结扩散到另一边。结的每一边少数载流子的浓度都比仅仅掺杂时高。由于越过结的扩散而多出的少数载流子数量称为富余少数载流子浓度。

1.2.1 耗尽区

结的两边出现的富余少数载流子会产生两个作用:首先,载流子产生电场。N型硅中额外的空穴显示正极性,P型硅中额外的电子显示负极性。这样便形成了一个跨越PN结的内在的电场,结的N侧相对于P侧呈正极性。

当载流子穿过结进行扩散的时候,留下了相等数量的杂质离子。这些离子固定在晶格中无法移动。结的P侧留下了带负电的受主杂质离子,结的N侧留下了带正电的施主杂质离子。这样也形成一个N侧相对于P侧为正的电势。这个电势叠加在由于带电载流子分离而形成的电势之上。

由于电场的出现,载流子趋向于产生漂移。空穴受到结的P侧的负极的吸引,同样电子受到结的N侧的正极的吸引。因此载流子的漂移与扩散方向相反。空穴的扩散从结的P侧到N侧,而漂移则相反。电子的扩散从结的N侧到P侧,而漂移则相反。当漂移电流和扩散电流大小相等方向相反时达到平衡。结的两侧的富余少数载流子浓度亦达到平衡值,结的两侧产生一个电位差。

达到平衡时PN结两侧的电压差叫做内建电位差或接触电位差。在一个典型的硅PN结中,内建电位差的范围可以从零点几伏到一伏。重掺杂结的内建电位差比轻掺杂结大。因为掺杂越重,就有越多的载流子通过重掺杂结扩散,因此流过的扩散电流就更大。为了重新达到平衡,需要的漂移电流就更大,因此形成的电场更大。因此重掺杂结的内建电位差比轻掺杂结大。

虽然内建电位差真真实实的存在,不过不能用电压表去测量它。这种现象可以通过对一个含有PN结和电压表的电路进行仔细的分析来解释(见图1.9)。电压表的两个探针由金属制成而不是硅。金属探针和硅的接触点同样形成结,每个结都有一个自己的接触电位差,因为两个探针下面的硅有不同的掺杂程度,因此两个接触点的接触电位差不相等。两个接触电位差的不同正好抵消了PN结的内建电位差,没有电流流进外部电路。这种情况必然会发生,因为任何电流的流动将产生一个自发的能源或某种形式的永动机,而内建电位差的抵消作用保证了能量不可能从平衡的PN结中产生,因此不会与热力学定律相抵触。

内建电位差有两个产生原因:杂质原子形成的离子的分离和带电载流子的分离。载流子可自由移动,但杂质原子被固定在晶格中。如果杂质原子可以移动,它们将被异性电荷所吸引。因为它们被固定在晶格中,因此仍然是分离的。被这些带电原子占据的区域形成一

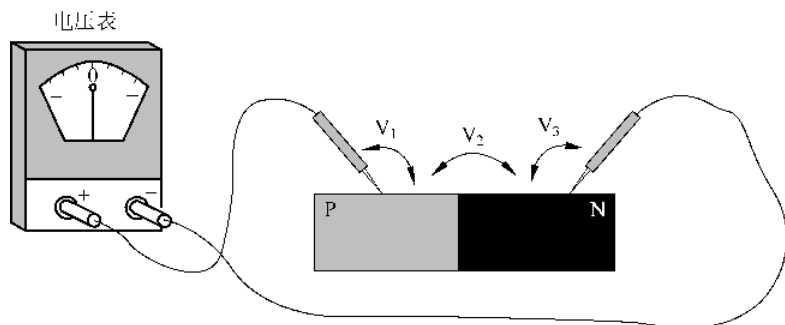


图 1.9 证明直接测量内建电势的不可能性。接触电动势 V_1 和 V_3 完全抵消了内建电势 V_2 。

个很强的电场。进入这个区域的载流子必将快速移动,否则将重新被电场甩出。因此在任何一个给定的瞬间内,这个区域中几乎没有载流子。因为带电杂质原子的出现,这个区域有时被叫做空间电荷区。通常,因为这里载流子的浓度相对较低,又被叫做耗尽层。

如果耗尽层几乎不含载流子,那么多余的少数载流子(少子)必然堆积在它的两侧。图 1.10 示出了多余的少数载流子的分布结果。浓度差导致了载流子穿过结扩散到电中性区域内。因为带电载流子分离而产生的电场把它们向着结的方向吸引。随即建立起平衡,导致了类似于图 1.10 的少数载流子浓度的稳定分布。

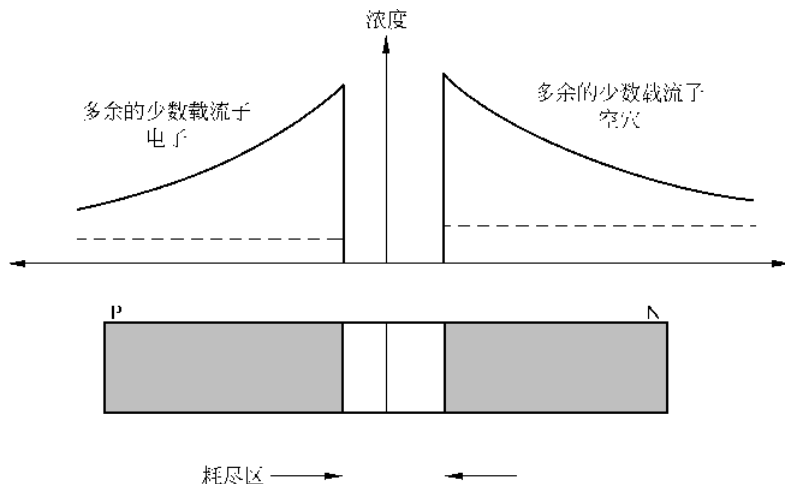


图 1.10 平衡时 PN 结两侧的多余少数载流子分布

PN 结的特性总结如下:载流子越过结扩散,在耗尽区两边产生富余少数载流子浓度。杂质原子的离子的分离在耗尽区内产生电场。这个电场阻止大多数的多数载流子穿越耗尽区,少数穿越的最终也被电场拉到另一端。

耗尽区的厚度由结两边的掺杂程度决定。如果两边都是轻掺杂,为了产生足够的内建

电位差,将要使足够的杂质原子分离,因此被耗尽的硅层较厚。如果两边都是重掺杂,那么只需很薄的耗尽区就能产生所需的电荷。因此重掺杂结的耗尽区薄而轻掺杂结的耗尽区厚。如果结的一侧掺杂比另一侧重,那么轻掺杂一侧的耗尽区将更深。这种情况下,轻掺杂硅必须有足够的厚度被耗尽来产生足够的杂质离子。重掺杂硅只需薄薄一层被耗尽就可产生所需电荷。图 1.10 示出了结的 N 侧掺杂远远轻于 P 侧的情况。

1.2.2 PN 二极管

一个由 PN 结形成的非常有用的固态器件叫做二极管。图 1.11 是一个 PN 二极管结构的简单示意图。二极管正如它的名字一样,有两个端点。与结的 P 端相连的叫阳极,与结的 N 端相连的叫阴极。这两个端点用于将二极管连接在电路中。二极管的标志由一个标志着阳极的箭头和一个标志着阴极的直线组成。二极管只沿着箭头指示的方向传输电流。

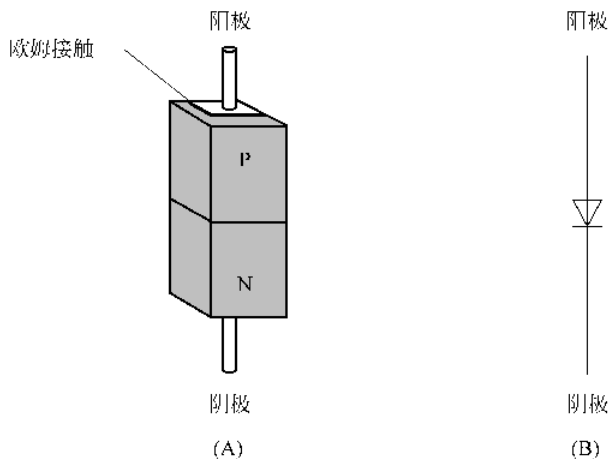


图 1.11 PN 二极管简单结构(A)和标准电路符号(B)

为了阐释二极管是如何工作的,假设它两端跨接一个可调电压源。如果电压源设为零伏,二极管为零偏置。一个零偏置的二极管将没有电流流过。如果电压源设置成使二极管的阳极相对阴极为负,二极管反向偏置,几乎没有电流会流过反向偏置的二极管。如果电压源设置成使二极管的阳极相对阴极为正,二极管正向偏置,流过的电流很大。记忆起来很简单:电流顺着而不是逆着箭头流动。只能单向传导电流的器件叫做整流器,它们在电源、无线电接收和信号处理的电路中经常会用到。

二极管的整流作用依赖于结的存在。三种偏置状态均可通过载流子穿过结的流动而得到合理的解释。零偏置二极管和刚刚讨论过的结平衡的情形完全一致。加在结两端的电势只有内建电势。二极管接入电路中时,接触硅的导线的接触电势平衡掉了结的内建电势,因此没有电流流过电路。

二极管反向偏置的行为可以简单地解释如下：反向偏置电压使得结的 N 侧相对于 P 侧为正，结两侧的视在电压增加，因此结两边富余少数载流子继续被拉回，多数载流子继续保持在自己这一侧；结两侧电压的增加导致更多的杂质原子电离，因此耗尽区的宽度随着反向偏置电压的增加而增加。

正向偏置结的工作特性要复杂一些。两端点间加的电压与内建电势方向相反。结两侧的电压因此削减了耗尽区的厚度。同时，由电场引起的漂移电流也减小了。越来越多的多数载流子穿过耗尽区而不是被电场拉回。图 1.12 画出了全部载流子的流动情况：空穴从结的阳极移动到阴极（从左至右），电子从结的阴极移动到阳极（从右至左）。图示二极管中，流过结的空穴电流大于电子电流，因为结的阳极比阴极掺杂重，因此阳极可用的多数载流子空穴比阴极可用的多数载流子电子要多。一旦这些载流子穿越结到了另一端，它们将变成少数载流子，与多数载流子产生复合。电流从端点流入来补充中性硅中的多数载流子。这个图只是一个描绘载流子通过二极管的大致流动情况的简单示意图。一些趋向于穿越结的载流子在复合前被电场拉回，这些载流子不能算进流过二极管的静电流之列，因此没有画出。同样，极少数因为热运动而产生的少数载流子穿过结亦形成电流，但这些电流在一个正向偏置二极管的总电流当中微不足道，因此也没有画出。

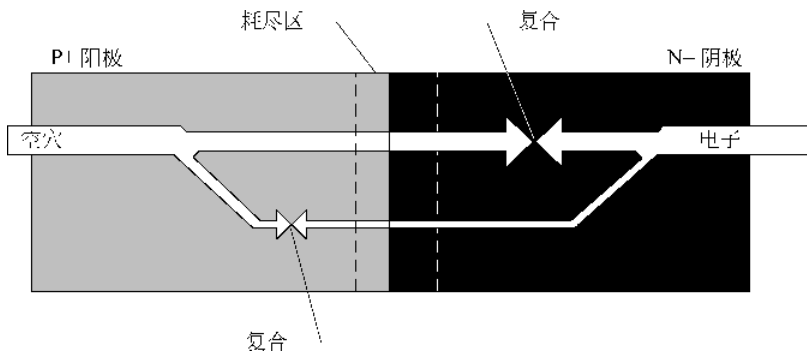


图 1.12 正向偏置 PN 结载流子流动示意图

流过正向偏置二极管的电流与施加的电压呈指数型关系（见图 1.13），室温下，0.6V 就足以使一个 PN 结型的硅二极管正向导通^①。因为扩散由载流子的热运动引起，扩散电流随着温度增加呈指数上升。换一种表达方式，维持硅 PN 结上稳定的电流所需的正向偏置电压的下降速度大约为 $2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

图 1.13 中同样能够看出，当二极管反向偏置时，有一个很小的电流流过，这个电流叫做反向电流或漏电流，反向电流由硅中极少数的少数载流子热运动产生。反向偏置的结上，电

^① 最常采用的值是 0.7V，实际上 25°C 时一个典型集成电路中的 BE 结在微安级偏置下的结电压更接近 0.6V，而不是 0.7V。

场方向和多数载流子方向相反,不过它有助于少数载流子的移动。反向偏置电压帮助少数载流子越过结。因为硅中少数载流子的产生速度独立于电场,所以反向偏置电流不会随着反向偏置电压的变化有多大变化,热运动随着温度的增加而更活跃,因此反向偏置电流是随温度而变化的。在硅中,大约每升高摄氏八度,反向偏置电流增加一倍。温度很高时,反向偏置电流开始接近电路的工作电流。因此半导体器件的最高工作温度受击穿电流的限制。硅集成电路中广泛接受的最高结温度为 150°C ①。

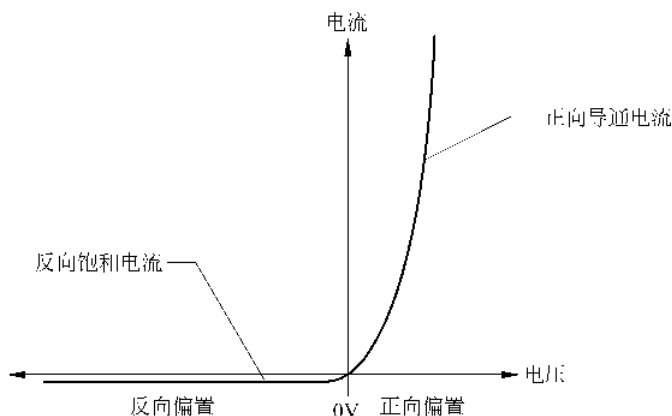


图 1.13 二极管导电特性反向偏置时饱和电流在 25°C 时约为几个皮安

1.2.3 肖特基二极管

半导体和金属间同样可以形成结,这种结叫做肖特基势垒。肖特基势垒的特性在某种程度上和 PN 结类似。例如,肖特基势垒可以用于形成和 PN 二极管很类似的肖特基二极管。在集成电路内部的互连系统的接触区也会形成肖特基势垒。

一种材料的功函数等于使一个电子从材料逸出所需的能量。因为晶格的特性和组成不同,不同的材料有自己特定的功函数。当两个具有不同功函数的材料接触时,它们当中电子的初始能量不同,因此两种材料之间产生一种叫做接触电势的电压差。现在来考察 PN 结的情况,结两边的半导体有同样的晶格结构。PN 结的接触电压或内建电压只与掺杂有关。但在肖特基势垒中,金属和半导体不同的晶格结构也影响到接触电势。当金属铝接触到轻掺杂的 N 型硅时,形成一个典型的整流肖特基势垒(见图 1.14B)。载流子必须重新分配来平衡接触电势。电子从半导体扩散到金属,在这里聚积形成一个负电荷薄层。电子从硅中

① 集成电路可以设计工作在 200°C 下,但不为大多标准设计准则所采纳。参见 R. J. Widlar, M. Yamatake, "Dynamic Safe-Area Protection for Power Transistors Employs Peak-Temperature Limiting," *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-22, # 1, 1987, p. 77-84。

大批移出后,留下大量由掺杂原子的离子形成的耗尽区(见图 1.14A)。耗尽区形成把电子从金属中拉回的电场。当漂移电流和扩散电流相等时达到平衡。此时肖特基势垒两端的电位差和接触电势相等。肖特基势垒的半导体一侧几乎不存在少数载流子,因此肖特基二极管叫做多数载流子器件。

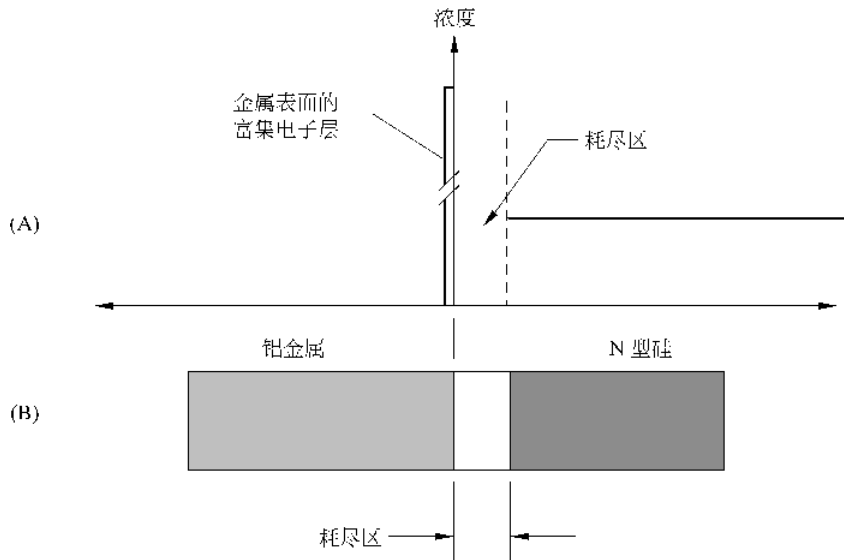


图 1.14 肖特基势垒两侧的剩余电子分布(A)和肖特基结构的截面示意图(B)

对肖特基二极管加偏置时的工作情况可做类似的分析。N 型硅形成二极管的阴极,金属段则形成阳极。零偏置的肖特基二极管和上面分析过的平衡肖特基势垒的情况是完全一致的。一个反向偏置的肖特基二极管所施加的外部电压使得半导体一侧相对于金属一侧为正。因此,这个电压叠加在接触电势上。为了平衡这个增加的电压,耗尽区变宽,建立起新的平衡,几乎没有电流流过二极管。

一个正向偏置的肖特基二极管所连接的外部电压使得金属相对于半导体一侧为正。结两侧产生的电压与接触电势相反。耗尽区宽度减小。最终会完全抵消接触电势,并力图在结的金属一侧形成一个耗尽区。但作为导体的金属中不可能产生电场,因此不可能形成与外加电压相反的耗尽区,于是这个电压就将电子通过结从半导体扫向金属,形成流过二极管的电流。

肖特基二极管的电压-电流特性与 PN 二极管(如图 1.13 所示)类似。肖特基二极管同样有由于微量的少数载流子从金属注入半导体而产生的电流泄漏。这种传导特性随着温度的升高而加速,其温度特性也和 PN 二极管类似。

尽管有很多相似之处,肖特基二极管和 PN 二极管之间仍然有一些基本的差别。肖特基二极管是多数载流子器件,因为它依靠多数载流子导电。电流密度很高时确实有一小部分空穴从金属流向半导体,不过这只占总电流的极小一部分。肖特基二极管不支持大量的

多余少数载流子。因为二极管的开关速度是多余的少数载流子复合所需要的时间的函数，因此肖特基二极管的开关速度极快。某些肖特基二极管还具有比 PN 二极管低正向偏置电压。低正向偏置电压和快的开关速度使得肖特基二极管成为一种非常有用的器件。

肖特基二极管同样可由 P 型硅制成，不过导通电压相当低，这意味着 P 型肖特基二极管相当敏感，因此极少使用^①。常见的肖特基二极管由轻掺杂的 N 型硅和一类叫做硅化物的材料组成。这种物质由硅和某种金属合成，例如铂和钼。硅化物有非常稳定的工作特性，因此肖特基二极管也有很好的一致性和可重复制造性。

1.2.4 齐纳二极管

正常情况下，只有很小的电流流过一个反向偏置的 PN 结，这个电流将稳定存在直到偏置电压超过一个使 PN 结电流突然变得很大的临界电压（见图 1.15）。这种反向传导的突变现象叫做反向击穿。如果不加外部措施对电流加以限制，器件将被损坏。反向击穿通常决定了固态器件的最大工作电压。不过，如果采取有效的措施限制电流，一个反向击穿的二极管可提供一个相当稳定的参考电压。

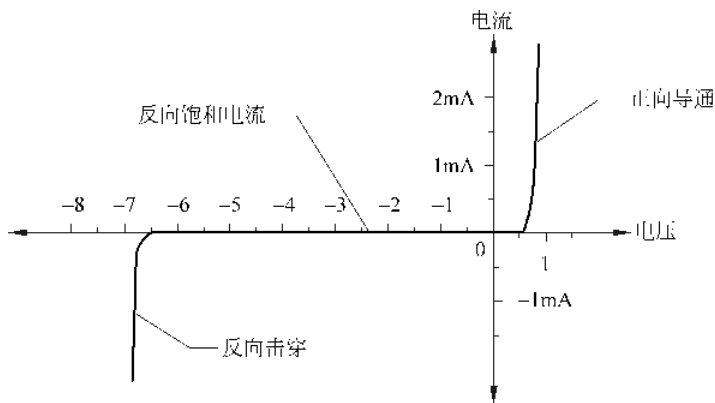


图 1.15 PN 二极管反向击穿

一种导致反向击穿的机制叫做雪崩倍增。考虑一个反向偏置的 PN 结。耗尽区的宽度随着偏置的增大而增大，不过增大的程度不足以遏止电场的增强。这样，增强的电场会加速少数载流子以极快的速度穿越耗尽区。当这些载流子碰撞晶格原子时，会撞开结合不牢的价电子，从而产生新的载流子。因为一个载流子通过撞击可以产生成千新的载流子，就好像一个雪球可以产生雪崩一样，这个过程就以雪崩命名。

^① 例如，R. S. Muller 和 T. I. Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, 2nd ed. (New York: John Wiley and Sons, 1986), p. 157 中比较了 N 型硅(0.85V)和 P 型硅(0.25V)分别与铂形成二极管时功函数的差别。

另一种导致反向击穿的机制叫做隧穿。隧穿是一种量子力学过程,它允许粒子尽管有障碍存在仍能进行短距离移动。如果耗尽区足够薄,载流子将通过隧穿穿越它。隧穿电流受耗尽区宽度和结两端的电压差的影响很大。由隧穿引起的反向击穿叫做齐纳击穿。

结的反向击穿电压依赖于耗尽区的宽度。宽的耗尽区产生高的反向击穿电压。如前所述,结的轻掺杂一侧决定了耗尽区的宽度和反向击穿电压。如果反向击穿电压小于 5V,耗尽区很薄,则容易发生齐纳击穿;如果击穿电压大于 5V,则容易发生雪崩击穿。用于反向导电的 PN 二极管叫齐纳二极管还是叫做雪崩二极管,则由哪一种现象容易发生而决定。齐纳二极管反向击穿电压小于 5V,雪崩二极管反向击穿电压大于 5V。工程上一般不管哪种现象容易发生都统称击穿二极管为齐纳二极管。这样可能会造成误解,因为一个 7V 的齐纳二极管一般工作于雪崩击穿状态。

实际上,结的反向击穿电压依赖于它的几何形状和掺杂浓度曲线。前面的讨论分析了由两种在一个平面上相联接的均匀掺杂的半导体区域组成的平面结。虽然一些实际的结接近于这种理想情况,但绝大部分边缘是弯的。这种弯曲使得电场增强,反向击穿电压降低。弯曲越小,反向击穿电压越低。这个作用对浅结的反向击穿电压影响明显。绝大多数肖特基二极管在硅-金属表面的边缘处有尖锐的不连续性。除非在肖特基势垒的边缘采取特别的措施释放电场,否则电场强度将显著降低测得的肖特基二极管的反向击穿电压。

图 1.16 画出了所有的上面讨论过的二极管的符号。PN 二极管用直线标明阴极端点,肖特基二极管和齐纳二极管则对阴极一侧的标识做了一点修正。所有的情况中,箭头指示的都是正向偏置情况下电流的流向。对齐纳二极管的箭头可能会产生一些误解,因为它一般都工作于反向偏置的情况。猛地一看,这个标志好像在标明:“这是个错误的方向。”

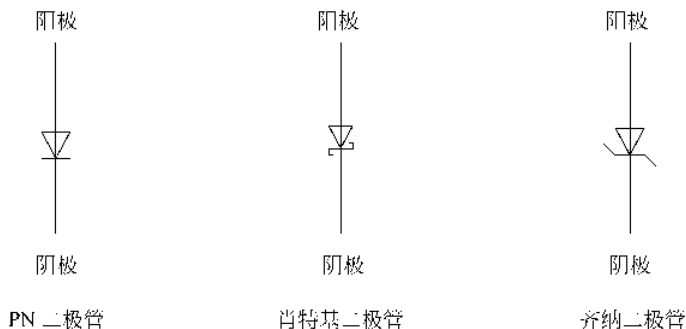


图 1.16 PN 结、肖特基和齐纳二极管的示意图,某些图示箭头为实心或半实心

1.2.5 欧姆接触

要把固态器件连接到电路中去,金属和半导体之间必然要有接触。理想情况下,这些接触是完全无阻导电的,而实际上它们是欧姆接触,总有一个很小的电阻存在。和整流接触不

同,欧姆接触在两个方向上传导电流的能力都很好。

如果半导体材料掺杂足够多,肖特基势垒可以呈现欧姆接触。高浓度的杂质原子使得耗尽区薄到只剩一个点,载流子很容易在这里隧穿它。和普通的齐纳二极管不同,欧姆接触支持非常低电压下的隧穿,不会发生整流现象,因为载流子可以通过隧穿有效地透过肖特基势垒。

如果肖特基势垒的接触电势产生表面积聚而不是表面耗尽,同样可以形成欧姆接触。在积聚中,半导体表面形成薄薄一层多数载流子层。N型半导体中,这一层由多余的电子组成。金属是导体,不能产生耗尽区,金属的表面因此带上电荷来平衡硅中积聚的载流子。势垒的两边没有耗尽区,使得接触没有了电压差,任何外加电压可以将载流子扫过结。载流子可以向任何一个方向流动,因此这种肖特基势垒产生欧姆接触而不是整流接触。

事实上,轻掺杂硅中产生整流接触而重掺杂硅中产生欧姆接触。欧姆接触的真正机制并不重要,因为所有的欧姆接触都呈现同一现象。只有当一薄层重掺杂的硅放在接触的下方,轻掺杂硅区域才会呈现欧姆接触。如果重掺杂硅层用于连接适当的金属系统,将获得小于 $50\Omega/\mu\text{m}^2$ 的接触电阻。这个电阻足够小,绝大多数情况下都可被忽略。

任何不同材料之间的结都会呈现一个接触电势,等于不同材料之间的功函数之差。这个惯例既适用于欧姆接触,也适用于 PN 结以及肖特基整流二极管。如果所有的接触和结保持同样的温度,则每一个闭合环接触电势的总和为零。但是,接触电势是温度的函数,如果一个结的温度不同于其他结,它的接触电势的变化将使得总的接触电势之和不再为零。这种热电效应在集成电路设计中有重要的意义。

图 1.17 画出的是一块 N 型硅,两侧和铝接触。如果加热硅块的一端,因为两个接触电势的失配,块两端将产生一个可观的电压。这个电压通常以 $0.1\sim 1.0\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的速度下降^①。许多集成电路允许的失配范围在 $(1\sim 2)\%V$ 之内,因此即使一个很小的温度差,也会导致电路故障。

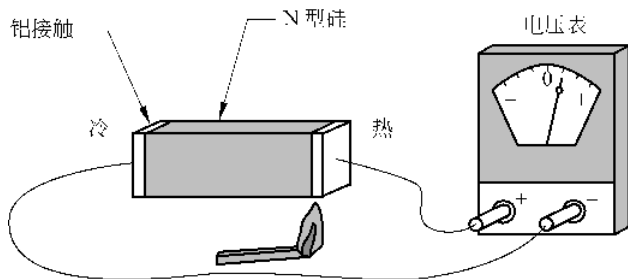


图 1.17 如果两个接触置于不同温度中,那么由于热电效应,将产生一个净的可测电压

① 轻掺杂硅表现出较高的 Seebeck(塞贝克)电压;这些值来自 Wildar 等人,p79。

1.3 双极结型晶体管

虽然二极管是很有用的器件,但它不能放大信号。几乎所有的电子线路都需要这样或那样的放大功能。一个可以放大信号的器件叫做双极型晶体管(BJT),图 1.18 画出了两种双极型晶体管的结构。每个晶体管都由三个半导体区域组成,分别叫做发射极、基极和集电极。基极通常夹在发射极和集电极之间。一个 NPN 晶体管由一个 N 型的发射极,一个 P 型的基极和一个 N 型的集电极组成。同样,一个 PNP 晶体管由一个 P 型的发射极,一个 N 型的基极和一个 P 型的集电极组成。在这个简单的连接中,晶体管的每一个区域由一段均匀掺杂的矩形硅条形成。现代的双极型结型晶体管尽管有一些不同的连接,不过基本工作原理是一样的。

图 1.18 同时画出了两种晶体管的符号。发射极上的箭头方向指示了基-射结正向偏置情况下电流的方向。集电极上没有箭头,尽管集电极和基极之间也存在一个结。图 1.18 所示简单的晶体管中,基-射之间的结和基-集之间的结是完全一样的。不考虑器件的工作形态,单从外观上,发射极和集电极完全可以调换。实际上,两个结的掺杂特性和几何形状决定了它们是不能调换的。发射极和集电极用有无箭头来区别。一个双极型结型晶体管可以看成两个背对背连接的 PN 结。晶体管的基区非常薄(大约 $1\sim 2\mu\text{m}$ 宽)。两个结放置的如此接近,以至于载流子可以在复合之前就从一个结扩散到另一个结。一个结的导电性因此影响到另一个结的性能。

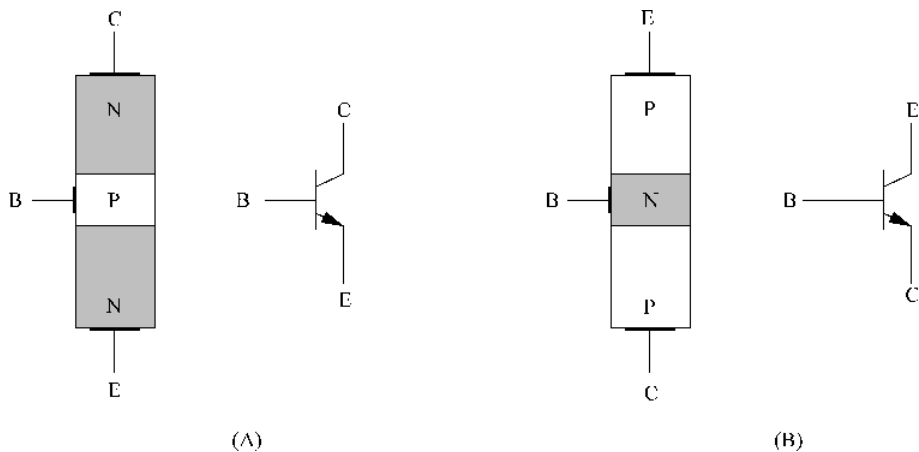


图 1.18 NPN 晶体管(A)和 PNP 晶体管(B)的结构和原理图符号

图 1.19A 画出了一个基-射结加 0V 电压,基-集结之间加 5V 电压时的 NPN 晶体管。因为没有一个是正向偏置的,所以,几乎没有电流流过晶体管的三个端点。两个结都反向偏置的晶体管叫做截止。图 1.19B 画出了向同样的晶体管的基极注入 $10\mu\text{A}$ 电流的情况。这个电流使得基-射结间产生 0.65V 的正向偏置电压。尽管基-集之间的结是反向偏置的,

但集电极电流比基极电流大一百倍。这是正向偏置的基-射结和反向偏置的基-集结相互作用的结果。当晶体管偏置在这种形态时,就叫做晶体管工作于正向放大区。如果发射极和集电极端点对调,即基-射结反向偏置而基集结正向偏置,晶体管工作于反向放大区。事实上,晶体管几乎不在这种形态下工作。

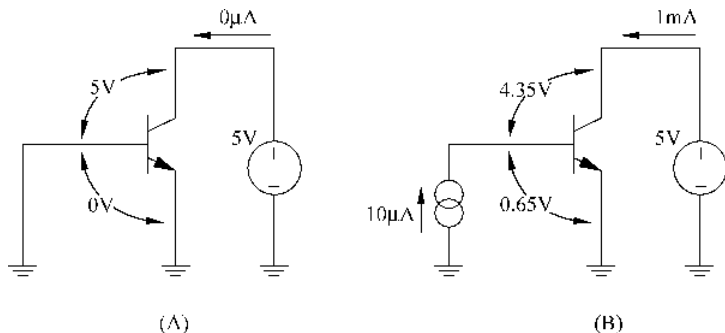


图 1.19 NPN 晶体管工作在截止区(A)和正向偏置放大区(B)

图 1.20 解释了为什么集电极电流可以流过一个反向偏置的结。绝大多数流过结的电流由重掺杂的发射极注入轻掺杂的基极的电子组成,因此它们掠过反向偏置的基-集结到达集电极。在这里它们重新成为多数载流子,流向集电极端线。集电极电流由从发射极流出、没有在基区复合而到达集电极的电子组成。由于基-集结反向偏置,所以只有极少数的多数载流子能从基极流入集电极。妨碍多数载流子流动的同一个电场有助于少数载流子的流动。基区中的少数载流子是电子,它们被这个电场扫过反向偏置的基-集结而进入集电极。在这里,这些电子再次成为多数载流子流向集电极引线端。集电极电流由这些成功完成从发射极到集电极而未在基极复合的电子构成。

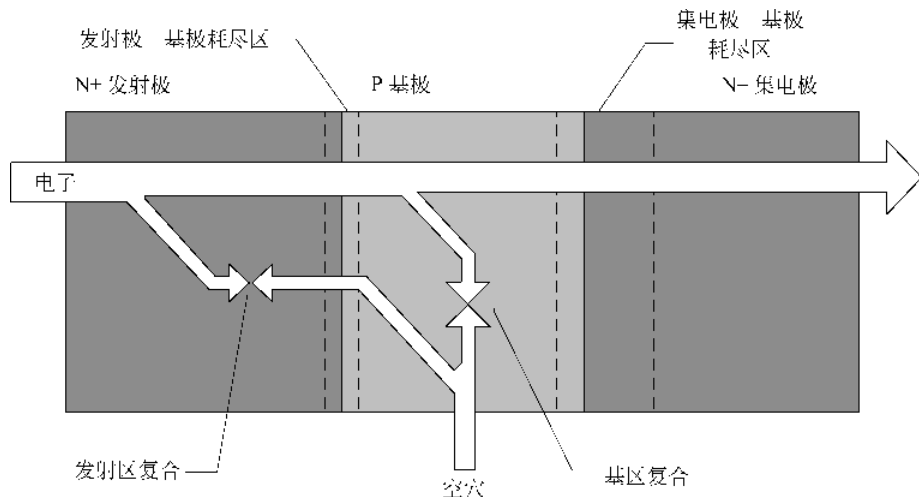


图 1.20 工作在正向偏置放大区的 NPN 晶体管电流示意图