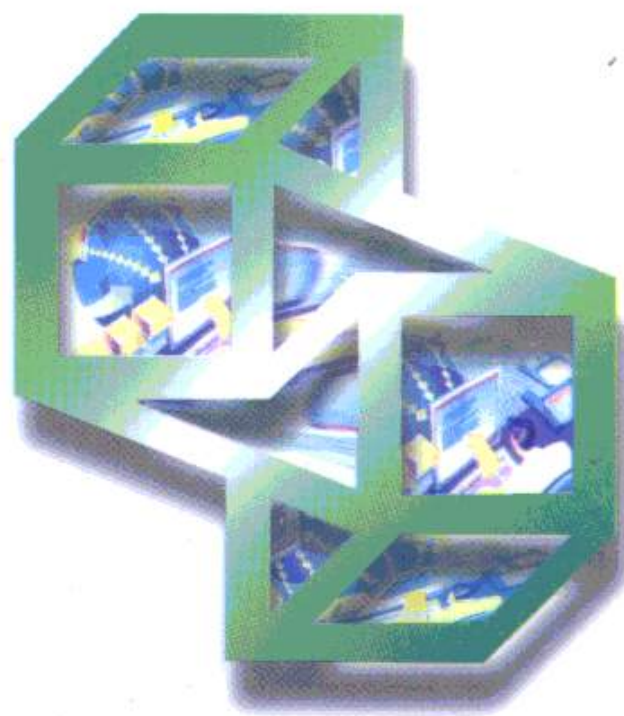




中等专业学校
电子信息类 规划教材



金长义 李朝鲜 束亦清 编著

计算机基础电路



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

中等专业学校
电子信息类 规划教材

计算机基础电路

金长义 李朝鲜 束亦清 编著

西安电子科技大学出版社
2000

内 容 简 介

本书内容包括半导体器件、数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、双稳态触发器、时序逻辑电路、基本线性放大电路、运算放大器、正弦波振荡器、D/A 与 A/D 转换电路、脉冲信号的产生与波形变换电路、直流稳压电源等。

本书可作为计算机专业或相关专业中等、初等职业教育教材,也可作为有关中级、初级技术人员自学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机基础电路/金长义等编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2000. 2

中等专业学校电子信息类规划教材

ISBN 7-5606-0756-X

I. 计… I. 金… II. 电子计算机—电子电路—专业学校教材. IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 24738 号

责任编辑 马武装

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安兰翔印刷厂

版 次 2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 26

字 数 614 千字

印 数 1~6 000 册

定 价 24.00 元

ISBN 7-5606-0756-X/TP·0384

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

本教材系按原电子工业部《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由中专计算机专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由北京无线电工业学校金长义担任主编，凌林海任主编，责任编委戚琦。

本教材的参考学时数为 200 学时，其中理论课时为 156 学时。主要内容由四个部分组成：(1) 半导体器件；(2) 基础数字电路(数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、双稳态触发器、时序逻辑电路)；(3) 模拟信号的处理与传送(基本线性放大电路、运算放大器、正弦波振荡器、D/A 与 A/D 转换电路)；(4) 脉冲电路与直流电源(脉冲信号的产生与波形变换电路、直流稳压电源)。

使用本教材时应注意：第一，为优化教材结构，本书面向半导体集成电路，面向微型计算机及其应用技术，以数字电路为主，模拟电路为辅；第二，本书采用模块式结构，教师可酌情组块授课；第三，各章末的习题分为 A、B 两类，A 类为教学基本要求，B 类为选作题。

本教材由金长义编写第 1、3、5、8、9、10、11、12 章，李朝鲜编写第 2、4、6 章，束亦清编写第 7 章。

参加本书编写工作的还有汪进、纪静波老师。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1997 年 12 月

第一篇

半导体器件

第 1 章

半导体器件

1.1 PN 结

1.1.1 半导体基本知识

1. 本征半导体

物质导电能力的强弱可用电阻率(ρ)表示。导电能力强($\rho < 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$)的物质叫导体；导电能力弱($\rho > 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$)的物质叫绝缘体；常温之下，导电能力居于导体和绝缘体之间的物质叫半导体。硅和锗是制作半导体器件最常用的半导体材料。

物质由原子组成。原子按一定规律整齐排列的物质叫晶体，大部分半导体都为晶体。晶体中的原子按一定规律结合成晶格，这是构成晶体的基本单元。晶格按一定规律排列构成的晶体叫单晶体；晶格杂乱堆砌而成的晶体叫多晶体。用来制作半导体器件的晶体应为单晶体。纯净的单晶结构的半导体叫本征半导体。现以硅和锗为例，对本征半导体讨论如下。

原子中的电子按一定轨道在空间围绕原子核旋转，每个电子旋转的轨迹都处在一定的壳层位置上，可以把硅和锗的原子结构画成平面示意图，如图 1.1(a)所示。由图 1.1(a)可知，硅和锗原子的电子数目虽不同，但外层电子都是 4 个。内层电子因受原子核的束缚力较强，很少有离开原来壳层的可能性，它们和原子核组成一个稳定的集团叫作惯性核。惯性核所带正电量等于外层电子总负电量，原子呈电中性。常用简化平面示意图来表示原子结构，硅和锗原子结构简化平面示意图如图 1.1(b)所示。

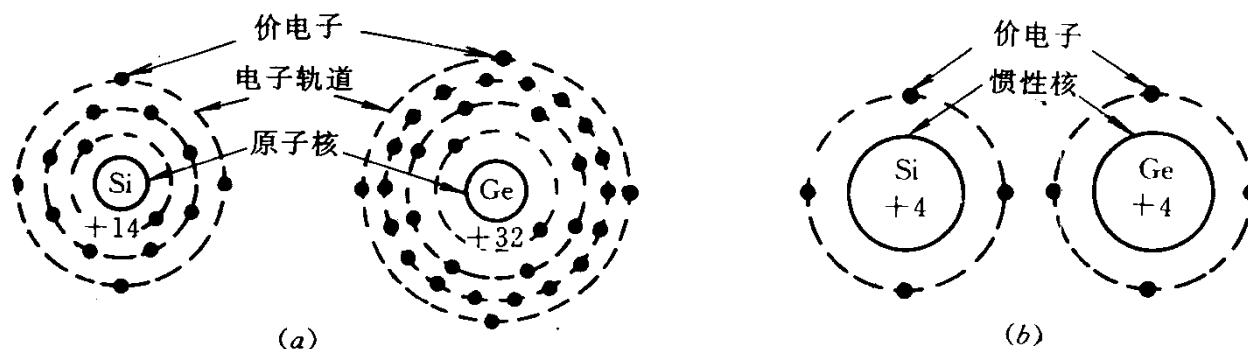


图 1.1 硅和锗的原子结构平面示意图

(a) 硅和锗原子的电子轨道；(b) 硅和锗原子结构简化平面示意图

原子外层的且被惯性核束缚着的电子叫价电子。对于硅、锗等原子来说，只有当价电子数目为 8 个时，原子才处于稳定状态。硅或锗原子结合成晶体时，由于原子之间距离很近，价电子运动区域便相互交叠。以硅为例，其平面示意图如图 1.2(a) 所示。每个原子的价电子既受所属惯性核的束缚，又受相邻惯性核的束缚，每两个相邻惯性核之间都有一对价电子将两者结合起来，称这些共有价电子为“共价键”，可形象地用共价键结构图表示，如图 1.2(b) 所示，图中两条实线表示结合力，线内黑点表示价电子。这些价电子若未接受足够的外加能量，就不能挣脱惯性核的束缚，称之为束缚电子。每个硅(锗)原子有 4 个价电子，它们与相邻 4 个原子的价电子形成 4 对共价键，使每个原子外层电子数目达到 8 个，成为稳定的共价键结构，称之为晶格。整块单晶体，就是由这样的晶格在空间按同一规律和一定方向重复排列而成的，其平面示意图如图 1.2(b) 所示。

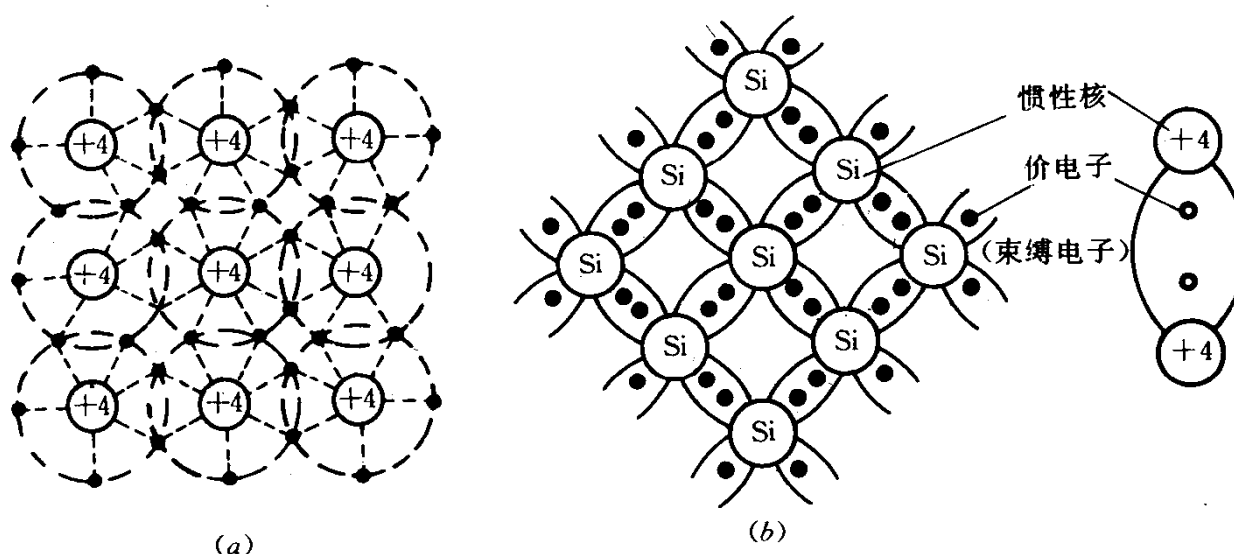


图 1.2 硅晶体结构平面示意图

(a) 硅晶体结构平面示意图；(b) 共价键结构图

在绝对温度 0 K 之下，本征半导体硅(锗)的全部价电子均为束缚电子，和理想化的绝缘体一样。当环境温度大于 0 K 时，价电子自身能量由于从振动的原子和外界(环境温度升高或光照等)获得能量而增大，有极少数价电子当它们所具有的能量足够大时，便挣脱惯性核的束缚成为自由电子(例如常温之下，在单晶硅中被冲破的共价键数约占共价键总数的 5×10^{-13})，这种现象称为本征激发。自由电子是一种带负电荷的物质，无电场作用时，它们可以在半导体内自由地不定向地运动，称为电子热运动；有电场作用时，它们将作定向运动并形成电流，所以自由电子又叫电子载流子。在本征激发过程中，价电子成为

自由电子的同时，在原来共价键位置上留下了一个空位，称之为空穴，如图 1.3 所示。在本征半导体内，自由电子和空穴是成对出现的，称之为“电子—空穴”对。空穴是一种带正电荷的物质，这是因为空穴所在的原子因失去一个价电子而变成正离子，正离子的电荷量可以看作是空穴所带的正电荷量。无电场作用时，由于空穴对附近价电子具有吸引力，以及这些价电子从外界获得能量而使其自身能量增大，因此便形成了空穴附近的价电子的不定向辗转运动，如图 1.4 所示，可视为空穴作不定向运动，称为空穴热运动；有电场作用时，空穴将作定向运动并形成电流，所以空穴又叫空穴载流子。

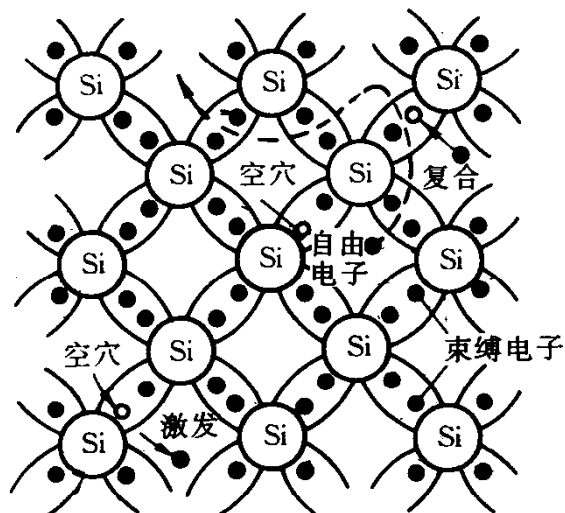


图 1.3 本征激发产生“电子—空穴”对

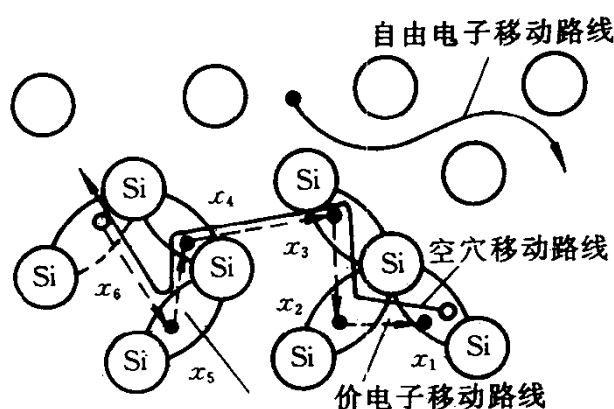


图 1.4 空穴移动方式

自由电子在运动过程中填入共价键内的空位时，自由电子与空穴重新结合成为价电子，这种现象称为复合。在一定环境温度或光照之下，本征半导体内的本征激发与复合现象并存，且本征激发与复合速率一定，半导体内维持一定数量的“电子—空穴”对，称为动态平衡。此时，一个单位体积半导体中载流子的数目，称为载流子浓度（个/ m^3 ）。本征半导体内电子载流子浓度（ N_i ）等于空穴载流子浓度（ P_i ），两者之和称为本征载流子浓度，其值甚微（300 K 之下，单晶硅中本征载流子浓度为 1.48×10^{16} 个/ m^3 ，锗为 2.36×10^{19} 个/ m^3 ），且随环境温度上升而按指数律增大。上述载流子浓度文字符号中的“N”表示“负”（negative），“P”表示“正”（positive）。

2. 掺杂半导体

以半导体硅为例，半导体内所含除它本身（Si）以外的一切元素（如磷、硼、钠、铁等），都叫作半导体硅中的杂质。有些杂质是制造半导体材料时有意掺进的有用杂质（如磷和硼等），有些是无意掺进但由于工艺原因又不能完全排除的无用杂质（如钠和铁等）。这里所谓掺杂半导体，指掺入有用杂质不含无用杂质的理想化半导体。

1) 掺杂半导体的种类

按所掺有用杂质不同，可分为两种。

(1) N 型半导体

本征半导体硅（锗）中掺入微量^①的五价元素磷（P），整个晶体结构基本不变。1 个磷原

^① 每立方米半导体约有 10^{29} 个原子，掺杂的密度要少几个数量级。典型掺杂密度为 10^{21} 个原子，相当于晶体中每 1 亿个硅（锗）原子才有一个杂质原子。

子与邻近的 4 个硅(锗)原子组成共价键结构后,还剩余 1 个价电子。这个剩余价电子只受到磷惯性核微小的吸引力,当环境温度大于 50 K 时,它从外界所获得的能量足以使它摆脱惯性核的束缚,成为自由电子,如图 1.5(a)所示。五价元素磷掺入硅(锗)后,可以释放出电子,称之为施主杂质。1 个磷原子失去一个电子后变成正离子,称之为施主离子,如图 1.5(b)所示,这种现象叫施主电离。本征半导体所掺五价元素的数量虽微,但晶体内自由电子浓度却因此骤增(以半导体硅为例,掺杂后自由电子浓度可达 10^{21} 个/ m^3 量级,相比之下,在一定温度范围内,本征激发所提供的本征载流子浓度可以忽略不计),使其导电能力大大提高。由于这种掺杂半导体的导电能力主要取决于电子载流子浓度,所以称之为电子型半导体,又叫 N 型半导体,并称其中自由电子为多数载流子(简称多子),称其中空穴为少数载流子(简称少子)。形成 N 型半导体的杂质又叫 N 型杂质。

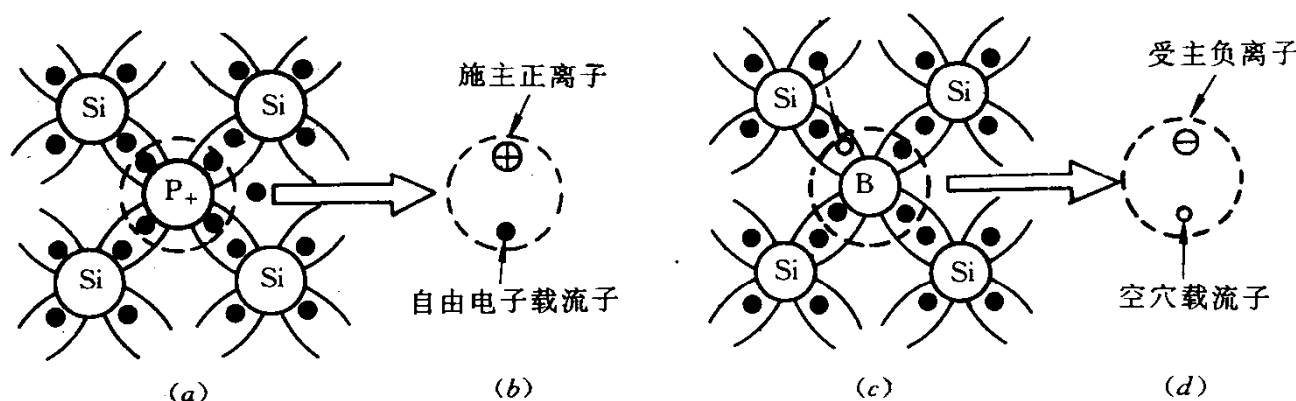


图 1.5 本征硅掺杂的示意图

(a) 自由电子; (b) 施主离子; (c) 空位; (d) 受主离子

在 N 型半导体中,本征激发形成的自由电子和空穴成对出现,施主电离形成的自由电子和正离子成对出现,所以这种掺杂半导体呈电中性,其内部离子及载流子分布示意图如图 1.6(b)所示。本征半导体也呈电中性。其内部载流子分布示意图如图 1.6(a)所示。

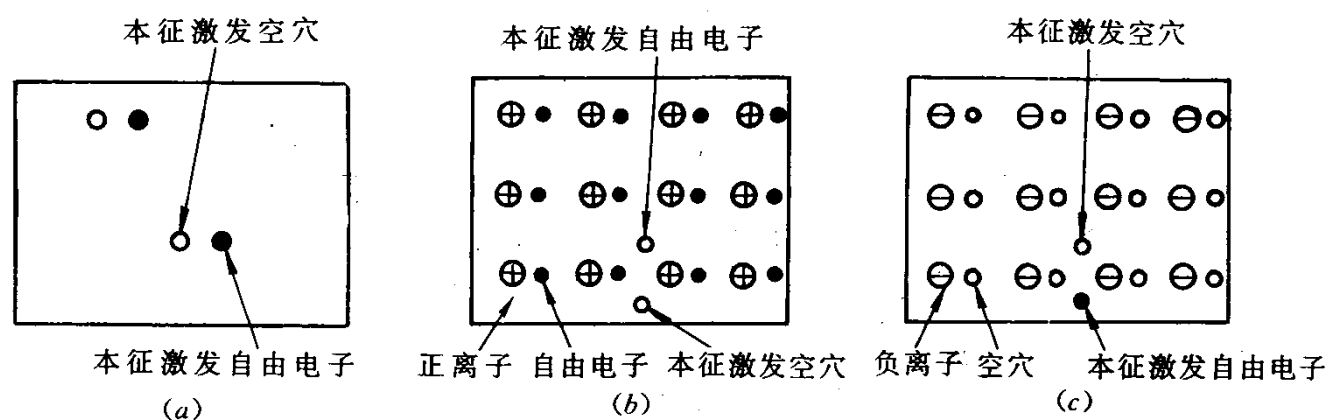


图 1.6 半导体内部离子及载流子分布示意图

(a) 本征半导体; (b) N 型半导体; (c) P 型半导体

(2) P 型半导体

本征半导体硅(锗)中掺入微量的三价元素硼(B),整个晶体结构基本不变。1 个硼原子

与邻近的 4 个硅(锗)原子组成共价键结构时, 出现 1 个空位, 如图 1.5(c)所示。当环境温度大于 50 K 时, 上述空位附近的价电子从外界获得足够能量后, 很容易来填补这个空位, 并使那个失去价电子的硅(锗)原子产生 1 个空穴。三价元素硼掺入硅(锗)后, 能从附近硅(锗)原子获得价电子从而使半导体内产生空穴, 称之为受主杂质。1 个硼原子获得 1 个价电子后变成负离子, 称之为受主离子, 它与半导体内的空穴成对出现, 如图 1.5(d)所示, 这种现象称为受主电离。本征半导体所掺三价元素的数量虽微, 但晶体内空穴浓度却因此骤增(以半导体硅为例, 掺杂后空穴浓度可达 10^{21} 个/ m^3 量级, 相比之下, 在一定温度范围内, 本征激发所提供的本征载流子浓度可以忽略不计), 使其导电能力大大提高。由于这种掺杂半导体的导电能力主要取决于空穴载流子的浓度, 所以称之为空穴型半导体, 又叫 P 型半导体, 并称其中空穴为多数载流子(简称多子), 称其中自由电子为少数载流子(简称少子)。形成 P 型半导体的杂质又叫 P 型杂质。

在 P 型半导体中, 本征激发形成的自由电子和空穴成对出现, 受主电离形成的负离子和空穴成对出现, 所以这种掺杂半导体呈电中性; 其内部离子及载流子分布示意图如图 1.6(c)所示。

在同一块半导体中, 往往在同一区域既有 N 型杂质又有 P 型杂质, 这时半导体的类型由浓度大的杂质决定, 载流子浓度取决于两种载流子浓度之差。这种利用杂质相互补偿而改变掺杂半导体类型的过程, 称为杂质补偿作用。例如, 在本征半导体硅(锗)中掺入微量磷元素, 可以形成 N 型半导体, 如图 1.7(a)所示; 在此 N 型半导体局部区域掺入适量的硼元素, 可以使这个局部 N 型区变成 P 型半导体, 如图 1.7(b)所示; 在此 P 型半导体局部区域掺入适量的磷元素, 可以使这个局部 P 型区变成 N 型半导体, 如图 1.7(c)所示。于是, 得到了 N-P-N 三个区域紧密相邻的结构。

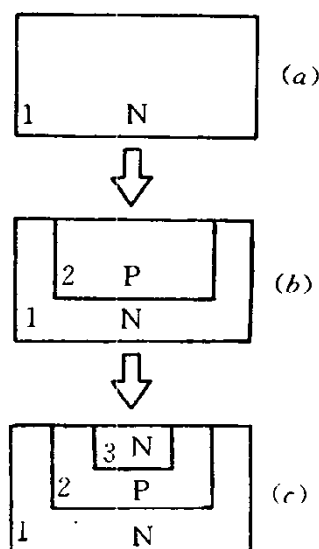


图 1.7 杂质补偿作用

- (a) N 型半导体;
- (b) 局部 N 型区变成 P 型半导体;
- (c) 局部 P 型区变成 N 型半导体

2) 掺杂半导体的导电特性

(1) 电阻率及其稳定性

在 N 型或 P 型半导体内, 多数载流子主要由掺杂形成, 其浓度远大于本征激发形成的载流子浓度。环境温度大于 50 K 时, 由于全部杂质都已电离, 所以多数载流子浓度变成几乎与环境温度无关的常数。在大于 50 K 的一定温度范围内, 掺杂半导体的导电能力主要取决于多数载流子浓度。因此, 和本征半导体比较, 掺杂半导体的电阻率小且受环境温度影响小。

(2) 电流类型

在两种情况下, 掺杂半导体内将形成两种不同类型的电流: 漂移电流和扩散电流。

漂移电流——载流子在电场作用下作定向运动, 称为漂移运动。载流子漂移运动形成的电流, 称为漂移电流(I_d)。掺杂半导体外加电压时, 半导体内形成电场, 见图 1.8, 自由电子从低电位向高电位漂移形成电子漂移电流 I_{nN} ; 空穴从高电位向低电位漂移形成空穴

漂移电流 I_{FP} ；总漂移电流 $I_t = (I_{FN} + I_{FP})$ 。在 N 型半导体中， $I_{FN} \gg I_{FP}$ ；在 P 型半导体中， $I_{FN} \ll I_{FP}$ 。综上所述，掺杂半导体内形成漂移电流的条件为：一要有载流子，二要有电场。

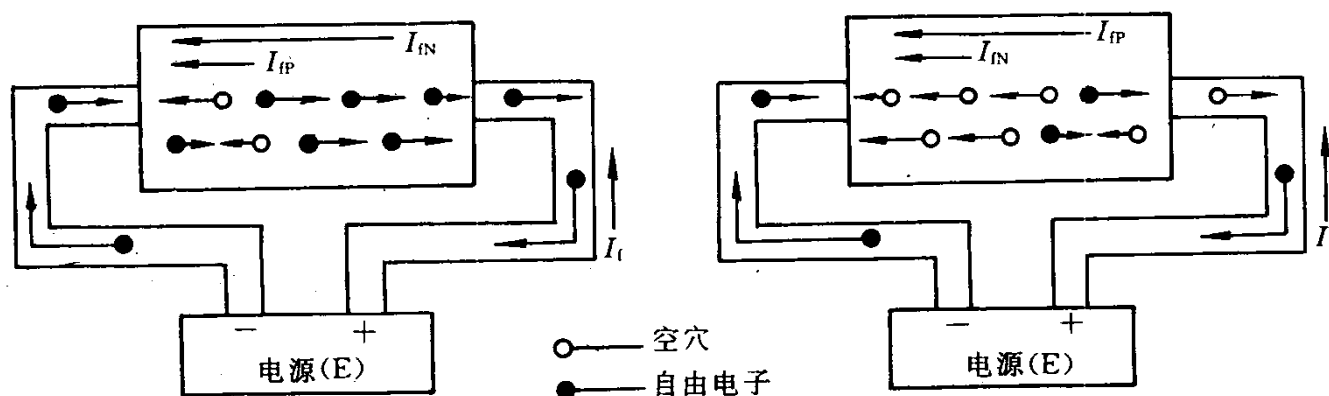


图 1.8 掺杂半导体中载流子的漂移运动示意图

扩散电流——物质由高浓度区域向低浓度区域运动叫扩散运动。物质浓度差的存在产生扩散力，浓度差越大则扩散力越大、扩散运动进行得越快。在掺杂半导体里，如果由于某种原因使同性载流子分布不均匀(见图 1.9)，载流子将由高浓度区域向低浓度区域扩散。载流子扩散运动形成的电流，叫扩散电流(I_d)。由图 1.9(a)可知，当 AA' 两边区域存在自由电子浓度差时，将形成电子扩散电流 I_{dN} ；由图 1.9(b)可知，当 AA' 两边区域存在空穴浓度差时，将形成空穴扩散电流 I_{dP} ；由图 1.9(c)可知，当 AA' 两边区域既存在自由电子浓度差又存在空穴浓度差时，将分别形成电子扩散电流和空穴扩散电流，两者方向相同，总扩散电流 $I_d = (I_{dN} + I_{dP})$ 。扩散电流的大小与同性载流子浓度差有关，同性载流子浓度差为零时扩散电流为零。综上所述，掺杂半导体内形成扩散电流的条件为：存在同性载流子浓度差。

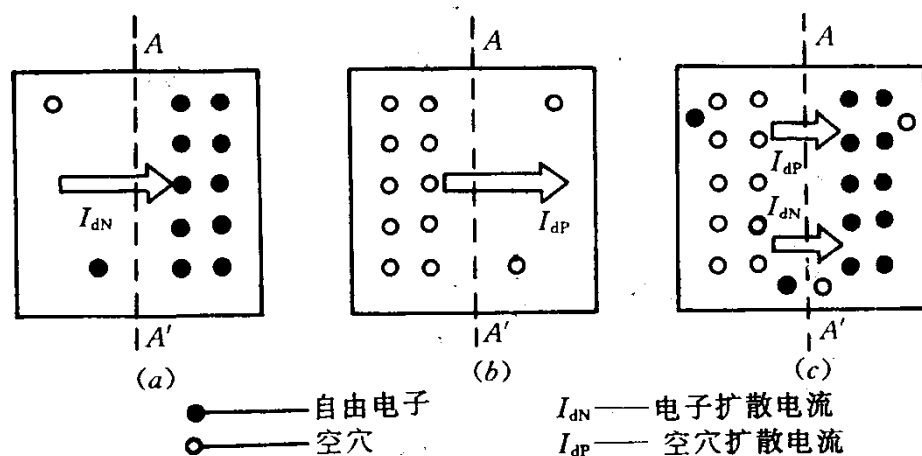


图 1.9 掺杂半导体中载流子的扩散运动示意图

(a) 电子扩散电流 I_{dN} ；(b) 空穴扩散电流 I_{dP} ；(c) I_{dN} 与 I_{dP} 同时存在

以上是按电流成因分类的。若按载流子种类分类，半导体内的电流可分为电子电流(I_{FN} 、 I_{dN})和空穴电流(I_{FP} 、 I_{dP})这两种。

3. 半导体的特性

半导体之所以能制成各种电子器件，是由于它具有以下几方面的特性。

掺杂特性——掺入微量杂质可使半导体的导电能力成百万倍地提高；掺入不同类型的杂质可使半导体导电类型不同。利用这一特性，可以制成各种不同性质、不同用途的半导体器件。

热敏特性——有些半导体的电阻率与环境温度关系极大，只要环境温度稍有变化，半导体的电阻率就明显改变。利用这一特性，可以制成热敏元件，如热敏电阻等。

光敏特性——有些半导体的电阻率与光照关系极大，在有光照与无光照，光照强与光照弱的不同条件下，半导体的电阻率相差很大。利用这一特性，可以制成光电元件，如光敏电阻等。

目前，制造各种半导体元件、器件除使用元素半导体外，化合物半导体也得到了广泛应用，如表 1.1 所示。

表 1.1 常用的半导体材料

半导体材料		应用实例	化学符号
元素	硅	二极管、三极管、集成电路、晶闸管	Si
	锗	二极管、三极管	Ge
	硒	整流器、光电池	Se
化合物	氧化铜	整流器、光电池	CuO
	铁、锰、钴、镍的氧化物	热敏电阻	
	硫化镉	光电管	CdS
	硫化铅	光电管	PbS
	砷化镓	发光二极管、光电二极管、微波用场效应管	GaAs
	磷化镓	发光二极管	GaP
	磷化铟	光电管	InP

1.1.2 PN 结及其特性

1. PN 结形成的物理过程

利用杂质补偿作用，采用适当的工艺方法，可以使 P 型半导体和 N 型半导体紧密相邻，如图 1.10(a)所示。截取包括 P、N 两区在内的一小块局部，放大后的示意图如图 1.10(b)所示。

从图 1.10(c)可看出，在 P 型区和 N 型区交界处，由于两侧同性载流子浓度差的存在，引起两区多子向对方区域扩散。在 P 型区一侧，由于空穴扩散到 N 区，剩下受主杂质的负离子，形成带负电荷的离子层；在 N 型区一侧，由于自由电子扩散到 P 区，剩下施主杂质的正离子，形成带正电荷的离子层。正、负离子层形成的偶电层称为 PN 结，又叫空间电荷区。空穴定向扩散运动所形成的空穴扩散电流 I_{dP} ，从 P 区流向 N 区；自由电子定向扩散运动所形成的电子扩散电流 I_{dN} ，从 P 区流向 N 区。总扩散电流 $I_d = (I_{dP} + I_{dN})$ 。在偶电层形

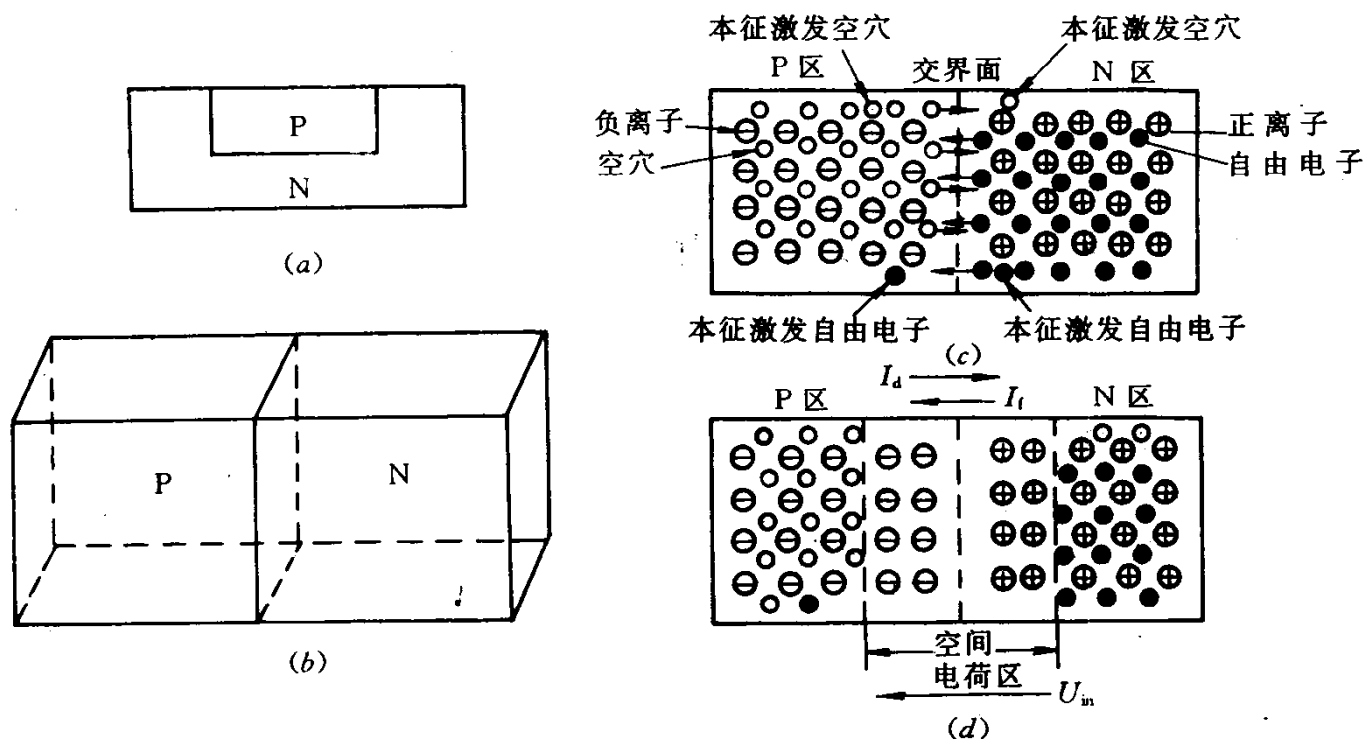


图 1.10 PN 结的形成

(a) P 型 N 型半导体；(b) P、N 两区局部放大；(c) 空穴与自由电子扩散；(d) 内建电位差 u_{in}

成过程中，正、负离子层之间建立起一个由 N 区指向 P 区的电场，称为内建电场，用相应的内建电位差 u_{in} 表示，如图 1.10(d) 所示。内建电场对于 P 型区和 N 型区中的多子扩散运动起阻碍作用。从两区多子开始扩散起，随着时间的延续，偶电层越来越宽，内建电场越来越强，扩散电流 I_d 便越来越小。

在内建电场作用下，P 型区和 N 型区的少子定向漂移形成漂移电流 (I_l)，从 N 型区流向 P 型区，与扩散电流 (I_d) 方向相反。从多子开始扩散起，随着时间的延续，内建电场越来越强，漂移电流绝对值越来越大，直到漂移电流与扩散电流大小相等，总电流为零。尽管总电流为零，但多子扩散运动与少子漂移运动依然存在，这种情况称为 PN 结的动态平衡。

动态平衡之后，偶电层宽度 (约几微米至几十微米) 及内建电场强度都稳定下来了，如图 1.10(d) 所示。内建电位差达到稳定值，即 $u_{in} = U_T$ ，其值与半导体材料种类、环境温度及掺杂浓度有关。以本征半导体硅为基础，经掺杂形成的 PN 结叫硅型 PN 结， U_T 值在常温之下约为 0.5~0.6 V；以本征半导体锗为基础，经掺杂形成的 PN 结叫锗型 PN 结， U_T 值在常温之下约为 0.1~0.2 V。当半导体材料和掺杂浓度一定时，硅型或锗型 PN 结的 U_T 值都随环境温度升高而下降，环境温度升高 1℃ 时 U_T 约下降 2 mV。

动态平衡之下，由于流过偶电层的总电流为零，偶电层内没有非平衡载流子存在，所以又称偶电层为载流子耗尽区。由于偶电层对多子扩散运动起阻碍作用，因此又称偶电层为阻挡层或位垒区 (势垒区)。

2. PN 结的单向导电性

在外加电源作用下，PN 结所在的 P 型半导体和 N 型半导体两区之间的电位差 U_{PN} ，叫作偏置电压，简称偏置。形成偏置电压的电源叫偏置电源。PN 结偏置状态有三种可能的情况，如图 1.11(a)(b)(c) 所示。PN 结导电能力随偏置状况不同而异。

(1) 零偏情况

不接外加偏置电源或使 $U_{PN} = 0 \text{ V}$ ，均属零偏，如图 1.11(a) 中①、②所示。动态平衡之下，流过 PN 结的总电流为零，内建电位差维持一定数值 U_T ，PN 结内部为耗尽区，其电阻率远远大于偶电层以外的 P 区和 N 区电阻率。整个半导体可等效为一个电位差等于 U_T 的电源与一个电阻值为 ∞ 的 R_{PN} 相串联，如图 1.11(a) 中③所示。零偏之下 PN 结处于截止状态。

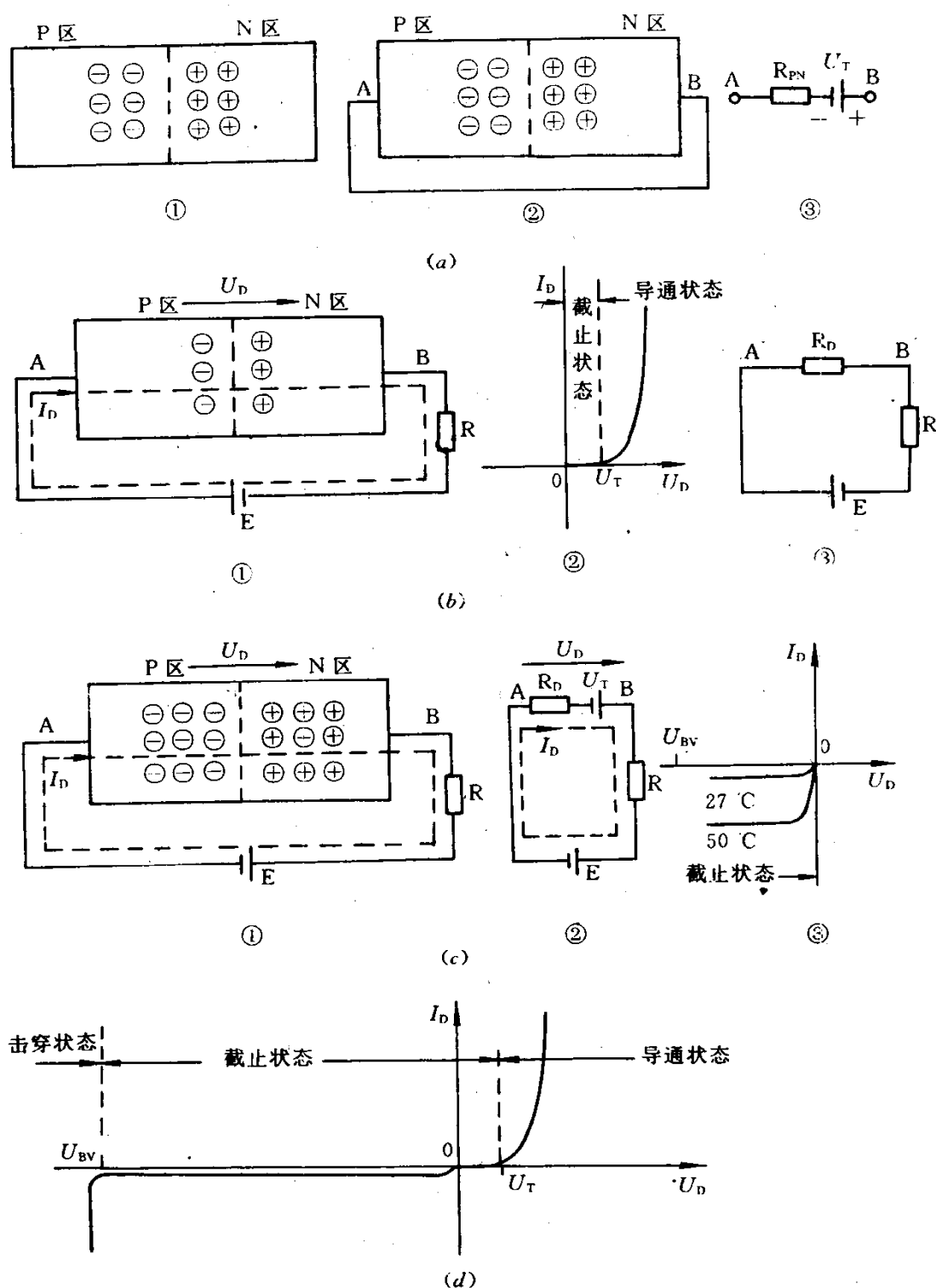


图 1.11 PN 结的单向导电性

(a) 零偏; (b) 正偏; (c) 反偏; (d) PN 结的伏安特性曲线

(2) 正偏情况

从图 1.11(b) 中①可看出，偏置电源 E 使 U_{PN} 和 U_{AB} 大于 0 V ，称为正偏。假设电源电压 U_E 值可调。电阻器 R 是限流用的外接元件。令 $U_D = U_{PN} = U_{AB}$ 。

当 $U_E = 0 \text{ V}$ 时, $U_D = 0 \text{ V}$, PN 结处于动态平衡状态, 用内建电位差 $u_{in} = U_T$ 表示内建电场的存在, 其方向由 N 区指向 P 区。 $U_E > 0 \text{ V}$ 时 $U_D > 0 \text{ V}$, 并在半导体内建立外加电场, 用外加电位差 $u_{ou} = U_{AB}$ 表示外加电场的存在, 其方向由 P 区指向 N 区。这时外加电场与内建电场的方向相反而互相抵消一部分, 合成电场比原来动态平衡时的内建电场减弱, 这意味着偶电层变窄, 动态平衡被打破, 多子扩散运动加强, 少子漂移运动减弱, 总电流 $I_D = (I_d - I_i)$ 大于 0, 其方向与扩散电流方向一致, 在半导体内从 P 区流向 N 区。该总电流 (I_D) 称为正向电流。半导体上的电压 $U_D = U_{AB} = (U_E - I_D R)^{\textcircled{1}}$, 称为正向电压降。随着外加偏置电源电压逐渐增大, U_D 随之增大, PN 结内合成电场越来越弱, 但只要 $U_D < U_T$, 合成电场便不为零, 并与内建电场方向一致, PN 结对多子扩散运动仍存在一定阻力。尽管扩散电流随正偏电压增大而增大, 因其值甚微, 使得正向电流 (I_D) 也不大, 正向电压降 $U_D = (U_E - I_D R) \approx U_E$ 。当 U_E 值增大到使 $U_D = U_T$ 时, 合成电场为零, 漂移电流为零, 扩散电流达到最大值, 但靠扩散运动形成的正向电流 (I_D) 值仍微小到近似为零。所以, 在正偏但 $U_D < U_T$ 的条件下, 可以近似认为 PN 结仍处于截止状态。

当外加电源电压增大到使 $U_D > U_T$ 时, 合成电场与原内建电场的方向相反, 与外加电场的方向一致, 于是偶电层作用消失, A、B 之间可等效为具有一定电阻率的导体。P 区、N 区多子在合成电场作用下作漂移运动, 总电流 (I_D) 随正偏电压 (U_D) 增大而增大, 这时 PN 结处于正向导通状态。正向电流 (I_D) 值决定于电源电压 (U_E)、半导体的体电阻 ($R_D = R_{AB}$) 及限流电阻 (R)。此时, $R_D = U_D / I_D$, 称为正向电阻, 一般为 Ω 数量级。正向电压降 U_D 的大小与材料及环境温度有关: 在一定的正向电流范围内, 硅型 PN 结的正向电压降近于常数, 典型值为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$; 锗型 PN 结的正向电压降随正向电流不同而异, 常温之下典型值为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。实验证明, 正偏之下的 $I_D = f(U_D)$ 函数图像如图 1.11(b) 中②所示。正向导通状态下的 PN 结等效电路, 如图 1.11(b) 中③所示。

(3) 反偏情况

从图 1.11(c) 中①可看出, 偏置电源使 U_{PN} 和 U_{AB} 小于 0 V , 称为反偏。假设电源电压 U_E 值可调。电阻器 R 是限流用的外接元件。令 $U_D = U_{PN} = U_{AB}$ 。

当 $U_E = 0 \text{ V}$ 时, $U_D = 0 \text{ V}$, PN 结处于动态平衡状态, 用内建电位差 $u_{in} = U_T$ 表示内建电场的存在, 其方向由 N 区指向 P 区。当 $|U_E| > 0$ 时, $U_D < 0$, 并在半导体内建立外加电场, 用外加电位差 $u_{ou} = U_{AB}$ 表示外加电场的存在, 其方向由 N 区指向 P 区。外加电场与内建电场方向一致, 合成电场比原来动态平衡时的内建电场加强, 这意味着偶电层变宽, 动态平衡被打破, 多子扩散运动减弱, 少子漂移运动加强, 总电流 $I_D = (I_d - I_i)$ 小于 0, 其方向与漂移电流方向一致, 在半导体内从 N 区流向 P 区。该总电流 (I_D) 称为反向电流。电压 $U_D = U_{AB}$ 称为反向电压降。随着偏置电源 $|U_E|$ 值由零逐渐增大, $|U_D|$ 也随之增大, PN 结内合成电场越来越强, 反向电流绝对值越来越大。当反向电压降绝对值 $|U_D|$ 增大到一定程度时 (约零点几伏), 扩散电流为零, 漂移电流达到最大值。以后尽管 $|U_E|$ 与 $|U_D|$ 在一定范围内继续增大, 在一定环境温度之下, 由于少子浓度一定, 使得反向电流绝对值不再随之增大, 且其值甚微, 称之为反向饱和电流 (I_R)。此时, $R_D = U_D / I_D$ 称为反向电阻, 一般为 $k\Omega$

① 表示元器件的字母均为正体, 但在公式中均为斜体。全书同。

或 $M\Omega$ 数量级。反偏之下，PN 结的等效电路如图 1.11(c) 中②所示，视反向饱和电流为零，则 $U_D \approx U_E$ 。

当反向电压一定时，反向电流绝对值随环境温度上升而增大，这是由于环境温度上升使本征激发加剧，少子浓度增大的缘故。实验证明，在一定的偏置电压范围内，反偏之下 $I_D = f(U_D)$ 的函数图像如图 1.11(c) 中③所示。

反偏之下，当偏置电源电压绝对值 $|U_E|$ 等于或大于某数量界限 U_{BV} 值时，反向电流绝对值将突然增大，使 PN 结处于击穿状态。上述 U_{BV} 值称为击穿电压。

(4) PN 结的伏安特性曲线

全面描述 PN 结在零偏、正偏、反偏三种情况之下 I_D 与 U_D 关系的函数图像，叫作 PN 结的伏安特性曲线，如图 1.11(d) 所示。

(5) 小结

综上所述 PN 结具有单向导电性，其含义有两点：第一，在 PN 结未击穿的前提下，外加同样绝对值的电压 U_D 时，正向电阻远小于反向电阻，正向电流远大于反向电流绝对值；第二，在 PN 结未击穿的前提下，外加偏置电压 U_E 大于内建电位差 U_T 时，PN 结导通； U_E 等于或小于 U_T 时，PN 结截止。

3. PN 结的击穿特性

由前所述， $|U_E| \geq U_{BV}$ 时 PN 结击穿，击穿电压 U_{BV} 值随材料及环境温度不同而异。产生击穿现象的原因，在于偶电层内突然生成大量的载流子。按具体原因击穿现象可分为电击穿与热击穿这两类；电击穿又细分为齐纳击穿和雪崩击穿两种。

(1) 齐纳击穿

制造 PN 结时，由于掺入杂质浓度很高，使得动态平衡之下的偶电层很窄，虽然只外加几伏特反偏电压，偶电层内电场强度却很高，足以把价电子拉出，产生大量“电子—空穴”对，发生击穿现象。

(2) 雪崩击穿

制造 PN 结时，由于掺入杂质浓度很低，使得动态平衡之下的偶电层较宽，在较高反向电压(绝对值)形成的强电场作用下，偶电层中作漂移运动的载流子获得较大能量，其中有些载流子与原子相撞并使价电子逸出，形成“电子—空穴”对。这些逸出的价电子成为自由电子，在强电场作用下又与其它原子相撞，如此循环下去，偶电层内的自由电子和空穴像雪崩似地骤增，发生击穿现象。

(3) 热击穿

PN 结发生电击穿后，突然增大的反向电流流过具有一定电阻值的 PN 结，PN 结由于消耗电能而发热。如果在电路中串入适当阻值的限流电阻，使 PN 结功耗不超过允许值，待反向电压撤销或减小后，PN 结的特性能够恢复正常。如果不接入限流电阻或者限流电阻的阻值太小，PN 结功耗超过允许值，PN 结大量发热并促使“电子—空穴”对进一步增多，产生恶性循环，导致 PN 结永久性损坏，这种现象叫热击穿。电击穿是非破坏性的击穿；热击穿是破坏性击穿。在电路中串入适当阻值的电阻器，可以避免电击穿转化为热击穿。

4. PN 结的电容效应

在零偏或反偏且未击穿的条件下，PN 结内部为耗尽区，相当于介质；PN 结以外的 P

型区和 N 型区, 相对于耗尽区来说具有良好的导电性。由此可见, PN 结与平行板电容器的结构类似, 如图 1.12(a) 所示, 可见 PN 结具有电容效应。PN 结所具有的等效电容称为结电容 C_j , 又叫势垒电容, 其大小正比于偶电层有效面积(S), 反比于偶电层宽度(d)。偶电层宽度随偏置电压(U_D)不同而异。结电容(C_j)随偏置电压(U_D)相应变化, 如图 1.12(b) 所示。

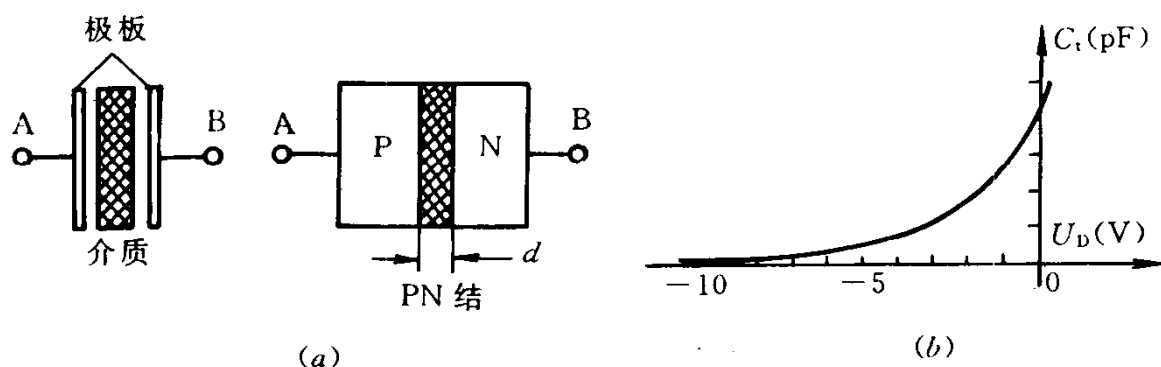


图 1.12 PN 结的电容效应

(a) PN 结与平行板电容器结构; (b) 结电容与偏置电压关系

综上所述, PN 结的电特性表现为单向导电性、击穿特性及电容效应这三个方面。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管及其伏安特性

半导体二极管是以一个 PN 结为管芯, 从 P 型区、N 型区分别引出正、负极引线, 外面封装管壳制成的, 其结构示意图如图 1.13(a) 所示。在原理电路图中, 二极管用图形符号表示, 箭头所指方向为正向电流方向, 如图 1.13(b) 所示。二极管的文字符号用 V 或 V_D 表示。

半导体二极管的电特性与 PN 结的电特性相同。表示二极管电特性的方法有三种: 一是伏安特性曲线, 二是参量, 三是解析式。流过二极管的电流(I_V)与其偏置电压(U_V)之间的函数关系曲线, 叫做二极管的伏安特性曲线, 简称伏安特性。 I_V 、 U_V 之正方向的规定如图 1.13(b) 所示。各种二极管的伏安特性曲线形状大同小异, 举例如图 1.13(c) 所示。

从图 1.13 上可以看出:

① 零偏之下二极管截止, PN 结处于动态平衡状态。

② 正偏之下, 决定二极管处于截止或开始导通的正偏电压, 称之为二极管的阈电压 U_T 。二极管充分导通时的正偏电压 U_V , 称为二极管的正向电压降或管压降。在一定正向电流范围内, 常温之下, 普通小功率硅型二极管管压降的典型值约为 0.6~0.8 V; 锗型二极管管压降的典型值约为 0.2~0.3 V。在一定正向电流之下, 一般要求二极管的管压降越小越好。分析电路时, 当管压降 U_V 远小于偏置电源电压时, 可近似认为 U_V 为零, 显然也近似认为阈电压 U_T 为零。正偏之下, 二极管的伏安特性曲线近似为一条按指数律变化的曲线。

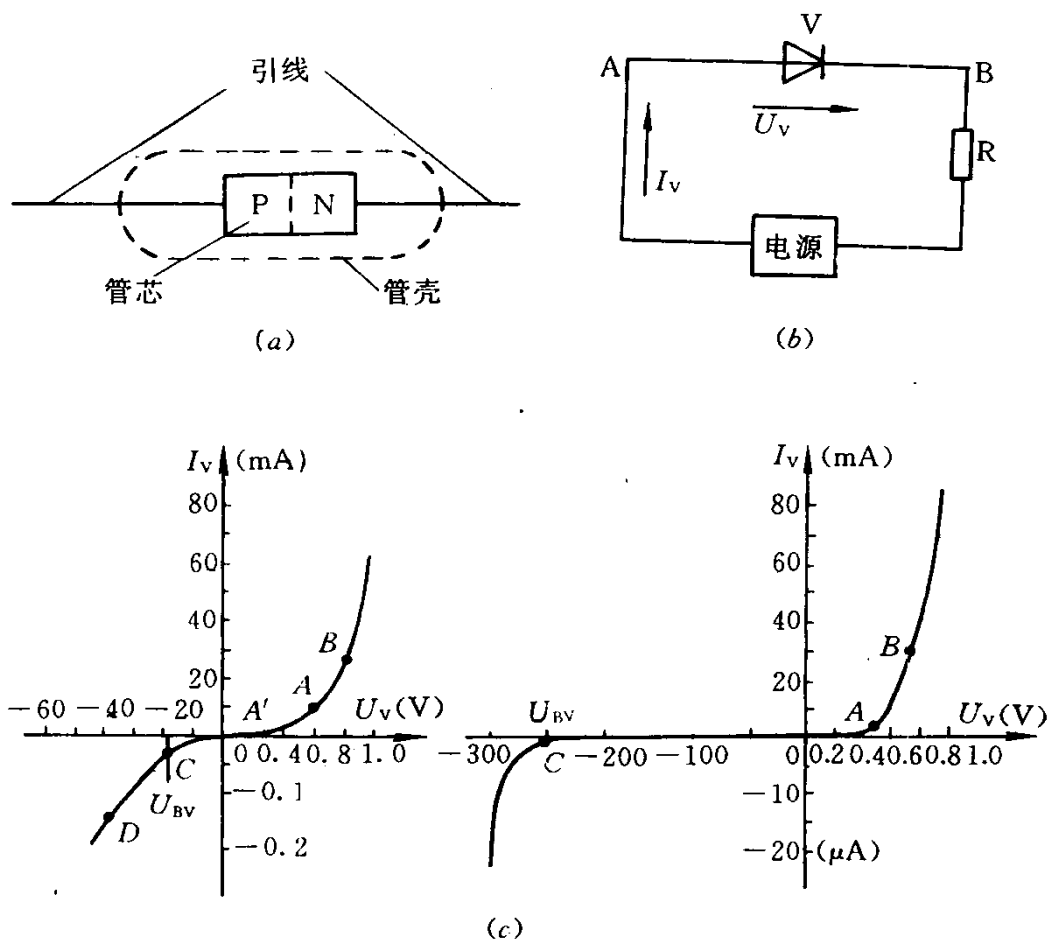


图 1.13 二极管结构示意图及其伏安特性曲线

(a) 二极管结构示意图；(b) 二极管图形符号；(c) 二极管的伏安特性曲线

③ 反偏之下，外加偏置电压绝对值 $|U_{\text{外}}|$ 小于 U_{BV} 时，反向电流一定，称为二极管的反向饱和电流 (I_{R})，其值很小 (小功率硅管为 1 至几十微安，锗管为几十微安至几毫安)，且随环境温度上升而增大，称二极管处于截止状态。 $|U_{\text{外}}| \geq U_{\text{BV}}$ 时，反向电流骤增，二极管处于击穿状态。

综上所述，二极管处于三种可能工作状态的条件和特点如表 1.2 所示。

表 1.2 二极管处于不同工作状态的条件和特点

工作状态	条 件	特 点
截止	$U_{\text{V}} < U_{\text{T}}$ 、 $ U_{\text{V}} < U_{\text{BV}}$	$I_{\text{V}} \approx 0$
正向导通	$U_{\text{V}} > U_{\text{T}}$	I_{V} 大、 R_{V} 小
击穿	$ U_{\text{外}} \geq U_{\text{BV}}$	$ I_{\text{V}} $ 大、 $ U_{\text{V}} \approx U_{\text{BV}}$

1.2.2 二极管的主要参数

表示二极管电特性和极限使用条件的物理量，称为二极管的参数。

1. 直流参数

偏置电源为直流电源时，在直流工作条件下二极管的参数，叫直流参数，又叫静态参数。