

半导体器件是组成各种电子电路的基础元件。本章首先介绍半导体基础知识,包括半导体材料的特性、半导体中载流子的运动和 PN 结的单向导电特性等,然后介绍半导体二极管、特殊二极管、双极型晶体管以及场效应管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

4.1 半导体基础知识

按导电能力的不同,自然界的物质可分为导体、绝缘体和半导体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。硅(Si)和锗(Ge)是两种最常用的半导体材料。

硅和锗原子的最外层都有 4 个价电子,因此它们均为 4 价元素。最外层电子的特点是:外层电子没排满,还可接收电子;外层电子受原子核的引力小,容易挣脱核的引力束缚成为自由电子,在外电场作用下定向移动形成电流,自由电子影响导电性能。



图 4.1 4 价元素简化的原子模型

从决定导电能力的角度,简化表示硅和锗原子,即将内层电子与原子核等效合并成一个带+4 价电荷的正离子以及它周围的 4 个带负电荷的价电子表示,如图 4.1 所示。

4.1.1 本征半导体

纯净的晶体结构的半导体,称为本征半导体。

由于晶体结构中原子排列的有序性,价电子为相邻的原子所共有,形成如图 4.2 所示的共价键结构。共价键中的价电子不仅受本身原子核的束缚,同时也受相邻原子核的吸引,即受共价键的束缚。

常温下,由于本征激发(热激发),使少数具有足够能量的价电子挣脱共价键的束缚而成为能运动的自由电子,同时共价键中留有一个空位置,称为空穴。本征激发产生的自由电子和空穴是成对出现的。

由于电子带负电荷,空穴表示原子缺少了一个负电荷,因此可以等效地看成是空穴带一个正电荷。空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补,使空穴

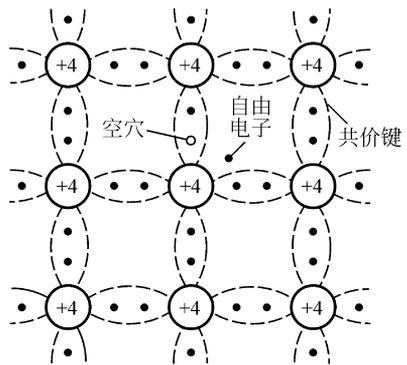


图 4.2 本征半导体的结构及本征激发示意图

发生转移,这种价电子填补空位的运动等效成空穴在运动。

自由电子和空穴在运动中相遇会重新结合而成为对消失,这种现象称为复合。温度一定时,自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡,这时,自由电子和空穴的浓度是一定的。

在外电场的作用下,带负电荷的自由电子逆电场方向定向运动形成电子电流,带正电荷的空穴顺电场方向定向运动形成空穴电流。把能够运动的、可以参与导电的带电粒子称为载流子,半导体中有自由电子和空穴两种载流子。

本征半导体载流子的数量很少且与温度有关,导电能力弱。半导体材料的这种特性称为热敏性,此外还有光敏性和掺杂性。

4.1.2 杂质半导体

在常温下,本征半导体载流子的浓度很低,因此导电能力很差。在本征半导体中掺入少量合适的杂质元素形成杂质半导体,可改善半导体的导电性能,并使其具有可控性。根据掺入杂质元素的不同,可分为N型半导体和P型半导体。

1. N型半导体

在本征半导体Si或Ge晶体中掺入少量的5价元素(如磷、锑、砷等),杂质原子代替晶格中某些4价元素的位置。杂质原子与周围的4价元素原子结合成共价键时,多出一个价电子,这个多余的价电子不受共价键的束缚,只受自身原子核的吸引,这种束缚力比较弱,在常温下即可成为自由电子,如图4.3所示。失去自由电子的杂质原子固定在晶格中不能移动,且带有正电荷,它称为正离子(用 \oplus 表示)。由杂质原子提供的自由电子,其数量与掺入杂质原子的数量相同,与温度无关。

与此同时,本征激发又产生自由电子和空穴对,数量与温度有关,但远小于因掺入杂质而产生的自由电子数,所以这种杂质半导体中,有以下两种数量不等的载流子:

自由电子的数量 = 掺杂形成的数量 + 本征激发形成的数量 \approx 掺杂形成的数量

空穴的数量 = 本征激发形成的数量

因此它是以电子导电为主的杂质半导体。因为电子带负电(negative electricity),所以称为N型半导体。N型半导体中,自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子。

2. P型半导体

在本征半导体Si或Ge晶体中掺入少量的3价元素(如硼、镓、铟等),杂质原子代替晶格中某些4价元素的位置。杂质原子与周围的4价元素原子结合成共价键时,因缺少一个价电子而产生一个空位,在常温下,这个空位能吸引邻近的价电子填充而形成空穴,如图4.4所示。获得一个价电子的杂质原子固定在晶格中不能移动,并带有负电荷,它称为负离子(用 \ominus 表示)。由杂质原子提供的空穴,其数量与掺入杂质原子的数量相同,与温度无关。

与此同时,本征激发又产生自由电子和空穴对,数量与温度有关,但远小于因掺入杂质而产生的空穴数,所以这种杂质半导体中,有以下两种数量不等的载流子:

空穴的数量 = 掺杂形成的数量 + 本征激发形成的数量 \approx 掺杂形成的数量

自由电子的数量 = 本征激发形成的数量

因此它是以空穴导电为主的杂质半导体。因为空穴带正电(positive electricity),所以称为P型半导体。P型半导体中,自由电子为少数载流子,空穴为多数载流子。

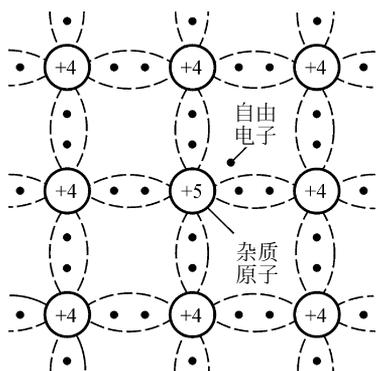


图 4.3 N 型半导体的结构示意图

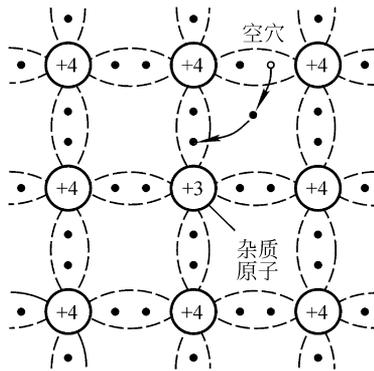


图 4.4 P 型半导体的结构示意图

注意,杂质离子虽然带电荷,但不能移动,因此它不是载流子。杂质半导体中虽然有一种载流子占多数,但这个半导体仍然呈电中性。杂质半导体的导电性能主要取决于多数载流子的浓度,即取决于掺杂的程度,从而实现导电性可控。少数载流子的浓度与本征激发有关,因此对温度敏感,随温度变化。



视频讲解

4.1.3 PN 结

采用不同的掺杂工艺,在本征半导体的一侧形成 P 型半导体,在另一侧形成 N 型半导体,则在二者的交界处将形成 PN 结。

1. PN 结的形成

P 型半导体和 N 型半导体结合时,由于两个区的同一类型载流子的浓度不同,将产生多数载流子的扩散运动,即 P 区的空穴向 N 区扩散,N 区的自由电子向 P 区扩散,从而在 P 区、N 区交界处形成由正、负离子构成的空间电荷区及内电场,扩散运动的进行使空间电荷区变宽、内电场增大;在内电场的作用下又产生两个区少数载流子的漂移运动,即 P 区的自由电子向 N 区漂移,N 区的空穴向 P 区漂移,漂移运动的进行又使空间电荷区变窄、内电场减弱。

当扩散运动和漂移运动的规模相同达到动态平衡时,在 P 区、N 区交界处形成稳定的空间电荷区,即 PN 结。PN 结的形成过程如图 4.5 所示。

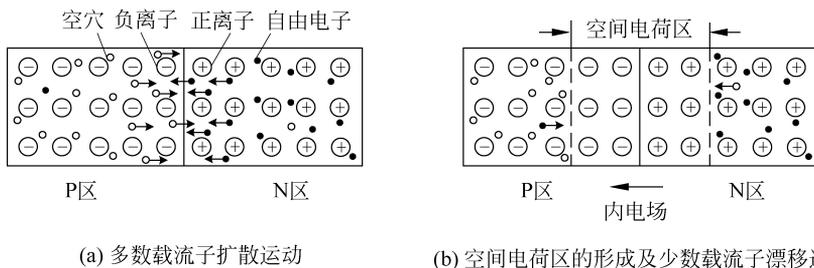


图 4.5 PN 结的形成

无外加电压作用时,PN 结中载流子的扩散运动和漂移运动达到动态平衡,所产生的扩散电流和漂移电流大小相等、方向相反、相互抵消,PN 结中的电流为 0。

2. PN 结的单向导电性

当在 PN 结的两端外加电压时,将破坏动态平衡状态,使扩散电流和漂移电流不再相等,PN 结中将有电流流过。外加电压的极性不同时,PN 结呈现两种不同的导电性能,即单向导电性。

1) PN 结外加正向电压

外加正向电压,也称为正向偏置,简称正偏。接法是将电源的正极接 P 区,负极接 N 区,如图 4.6 所示。其中, R 为限流电阻。

可见,外电场的方向与内电场的方向相反,削弱了内电场,使空间电荷区变窄,有利于多数载流子扩散运动,而不利于少数载流子漂移运动。多数载流子扩散运动形成较大的正向电流 I_F ,PN 处于导通状态。正向电流的大小与外加的正向电压成比例,方向由外部流入 P 区。

2) PN 结外加反向电压

外加反向电压,也称为反向偏置,简称反偏。接法是将电源的正极接 N 区,负极接 P 区,如图 4.7 所示。

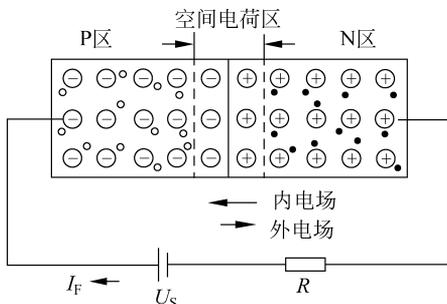


图 4.6 PN 结外加正向电压

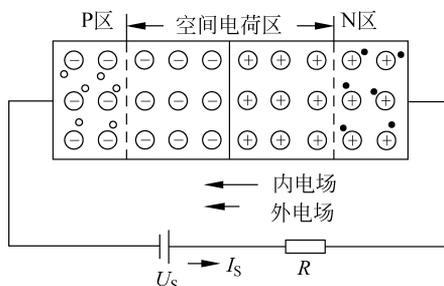


图 4.7 PN 结外加反向电压

可见,外电场的方向与内电场的方向相同,加强了内电场,使空间电荷区变宽,阻止多数载流子扩散运动,而利于少数载流子漂移运动。少数载流子漂移运动形成反向饱和电流 I_S (≈ 0),PN 结处于截止状态。反向电流的大小与温度有关,与外加反向电压的大小基本无关,方向由外部流入 N 区。

PN 结正偏时导通,形成较大的正向电流;反偏时截止,电流近似为零。这种特性称为 PN 结的单向导电性。

此外,PN 结在一定条件下还具有电容效应,根据产生原因的不同,分为扩散电容和势垒电容。当 PN 结正偏时,在 PN 结的扩散区内,电荷的积累和释放过程与电容充放电的过程相同,这种电容效应称为扩散电容;当 PN 结反偏时,空间电荷区的宽度随外加反压的变化而增宽或变窄,这种现象与电容充放电的过程相同,空间电荷区宽窄变化等效的电容称为势垒电容。

4.2 半导体二极管

4.2.1 二极管的结构与类型

从 PN 结的 P 区和 N 区各引出电极引线,再用外壳封装构成二极管(diode),如图 4.8(a)

所示,其图形符号如图 4.8(b)所示。

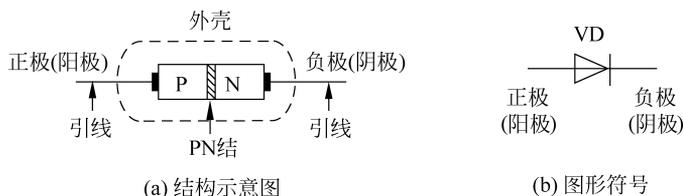


图 4.8 半导体二极管的结构和图形符号

二极管的种类很多,分类方法也不相同。按材料可分为硅二极管(硅管)和锗二极管(锗管);按用途可分为普通二极管、稳压二极管、整流二极管和发光二极管等;按结构可分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管等。

4.2.2 二极管的伏安特性

二极管的两端电压 u 和流过电流 i 之间的关系称为伏安特性。伏安特性方程和伏安特性曲线是它的两种描述方法。

1. 二极管的伏安特性方程

二极管的伏安特性方程的表达式为

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (4.1)$$

式中, i 为通过二极管的电流, u 为加在二极管两端的电压, U_T 为温度的电压当量, 常温时为 26mV, I_S 为反向饱和电流。

伏安特性方程描述了二极管的单向导电性: 当 $u > 0$, 且 $u \gg U_T$, 则 $e^{\frac{u}{U_T}} \gg 1$, $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$, 二极管导通; 当 $u < 0$, 且 $|u| \gg U_T$, 则 $i \approx -I_S$, 二极管截止。

2. 二极管的伏安特性曲线

典型的实际二极管的伏安特性曲线如图 4.9 所示。曲线分为正向特性、反向特性和击穿特性三个区域。

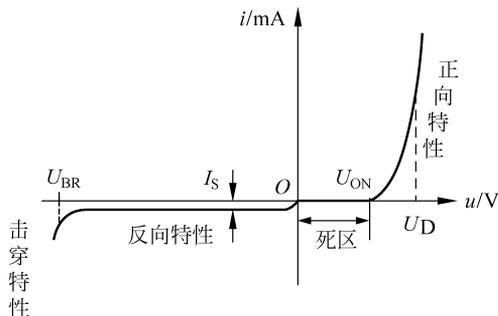


图 4.9 二极管伏安特性曲线

1) 正向特性

当加在二极管上的正向电压很小, 还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子运动的阻挡作用, 基本维持动态平衡, 这一段二极管的正向电流 I_F 很小, 近似为零, 称为死区。只有



视频讲解

当正向电压超过某一数值 U_{ON} 时,才开始有正向电流,通常称 U_{ON} 为死区电压或开启电压。开启电压 U_{ON} 的数值与二极管的材料及温度等因素有关,一般硅管约为 0.5V ,锗管约为 0.1V 。

当正向电压超过 U_{ON} 后,内电场被明显削弱,正向电流 I_F 将随正向电压的增大,按指数及近似线性规律增大,二极管处于导通状态。通常二极管正向导通后工作在曲线的线性段,忽略曲线线性段各处电压的微小差别,可认为二极管的导通电压 U_D 近似为常数,一般硅管约为 0.7V ,锗管约为 0.2V 。

2) 反向特性

当给二极管加反向电压时,PN 结中外电场与内电场方向一致,仅有少数载流子的漂移运动,形成不随外加电压变化、数值极小的反向饱和电流 I_S ,二极管处于截止状态。一般硅管的 I_S 为 10^{-9}A 数量级,锗管的 I_S 为 10^{-6}A 数量级,近似为 0 。反向饱和电流 I_S 越小,二极管的单向导电性越好。

3) 击穿特性

当反向电压增大到某一数值时,在外部强电场的作用下,少数载流子的数量会急剧增加,使得反向电流急剧增大,这种现象称为反向击穿。击穿时对应的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。各类二极管的反向击穿电压大小不同,从几十伏到几千伏。普通二极管发生反向击穿后,造成二极管损坏,失去单向导电性。

4) 二极管伏安特性曲线的折线化及等效电路

二极管的伏安特性曲线是非线性的,这在实际电路的分析计算中很不方便。因此,在工程上常常将其分段线性化,以简化电路的分析计算。通常有以下两种线性化折线处理方法,可根据不同情况进行选择。

(1) 将二极管理想化处理。理想二极管的伏安特性曲线及其等效电路如图 4.10 所示。伏安特性曲线中,忽略其正向导通压降 U_D 和反向饱和电流 I_S ,反向击穿电压 $U_{BR} = \infty$ 。理想二极管的导通条件为 $u > 0$,截止条件为 $u \leq 0$ 。二极管正偏导通时用短路的形式等效,反偏截止时用开路的形式等效。

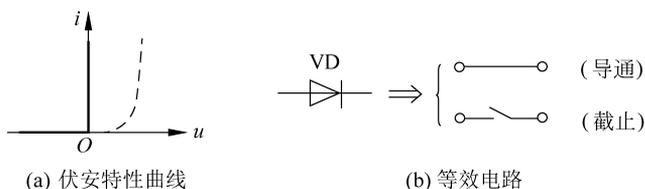


图 4.10 理想化的二极管

(2) 考虑二极管的正向导通压降。二极管的伏安特性曲线及其等效电路如图 4.11 所示。伏安特性曲线中,二极管导通后压降恒定,且 $U_{ON} = U_D$,忽略反向饱和电流 I_S ,反向击穿电压 $U_{BR} = \infty$ 。考虑正向导通压降时二极管的导通条件为 $u > U_D$,截止条件为 $u \leq U_D$ 。二极管正偏导通时用数值为 U_D 的电压源等效,反偏截止时用开路的形式等效。