

第3章

半导体二极管

本章首先介绍半导体的基础知识,介绍了半导体的一系列概念。随后讨论 PN 结,作为半导体器件的基础,着重讨论二极管的结构、工作原理、伏安(I - V)特性曲线和主要的参数,介绍二极管的等效电路模型和典型的应用电路,讨论二极管电路的分析方法。最后介绍两种特殊的二极管:齐纳二极管和发光二极管。

3.1 半导体基础知识

3.1.1 半导体材料

半导体材料的导电性能介于导体和绝缘体之间,当今的电子器件和集成电路都是基于高质量的半导体材料来构建的。半导体具有不同于导体或者绝缘体的特性,其导电性能会随着掺杂、温度和光照而发生显著的变化。为了理解半导体的这些特点,必须先了解半导体物理的基本知识。

3.1.2 本征半导体

1. 半导体的共价键结构

本征半导体是指纯净的、不含杂质且结构完整的半导体。在电子器件中,硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)是三种最常见的半导体,之所以选择这三种半导体材料,是有其特定的原因的。为了理解这一点,需要从其原子结构来分析。原子的基本组成部分包含了电子、质子和中子。在原子的晶体结构中,质子和中子形成了原子核,电子处于原子核周围的固定轨道上。图 3.1.1 给出了简化的 Si、Ge 和 GaAs 的玻尔模型。

如图 3.1.1 所示,Si 有 14 个轨道电子,Ge 有 32 个轨道电子,Ga 有 31 个轨道电子,As 有 33 个轨道电子。对于 Si 和 Ge 来说,在最外层轨道上都有 4 个电子,处于最外层的这 4 个电子称为价电子。对应的,Ga 有 3 个价电子,As 有 5 个价电子。有几个价电子,就称为

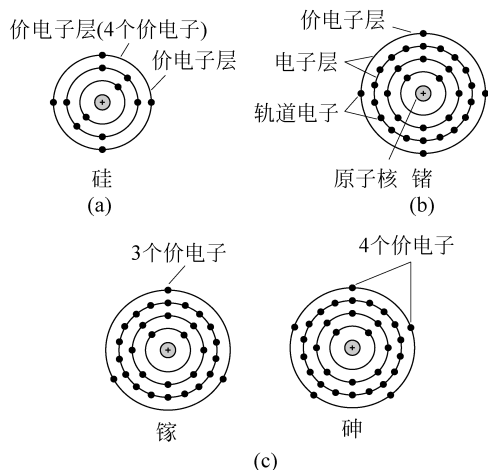


图 3.1.1 硅、锗和砷化镓的简化玻尔原子模型

几价元素。也就是说, Si 和 Ge 为 4 价元素, Ga 为 3 价元素, As 为 5 价元素。由于价电子处于最外层, 相对于其他的轨道电子, 其受到原子核的束缚力最小。

在纯净的 Si 或者 Ge 单质晶体中, 每个原子的 4 个价电子与 4 个相邻的原子以共价键连接, 形成有序的排列。如图 3.1.2 所示。图中显示的是二维结构, 实际上, 半导体晶体结构是三维的。

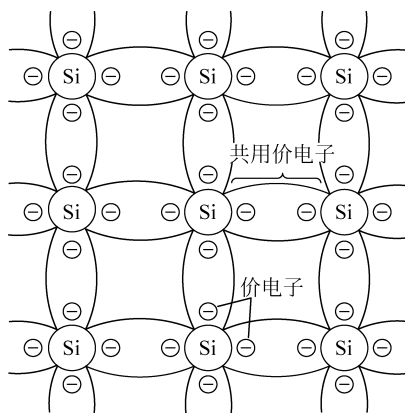


图 3.1.2 硅原子的共价键结构

GaAs 属于化合物半导体, 对于 GaAs 晶体, 由两种不同的原子共用外层电子形成共价键连接(图 3.1.3)。每个 Ga 原子都被 3 个 As 原子包围, 对应每个 As 原子周围被 5 个 Ga 原子包围。

由于硅材料在电子器件中使用最多, 我们以硅为例来讨论半导体的特性。实际上 Si、Ge 和 GaAs 具有类似的共价键结构, 可以很容易将硅的特性扩展到其他半导体材料。

尽管共价键对价电子的束缚较强, 当价电子受到一定强度外界能量的激发时, 依然能够挣脱共价键的束缚, 呈现出“自由态”的电子, 这种现象称为本征激发(图 3.1.4)。本征激发产生的“自由态”电子称为自由电子。自由电子不受共价键的束缚, 在外电场作用下, 半导体

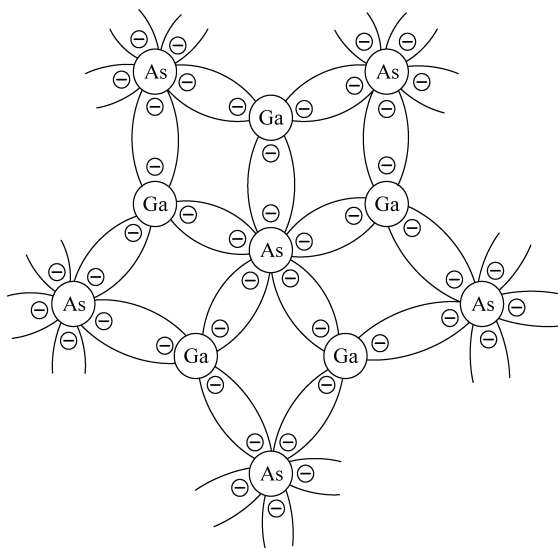


图 3.1.3 砷化镓晶体二维共价键结构

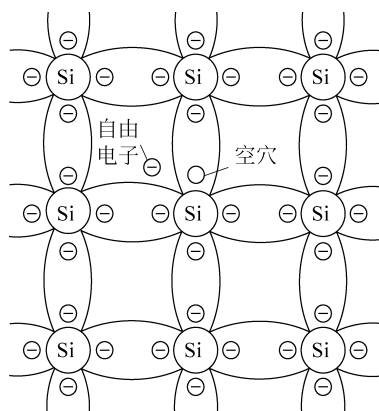


图 3.1.4 本征半导体中电子被激发形成自由电子-空穴对

中的自由电子可以产生定向移动,从而产生电流。激发自由电子的外界能量可以是热能,也可以是光辐射。在室温(300K)条件下,本征硅晶体中的自由电子浓度大约为 $1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$,与此对应的,硅晶体的原子密度约为 $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 。由于常温条件下本征激发产生的自由电子浓度太低,本征半导体的导电能力并不强。

半导体材料有明显区别于导体材料的温度特性。对于导体材料,当温度升高时,导体内部的自由电子浓度变化不大,但是电子的振动模式会发生改变,从而导致电子在导体内部的持续定向运动变得更加困难,导电能力变差,电阻变大。这种导体材料电阻随温度升高而变大的特性,称导体具有正温度系数。对于半导体材料,当温度升高时,更多的价电子会吸收热能,挣脱共价键的束缚,自由电子的浓度升高,电阻变小。这种半导体材料电阻随温度升高而变小的特性,称为半导体的负温度系数。

2. 空穴

在本征半导体中,电子挣脱共价键的束缚成为自由电子的同时,必然在共价键中留下一个空位,这个空位称为空穴。根据电荷平衡的原理,空穴是带正电的。在本征半导体中,电子和空穴成对产生,也称电子-空穴对。

3. 载流子

运载电荷的粒子称为载流子,当本征半导体处于外加电场时,很容易理解自由电子会产生定向移动,从而形成电流,因此半导体中的电子是载流子。

空穴是由于共价键中电子被激发留下的空位,本身是无法自由移动的。实际上,半导体中的空穴也是载流子。图 3.1.5 给出了空穴移动的机制,左侧相邻共价键中的受束缚电子被足够的能量激发填补右侧的空穴,同时在原来的位置留下一个空穴。电子填补空穴运动的结果就好比是空穴往左移动,电子往右移动,产生了自右向左的电流。空穴参与导电的过程实际反映了共价键中受束缚电子的移动。

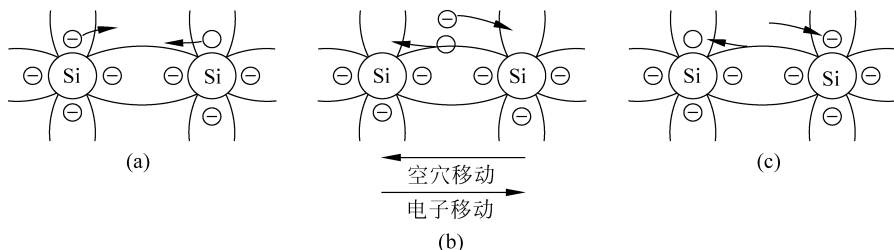


图 3.1.5 空穴作为载流子的运动机制

本征半导体中具有自由电子和空穴两种载流子,这是半导体导电的特殊性质。

4. 本征半导体中的载流子浓度

在本征半导体中,一方面,本征激发以一定的速率成对产生载流子(自由电子和空穴),温度越高,产生自由电子空穴对的速率越高;另一方面当自由电子与空穴相遇时,自由电子会填补空穴,两者同时消失,该过程称为载流子的复合。在一定的温度下,载流子的产生和复合速率相等,达到动态平衡。也就是说,特定温度下,本征半导体中的载流子的浓度是固定的,且电子和空穴的浓度总相等。

温度升高,热运动加剧,本征半导体中产生更多的自由电子和空穴,载流子浓度升高,半导体的导电能力增强。反之,温度降低,半导体的导电能力减弱。

3.1.3 杂质半导体

在本征半导体材料中引入特定的杂质,可以极大地改变半导体的特性。实际上,掺入杂质的浓度在百万分之一的量级,就足以彻底改变半导体材料的导电性能。经过掺杂处理的半导体称为杂质半导体或者非本征半导体。根据掺入杂质的不同,可以将杂质半导体分为两大类:N型半导体和P型半导体。

1. N型半导体

在硅晶体中掺入5价元素杂质(比如磷),可以获得N型半导体。以掺入磷为例,磷原

子最外层有 5 个价电子,如图 3.1.6 所示,当磷原子替代晶格中硅的位置,其外围的价电子与 4 个相邻的硅原子组成共价键,除此之外,还多余 1 个价电子,这个价电子只能位于共价键之外。实际上,这个多余的价电子受到磷原子的束缚很弱,很容易挣脱原子核成为自由电子,可以在晶格中相对自由地移动,这一过程称为电离。由于掺入的杂质磷原子给出了 1 个多余的价电子,因此也称为施主杂质(donor)。

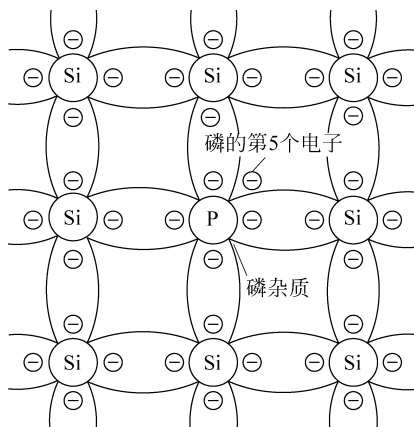


图 3.1.6 磷掺杂 N 型半导体

需要注意的是,如果在 N 型半导体中掺入大量施主杂质,半导体中会出现相应数量的自由电子,即便如此,N 型半导体仍然呈电中性。因为施主杂质原子给出一个自由电子的同时,原来电中性的杂质原子会由于失去 1 个电子而成为 1 个不能移动的正离子,由于杂质电离产生的正离子和自由电子的数目始终是相等的,因此 N 型半导体保持电中性。

与本征半导体不同,在 N 型半导体中,自由电子是由施主杂质电离产生,并不伴随产生相应的空穴,因此 N 型半导体中,自由电子的浓度远大于空穴的浓度,自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子。N 型半导体主要依靠电子导电,也称为电子型半导体。

2. P 型半导体

在硅晶体中掺入 3 价元素杂质(比如硼),可以获得 P 型半导体。以掺入硼为例,硼原子最外层有 3 个价电子,如图 3.1.7 所示,当硼原子替代晶格中硅的位置,其外围的价电子与 4 个相邻的硅原子组成共价键时,4 个共价键中会有 1 个因为缺少 1 个电子而出现 1 个空穴。这个空穴很容易由相邻共价键中的价电子填补,能“接受”1 个电子,因此这里的硼原子也称为受主杂质(acceptor)。

在 P 型半导体中掺入大量的受主杂质,半导体中会出现相应数量的空穴。此时 P 型半导体仍然呈电中性,其原理与 N 型半导体类似。受主杂质原子“接受”1 个电子的同时,原来电中性的杂质原子会由于得到 1 个电子而成为 1 个不能移动的负离子。

在 P 型半导体中,空穴由受主杂质引起,并不伴随产生相应的电子,因此 P 型半导体中,空穴的浓度远大于自由电子的浓度,空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子。P 型半导体主要依靠空穴导电,也称为空穴型半导体。

3. 载流子的漂移与扩散

在热能激发下,半导体当中的载流子运动是杂乱无章的随机运动,载流子在任意方向的

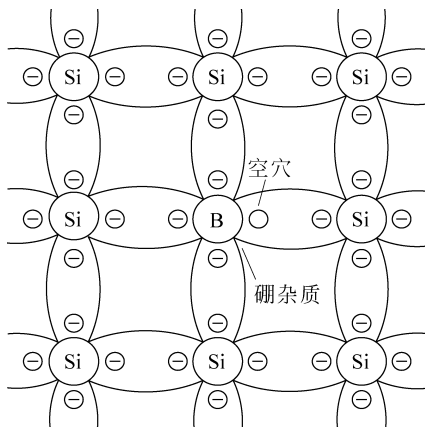


图 3.1.7 硼掺杂 P 型半导体

平均速度为零,因而不形成电流。在半导体中,载流子的定向运动会产生电流。通常产生载流子定向运动的机制有两种:漂移与扩散。

1) 漂移

当半导体处于外电场 E 作用下,根据载流子所带电荷的特性,空穴将沿着电场方向运动,电子沿电场反方向运动。载流子处于电场作用下的定向运动称为漂移运动,由漂移运动产生的电流叫作漂移电流。

载流子的平均漂移速度与半导体所处外电场 E 成正比。对于电子而言,假设 V_n 为电子的平均漂移速度,有

$$V_n = -\mu_n E$$

式中, μ_n 为电子的迁移率,负号表明电子的漂移速度矢量与电场方向相反。

对于空穴而言,假设 V_p 为空穴的平均漂移速度,有

$$V_p = \mu_p E$$

式中, μ_p 为空穴的迁移率。

在半导体中,由于空穴的移动实际上是受共价键束缚的电子的移动,因此通常空穴的移动能力要比自由电子差。也就是说,半导体中电子的迁移率要大于空穴的迁移率。在室温下,硅材料中的电子迁移率大约是空穴迁移率的 3 倍。因此,在高频模拟电路中,电子导电器件比空穴导电器件具有速度上的优势。

2) 扩散

当半导体局部受到光照,或者有外部载流子注入时,其内部的载流子分布会变得不均匀,出现载流子浓度差,此时载流子会从浓度高的区域向浓度低的区域运动,这种由浓度差引起的运动称为扩散运动,由扩散运动产生的电流称为扩散电流。在半导体内,还可能由于制造工艺或者运行机制的原因,使得某一特定的区域内的空穴或电子浓度高于正常值,此时也会形成载流子从高浓度区域向低浓度区域的扩散。需要强调的是,扩散作用主要取决于载流子的浓度梯度(浓度差),而不是载流子的绝对浓度。

3.2 PN 结的形成及特性

3.2.1 PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体“结合”在一起时,界面就会形成 PN 结。实际上,PN 结是通过在同一半导体基片的两个相邻区域分别掺入 3 价和 5 价元素,从而形成 P 型区和 N 型区而形成的。由于 P 型半导体中空穴为多子,因此 P 型区含有高浓度的空穴。类似的,N 型区含有高浓度的电子。在 P 型和 N 型半导体的界面,存在着明显的空穴和电子浓度差,从而出现载流子的扩散。即 P 型区的空穴向 N 型区扩散,N 型区的电子向 P 型区扩散,在此过程中,形成由 P 区流向 N 区的扩散电流 I_D (图 3.2.1)。在相互扩散的过程中,P 区一侧的空穴扩散到 N 区,与 N 区的电子复合。对应的,N 区一侧的电子扩散到 P 区,与 P 区的空穴复合。最终的结果,在界面附近的 P 区和 N 区分别留下带负电的受主离子和带正电的施主离子。这些带电的离子不能任意移动,不参与导电。界面附近形成的这一充满带电离子的区域,称为空间电荷区,该区域是一个很薄的特殊物理层,称为 PN 结。在空间电荷区内,由于多数载流子扩散到对方并被复合掉了,或者说被“耗尽”掉了,因此空间电荷区也称耗尽区(图 3.2.2)。

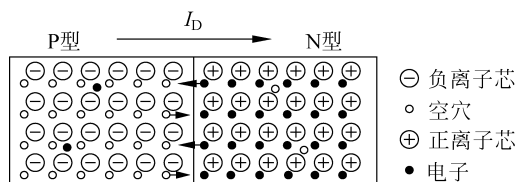


图 3.2.1 载流子的扩散

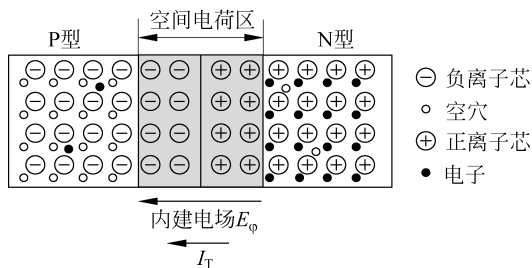


图 3.2.2 平衡状态下的 PN 结

在空间电荷区,由于 P 区带负电的离子和 N 区带正电的离子的相互作用,会形成一个由 N 区指向 P 区的电场,这个电场由 PN 结内部形成,称为内建电场。该电场阻碍多子的扩散运动,但它有利于少子的漂移运动,使得 P 区的少数电子和 N 区的少数空穴向对方漂移,从而形成由 N 区流向 P 区的漂移电流 I_T 。漂移电流与扩散电流的方向相反。

扩散运动和漂移运动是两种相互联系又相互对立的运动,在 PN 结形成的开始,由于载流子浓度梯度大,以多子的扩散运动为主,随着多子扩散的进行,空间电荷区留下的带电离

子逐渐增多,空间电荷区变宽,内建电场增强,从而使得多子的扩散运动减弱。与此同时,少子的漂移运动增强。漂移运动使得空间电荷区的带电粒子减少,空间电荷区变窄。最终,当漂移电流和扩散电流相等时,空间电荷区达到动态平衡,PN结形成。此时没有净电流流过PN结。平衡状态下,空间电荷区的宽度一定。由于空间电荷区对多子的扩散具有阻挡作用,多子扩散到对方需要越过一个能量高度(克服内建电场),因此空间电荷区也称为势垒区。

空间电荷区的宽度取决于PN结的掺杂浓度。假设PN结两侧掺杂浓度不同,以N区一侧掺杂浓度较高为例,施主杂质电离产生的正离子密度比P区一侧受主杂质电离产生的负离子密度高。由于PN结内部P区一侧的负离子数与N区一侧的正离子数几乎相等,空间电荷区在N区一侧较窄(图3.2.3)。反之,若N区一侧杂质浓度较低,则该侧电荷密度小,该侧空间电荷区较宽。

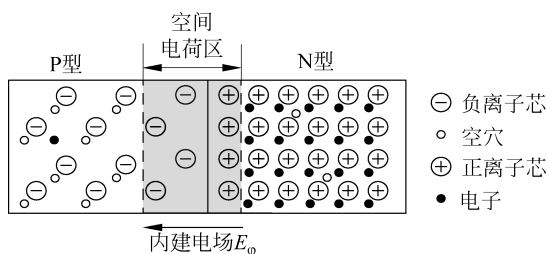


图 3.2.3 非平衡掺杂导致的空间电荷区宽度不对称

3.2.2 PN 结的单向导电性

前面所述的是PN结没有外加电压时的情况,称为平衡状态下的PN结。处于平衡状态下的PN结,其内建电场为 E_ϕ ,阻碍多子扩散运动,有利于少子的漂移运动。在 E_ϕ 的作用下,载流子的扩散运动和漂移运动处于动态平衡。在PN结的两端外接电源时,PN结呈现出单向导电性。

1. 正向偏置的PN结

当PN结外加电压 V_F 的正端接P区,负端接N区时,称PN结正向偏置,简称正偏(图3.2.4)。此时P区电位高于N区,外加电压形成的外加电场 E_F 与PN结的内建电场 E_ϕ 方向相反。外加电场与内建电场的叠加结果使空间电荷区总的电场被削弱,PN结的平

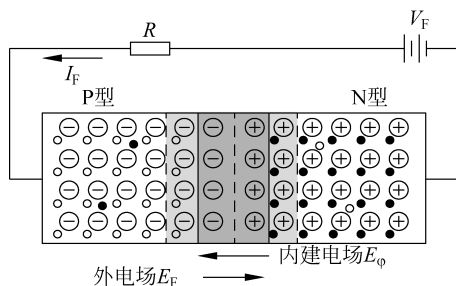


图 3.2.4 正向偏置的PN结

平衡状态被打破,平衡状态下被阻碍的多子扩散过程得以继续,即P区的多子空穴和N区的电子均向PN结移动。在这一过程中,P区的空穴向PN结移动,中和一部分负离子;N区的电子向PN结移动,中和一部分正离子。结果,空间电荷区的电荷量减少,耗尽区变窄。需要注意的是,PN结正偏时,在空间电荷区的载流子数目很少,其相对于空间电荷区之外的P区和N区是高阻区,因此外加电压 V_F 几乎都作用在空间电荷区。

在PN结正偏条件下,由于内建电场 E_ϕ 与外加电场叠加使PN结总的电场强度被削弱,有利于P区和N区多子的扩散运动,不利于少子的漂移运动。此时多子扩散运动胜过少子漂移运动,扩散运动起主导作用。多子的扩散将产生净扩散电流,在外电路形成一个流入P区的正向电流 I_F 。

外加正偏电压越大,PN结电场越弱,扩散电流也越大。在正常工作范围内,正向电流 I_F 会由于外加电压的变化而产生显著的变化,即正偏的PN结表现为一个阻值很小的电阻,因此通常称正偏的PN结是导通的。导通状态下的PN结上压降较小,基本不随外加偏置电压的变化而变化。

2. 反向偏置的PN结

当PN结外加电压 V_R 的正端接N区,负端接P区时,称PN结反向偏置,简称反偏(图3.2.5)。此时N区电位高于P区,外加电压形成的外加电场 E_R 与PN结的内建电场 E_ϕ 方向相同。外加电场与内建电场的叠加结果使空间电荷区总的电场增强,PN结的平衡状态被打破,平衡状态下被阻碍的多子扩散过程被进一步抑制,即P区的多子空穴和N区的电子均进一步离开PN结。在这一过程中,P区的空穴远离PN结留下一部分负离子,N区的电子远离PN结留下一部分正离子。结果,空间电荷区的电荷量增加,耗尽区变宽。

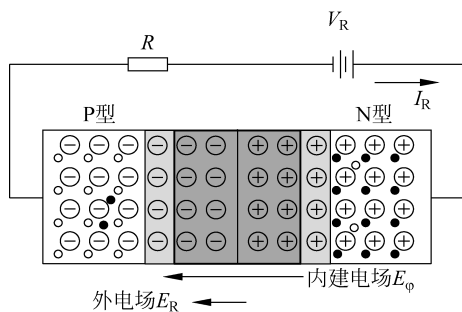


图 3.2.5 反向偏置的PN结

在PN结反向偏置条件下,由于内建电场 E_ϕ 与外加电场叠加使PN结总的电场强度被加强,进一步阻碍P区和N区多子的扩散运动,有利于少子的漂移运动。此时多子的扩散电流趋近于零,漂移运动起主导作用。少子的漂移将产生漂移电流,在外电路形成一个流入N区的反向电流 I_R 。

由于半导体中少子的浓度很低,数量很少,因此反向电流 I_R 很容易达到一个“饱和”值。即便如此,由于少子数量太少, I_R 是很微弱的,硅管的 I_R 通常为 μA 级。需要注意的是,少子主要由本征激发产生,其浓度随着温度的升高而增加,因此当温度升高时, I_R 变大。由于PN结在反向偏置时,在外电路产生的反向饱和电流 I_R 极小,通常反向电流 I_R 远远

小于正向电流($|I_R| \ll I_F$),反偏的PN结表现为一个阻值很大的电阻,通常可以认为,反偏PN结不导通,称PN结反向截止。

3.2.3 PN结的反向击穿

PN结反偏状态下,其两端的电压并不是可以无限制增大的,当加在PN结上的反向偏置电压 V_R 超过一定值时,反向电流会急剧增大,这种现象称为PN结的反向击穿(breakdown),发生击穿时对应的反向电压 V_{BR} 称为反向击穿电压。从击穿的机理来区分,可以将PN结的反向击穿分为两种:雪崩击穿和齐纳击穿。

1. 雪崩击穿

当PN结掺杂浓度较低时,其对应的空间电荷区较宽。随着反偏电压的增加,空间电荷区中的电场随之增强,少数载流子通过空间电荷区时,有足够的空间被强电场不断加速,从而获得足够的动能,具备足够动能的少数载流子与晶体中的原子发生碰撞时,能够使共价键中的价电子脱离共价键,碰撞出新的电子-空穴对,这一过程称为碰撞电离。新产生的载流子同样会被电场加速获得足够的动能,继续发生碰撞电离,产生更多的电子-空穴对,形成载流子的倍增效应。该连锁反应使得空间电荷区中载流子数目急剧增加,类似于陡峭的积雪山坡上发生雪崩一样,因此称为雪崩击穿。

2. 齐纳击穿

当PN结掺杂浓度较高时,其对应的空间电荷区较窄。随着反偏电压的增加,少数载流子通过空间电荷区时,没有足够的空间被电场加速而获得碰撞电离所需的动能。但是由于空间电荷区很窄,在不大的反偏电压下,PN结的空间电荷区会产生很强的电场,该电场能够破坏共价键对价电子的束缚,将电子从共价键拉出,产生新的电子-空穴对。新产生的载流子在电场作用下,形成较大的反向电流,这一个过程称为场致激发。场致激发产生大量的载流子,使得PN结的反向电流急剧增大,该击穿称为齐纳击穿。

PN结发生反向击穿后,如果反偏电压降低,PN结仍然可以恢复到原来的工作状态,这种击穿称为电击穿。在反向电压和反向电流的乘积不超过PN结允许的耗散功率的前提下,电击穿是可逆的,因此电击穿可以被人们所利用。一旦反向电压和反向电流的乘积超过PN结容许的耗散功率,PN结就有可能因为过热而烧毁,发生热击穿,这一过程是不可逆的,所以热击穿应当尽量避免。

3.2.4 PN结的电容效应

当PN结应用于高频信号或者作为开关器件使用时,必须考虑其电容特性,PN结表现出的电容大小和特性与外加电压密切相关。PN结主要体现为两种电容效应:扩散电容和势垒电容。

1. 扩散电容

当PN结处于正偏时,P区的空穴和N区的电子相互扩散,在这一过程中,部分电子和空穴在空间电荷区相遇发生复合,剩余的部分继续向对方扩散,结果导致在靠近PN结边缘的区域形成载流子的累积,累积的载流子浓度在PN结边缘要高于距结稍远处的浓度。正向电流越大,在PN结边缘累积的载流子数目就越多。这种随外加正偏电压变化,对应存储