

# 模拟集成电路基础

高等学校试用教材

北方交通大学 冯民昌 主编

模拟集成电路基础

中

454  
-061

社

高等学校试用教材

# 模拟集成电路基础

北方交通大学 冯民昌 主编

上海铁道学院 聂美声 主审

中国铁道出版社

1991年·北京

## 内 容 简 介

本书共分十二章，主要内容包括晶体管的基本特性、集成电路的主要特点、基本放大电路与分析方法、恒流源偏置及有源负载、负反馈放大器、集成宽带放大器、集成差分放大器、集成功率放大器、集成运放原理及应用、电子噪声、场效应管及其放大电路、MOS 模拟集成电路、半导体光电器件原理及应用。为了便于教学，每章都附有小结、思考与练习题。全书内容以集成电路为主，兼顾分立元件电路。

本书为高等工科院校通信、电子及自动控制专业的通用技术基础课教材，也可作为电子技术领域中工程技术人员的自学参考书。

高等学校试用教材

### 模拟集成电路基础

北方交通大学 冯民昌 主编

\*

中国铁道出版社出版  
(北京市东单三条14号)

责任编辑 倪嘉寒 封面设计 王毓平  
中国铁道出版社发行 各地新华书店经售  
中国铁道出版社印刷厂印

---

开本：787×1092mm 1/16 印张：19.75 字数：498 千

1991年3月 第1版 第1次印刷

印数：1—5000册

---

ISBN 7-113-00924-7/TN·38 定价：4.30元

# 前 言

本书是根据国家教委工科电子课程指导委员会制订的“高等工业学校电子线路I”教学基本要求编写的。内容包括常用半导体器件及各类放大电路，它是针对高等院校通信、电子及控制专业的需要，着重基本概念、基本原理和基本分析方法。是一本电子技术基础课的通用教材。

在电路结构上，以集成电路为主兼顾了分立元件电路，以便适应目前集成电路大量推广使用的客观形势。

在内容安排上以电路的基本原理与分析为主，器件部分比较精简，为了教与学的方便，本书没有将器件集中到一章而是采取管与路结合的方式把晶体管、集成电路、场效应管、光电器件分散在第一、八、九和十二等章中。这样做有助于初学者较快地从电路的要求理解器件特性和参数的实际意义。

为了让读者对模拟集成电路有较为全面的了解，书中引入了14种单片集成电路，考虑本教材的重点放在集成电路的应用方面，因而对这些集成芯片的内部电路突出了定性分析，以便达到正确使用目的。

本教材适合于80~90学时课程。在章节安排上注意了适应不同层次学生的要求，如教材前九章为基础内容，后三章的内容可以选学。各章中也有一些选学内容，可以根据学时多少适当的选择。

电子电路是一门实践性很强的技术学科，有关实验内容另有实验课安排，按教委教学大纲的要求，有关稳压电源的理论学习内容均放在实验课中进行。

本书的先修课为《电路分析》及《信号与系统》。本书是第一门电子电路教材，与本书配套的还有《模拟集成电路系统》和《数字电路》两本教材。

本书由冯民昌主编。参加本书编写的有：兰州铁道学院董保生（第十二章）；北方交通大学徐启明（第九、十、十一章）、冯民昌（第一、二、三、四、五、六、七、八章）。书中有一部分内容取材于北方交通大学卢淦主编的《低频电子电路》（中国铁道出版社1986年3月出版）并经过适当精选和加工。

本书承上海铁道学院聂美声老师主审，纠正了书中的差错。兰州铁道学院、上海铁道学院、西南交通大学、北京工业大学、北京邮电学院、北京理工大学、北京联大电子工程学院及北方交通大学微电子学科组的许多老师参加了审稿会议，他们对初稿提出了宝贵意见，特此一并致谢。

# 目 录

<b>第一章 半导体器件</b> .....	1
第一节 半导体的基础知识.....	1
第二节 PN结与晶体二极管.....	5
第三节 晶体三极管.....	14
第四节 集成化元、器件及其特点.....	23
本章小结.....	27
思考与练习题.....	27
<b>第二章 小信号放大电路分析</b> .....	30
第一节 放大电路的工作原理.....	30
第二节 放大电路的分析方法.....	34
第三节 共集放大电路.....	43
第四节 共基放大电路.....	45
本章小结.....	48
思考与练习题.....	48
<b>第三章 偏置电路、有源负载及耦合方式</b> .....	51
第一节 放大器工作点的稳定问题.....	51
第二节 恒流源电路.....	54
第三节 采用有源负载的共射电路.....	58
第四节 级间耦合方式.....	61
本章小结.....	63
思考与练习题.....	63
<b>第四章 负反馈放大器</b> .....	66
第一节 反馈的基本概念.....	66
第二节 负反馈放大器的分类.....	68
第三节 负反馈对放大器性能的影响.....	74
第四节 负反馈放大器的方框图分析法.....	82
第五节 单片集成负反馈放大器.....	90
本章小结.....	91
思考与练习题.....	92

<b>第五章 集成差分放大电路</b> .....	96
第一节 差分放大电路的工作原理.....	96
第二节 集成差分放大电路 .....	102
第三节 差放的传输特性及失调参数 .....	108
本章小结.....	111
思考与练习题 .....	112
<b>第六章 集成宽带放大器</b> .....	114
第一节 频率响应的分析方法 .....	114
第二节 晶体三极管的高频运用 .....	122
第三节 集成宽带放大电路分析 .....	127
第四节 阻容耦合放大电路的低频响应 .....	137
第五节 多级放大器的闭环稳定性 .....	140
本章小结.....	145
思考与练习题 .....	146
<b>第七章 集成功率放大器</b> .....	149
第一节 概    述 .....	149
第二节 甲类功率输出级 .....	150
第三节 乙类功率输出级 .....	153
第四节 甲乙类功率输出级 .....	156
第五节 集成功放典型电路 .....	158
本章小结.....	162
思考与练习题 .....	163
<b>第八章 集成运算放大器及其应用</b> .....	165
第一节 通用型集成运放 .....	165
第二节 集成运放参数及相位补偿技术 .....	169
第三节 专用集成运放的典型产品 .....	175
第四节 集成运放的理想模型和宏模型分析法 .....	179
第五节 基本运算电路 .....	191
第六节 电压比较器 .....	200
第七节 波形发生器 .....	204
第八节 集成运放的其它应用电路 .....	207
本章小结.....	216
思考与练习题 .....	217
<b>第九章 场效应管及其基本放大电路</b> .....	220
第一节 MOS场效应管.....	220

第二节 结型场效应管 .....	226
第三节 场效应管的主要参数和微变等效电路 .....	230
第四节 场效应管基本放大电路 .....	234
本章小结 .....	241
思考与练习题 .....	241
<b>第十章 MOS模拟集成电路 .....</b>	<b>245</b>
第一节 MOS模拟集成单元电路 .....	245
第二节 MOS集成运算放大器 .....	256
第三节 MOS模拟开关及开关电容电路 .....	261
本章小结 .....	269
思考与练习题 .....	269
<b>第十一章 集成放大电路的噪声 .....</b>	<b>273</b>
第一节 噪声概述 .....	273
第二节 电子器件及集成放大电路的噪声 .....	277
第三节 低噪声运放 .....	284
本章小结 .....	285
思考与练习题 .....	285
<b>第十二章 光电器件原理及其应用 .....</b>	<b>287</b>
第一节 光电二极管、光电三极管的工作原理及其应用 .....	287
第二节 发光二极管的工作原理及其应用 .....	299
第三节 光电耦合器的工作原理及其应用 .....	303
本章小结 .....	308
思考与练习题 .....	308

# 第一章 半导体器件

自从1904年发明了最简单的真空二极管（亦称电子管）以来，电子器件已经经历了几代发展。1948年创制出第一只晶体三极管，它是用半导体材料制成的，又称为半导体器件，相继又研制出许多类型的半导体器件（如场效应晶体管等），它是第二代电子器件。

由各种晶体管和常用电阻、电容等元件组成的电子电路称分立电路，目前的分立式电子电路是把许多电子器件和元件焊接在一块印刷电路板上。这种由分立元、器件与印刷电路板作为基本单元的电子仪器和设备，由于焊接问题、安装问题、器件参数分散性问题和调试问题等因素，使电子设备在运用过程中造成一些故障，影响了产品和设备的可靠性。

五十年代末研制出集成电路，称为第三代电子器件。它是把许多晶体管和电阻等元件制造在一块硅晶片上，集成电路不仅体积小、重量轻、功耗小而且工作可靠性高，因而引起人们极大的重视。近二十年来集成电路得到飞速发展，例如集成电路的集成度（指单位芯片面积上包含有元、器件的数目）由小规模（SSI）、中规模（MSI）发展到大规模集成电路（LSI）。近几年超大规模集成电路（VLSI）出现称为第四代电子器件，它可以在几十平方毫米芯片面积上集成上百万个元、器件，从而将器件、电路与系统融合于一体，成为一个集成电子系统。例如彩色电视机集成组件和通信系统集成组件等。

目前采用集成组件的电子设备中经常还需要配合应用一些分立元、器件，以便获得特殊用途或更为灵活的功能；同时可以弥补目前集成电路在功率、频率特性等方面存在的不足之处。

从器件原理和电路原理来看，分立元、器件及其电路仍然是集成电路的基础。因此本章首先介绍半导体的基础知识、PN结以及晶体二极管、三极管的原理，然后介绍集成电路元、器件的特点。为了便于教学安排，有关场效应晶体管和光电晶体管的内容将在以后章节中进行介绍。

## 第一节 半导体的基础知识

### 一、半导体的特性

晶体二极管、三极管和场效应管、集成电路等器件均由半导体材料制成，因此什么是半导体以及半导体具有什么性能？这是首先要了解的。

物体按导电能力可以分为导体、半导体和绝缘体三类。日常生活中接触到的金、银、铜、铝等金属都是良好的导体，它们的电导率在 $10^5\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 量级。而另一些物质如橡皮、塑料、云母、陶瓷等很不容易导电，因此称为绝缘体，它们的电导率在 $10^{-22}\sim 10^{-14}\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 量级。半导体的命名是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，它的电导率在 $10^{-9}\sim 10^2\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。常用的半导体有锗、硅和砷化镓等。

半导体在现代之所以得到广泛的应用，不在于它的导电能力处于导体和绝缘体之间，而是因为它具有一系列特殊的性能：



1. 半导体的电导率可以随加入的杂质作明显的改变。例如在室温 $30^{\circ}\text{C}$ 时，纯锗中掺入一亿分之一的杂质（称掺杂），其电导率将增加几百倍。正因为掺杂可以改变和控制半导体的电导率，才能利用它制造出各种不同的半导体器件。

2. 温度可以明显地改变半导体的电导率，利用这种热敏效应可以制成热敏元件，但另一方面，热敏效应使半导体器件的热稳定性下降，因而在半导体器件组成的电路中，采用了温度补偿及稳定参数的各种措施。

3. 光照不仅可以改变半导体的电导率，还可以产生电动势，这就是半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光敏电阻，光电晶体管、光电耦合器和光电池等。光电池已在空间技术中得到广泛的应用，为人类利用太阳能提供了广阔的前景。

## 二、本征半导体

纯净的结构完整的半导体称为本征半导体。毫无杂质的锗或硅单晶属于本征半导体。

### (一) 硅和锗晶体的共价键结构

在晶体中，原子之间的距离靠得很近，它的外层电子不仅受到本原子的作用，还要受到相邻原子的作用，产生了轨道的交叠。由原子理论知道，当原子的外层电子有八个时才处于稳定状态，硅和锗的原子只有四个外层电子，因此在组成单晶时，每个原子都要从四周相邻原子取得四个价电子，以组成稳定状态。这样，每两个原子都共用一对价电子，形成共价电子对，这种结构称为共价键结构。如图 1—1 所示。

### (二) 两种载流子——电子和空穴

上述共价键内的两个电子称为“束缚电子”。在绝对温度 $T=0\text{K}$ 和无外界其他因素激发时，价电子（最外层电子称价电子）全部束缚在价带，导带是空的。在室温时（ $T=300\text{K}$ ），少数价电子受热得到能量，当价电子获得的动能等于或大于禁带宽度 $E_G$ 时，价电子受激发而跃迁到导带成为可以参与导电的自由电子，价带中缺少了电子，留下的空位称为“空穴”，如图 1—2 (a) 表示。电子和空穴有以下特点：

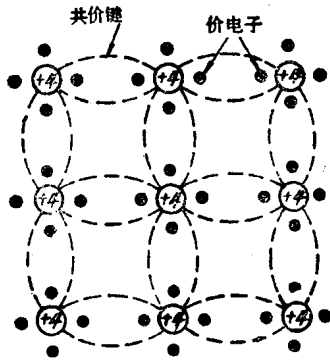


图 1—1 共价键结构

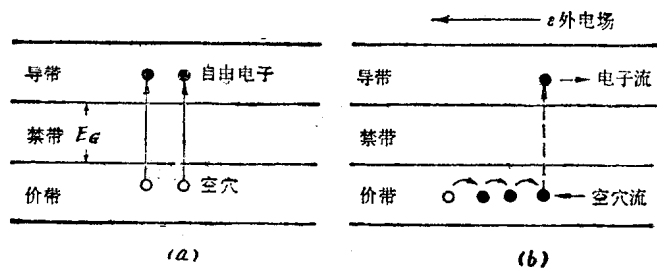


图 1—2 两种载流子

1. 自由电子是一种载运电流的粒子，称为载流子，它在外电场 $e$ 作用下，产生定向运动称“电子流”，电子流的方向与外电场的方向相反。

2. “空穴”带正电，它也是一种载流子，这是半导体所特有的一种载流子。在外加电场 $e$ 作用下，价带中邻近原子的价电子，可挣脱共价键的束缚，跃入原有的空位，从而产生空位定向转移。这种依靠束缚电子由一处依次填补到另一处的定向移动称空穴流。空穴流的

方向与外加电场的方向相同，如图 1-2(b)所示。

3. 在外电场作用下，空穴始终在价带内运动，而自由电子始终在导带内运动。电子流与空穴流的方向相反但其电流方向却是一致的。我们把载流子在电场作用下产生的定向运动称为漂移运动。

4. 在本征半导体中，电子和空穴是成对产生，因为价带中的电子跃迁到导带，产生一个自由电子就必然出现一个空穴，形成了电子——空穴对。下面我们来计算本征半导体中产生电子——空穴对的数目。

### (三) 载流子的浓度

若用  $n$  表示单位体积的自由电子数目， $n$  称为电子浓度。用  $p$  表示单位体积的空穴数目， $p$  称空穴浓度。在本征半导体中电子和空穴的浓度分别用  $n_i$  和  $p_i$  表示。其数值可由下式计算：

$$n_i = A_0 T^{3/2} e^{-E_{G0}/2KT} \quad (1-1)$$

式中  $A_0$ ——与半导体材料有关的常数，硅  $A_0 = 3.87 \times 10^{16}$ ，锗  $A_0 = 1.76 \times 10^{16}$ ；

$E_{G0}$ ——0K时的禁带宽度（以eV电子，伏特表示），硅的  $E_{G0} = 1.21\text{eV}$ ，锗的  $E_{G0} = 0.785\text{eV}$ ；

$T$ ——绝对温度（以K表示，0K = -273℃）；

$K$ ——玻兹曼常数 ( $K = 8.6 \times 10^{-5}\text{eV/K}$ )。

由上式可见，本征半导体的自由电子浓度  $n_i$  与温度和禁带宽度有关，温度升高和禁带宽度较小都有利于电子跃迁。使自由电子浓度增加。由于本征激发产生的电子与空穴数目相同。因此，本征半导体的空穴浓度  $p_i = n_i$ 。

温度对本征半导体的载流子浓度有很大影响，对于晶体管半导体器件，温度变化引起  $n_i$  和  $p_i$  的变化，会使器件参数变化，这在晶体管电路中是要特别引起注意。

### (四) 载流子的产生和复合

上述电子浓度  $n_i$  是动态平衡时的数值。实际上，半导体中载流子的产生就伴随着它们的消失。这是两个相反的过程。价带中的电子跃迁到导带产生了电子——空穴对。导带中的电子受原子核的吸引还会回到价带，并与空穴“复合”，使自由电子和空穴同时消失。

若用  $g$  表示载流子的产生率，它是每秒成对产生的电子或空穴浓度；用  $R$  表示载流子的复合率，它是每秒复合的载流子浓度。起初，产生率大于复合率，载流子浓度相对在不断增加，随着载流子数目的增加，复合的机会也随之增加，一直发展到载流子的产生率与复合率相等，这时载流子浓度保持在一定的数目，并处于一种动态平衡状态。

动态平衡时  $g = R$ ，载流子浓度  $n_i$  固定不变，而复合率  $R$  与电子浓度  $n_i$  和空穴浓度  $p_i$  的乘积成正比，可以证明

$$R = r \cdot n_i \cdot p_i \quad (1-2)$$

式中  $r$ ——称复合率系数，是和半导体材料有关的系数。

## 三、杂质半导体

在本征半导体中，人为地掺入少量其他元素（称杂质），可以使半导体的导电性能发生显著的改变。利用这一特性，制成了人们所期望的各种性能的半导体器件。

掺入杂质的半导体称杂质半导体，根据掺入杂质的性质不同，可分为两种：电子型半导体即N型半导体和空穴型半导体即P型半导体。

### (一) N型半导体

在本征半导体中掺入少量的五价元素，可以构成N型半导体，常用的五价元素有磷、砷和锑。若在锗晶体中掺入少量的砷原子，如图1-3(a)所示，掺入的砷原子取代了某些锗原子的位置。砷原子有五个价电子，其中四个与相邻锗原子结合成共价键，余下的一个不在共价键之内，砷原子对它的束缚力较弱，因此只需得到极小的外界能量，这个电子就可激发成为自由电子。由于砷原子很容易贡献出一个自由电子故称为“施主杂质”。

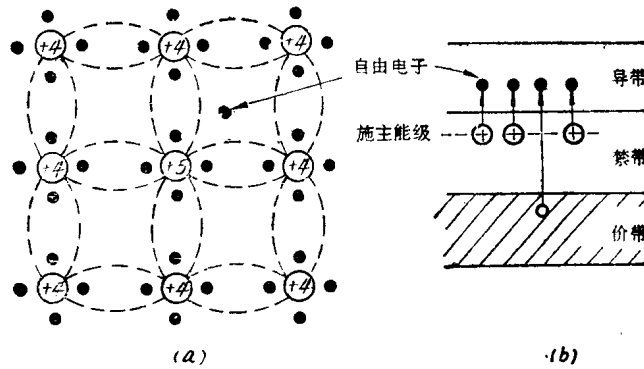


图1-8 N型半导体

砷原子贡献出一个电子后，砷原子本身因失去电子而成为正离子，但并不产生新的空穴，这与本征半导体成对产生载流子有截然不同之处。

在N型半导体中，除了由本征激发产生的电子——空穴对，又增加了大量的由砷原子贡献的自由电子。这种杂质半导体将以自由电子导电为主〔1〕，所以N型半导体中自由电子称为“多数载流子”（简称多子），而空穴称为“少数载流子”（简称少子）。

### (二) P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素，可以构成P型半导体。常用的三价元素有硼、铝和镉，如图1-4所示。若在锗晶体中掺入少量镉原子，则镉原子的三个价电子只能和相邻的三个锗原子结合成共价键，而与第四个相邻锗原子组成的共价键并不完整，产生了一个价电子的空位，这个空位极易接受邻近锗原子共价键中的电子，使镉原子成为不能移动的负离子，而邻近锗原子因缺少一个电子，产生一个空穴。由于锗原子的价电子容易跳到镉原子的空位上，镉原子起着接受一个电子的作用，故称“受主杂质”。

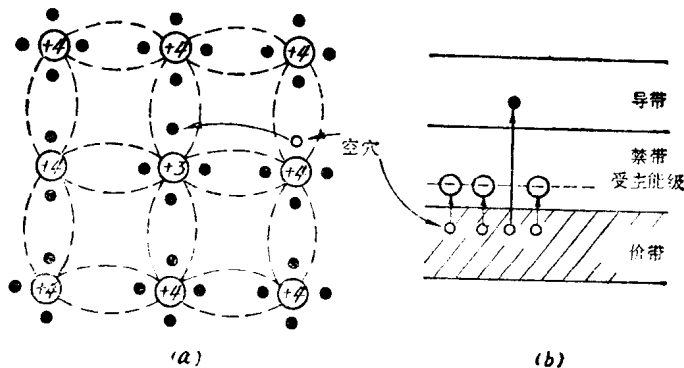


图1-4 P型半导体

〔1〕由于电子带负电，N是Negative（负）的字头，故名为N型半导体。

在P型半导体中，除了由本征激发产生的电子——空穴对，又增加了大量的由铟原子贡献的空穴。这种杂质半导体，将以空穴导电为主<sup>[1]</sup>，所以P型半导体中空穴称为“多数载流子”，而电子则成为“少数载流子”。

(三) 杂质半导体的载流子浓度

在杂质半导体中，尽管杂质含量很少，但通常由杂质原子贡献的载流子数目远大于本征载流子浓度。例如在常温300K时，锗的本征载流子浓度 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ ，锗的原子密度为 $4.4 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ ，若掺入砷原子是锗原子密度的万分之一，则施主杂质浓度 $N_D$ 可计算得

$$N_D = 10^{-4} \times 4.4 \times 10^{22} = 4.4 \times 10^{18}/\text{cm}^3$$

可见由杂质提供的载流子数值比 $n_i$ 大十万倍。在这种情况下，杂质半导体的多数载流子浓度，主要由施主杂质浓度决定。即：对于N型半导体，电子浓度（多子） $n_n$ 可近似为 $n_n \approx N_D$ ， $N_D$ 为施主杂质浓度。对于P型半导体，空穴浓度（多子） $p_p$ 可近似为 $p_p \approx N_A$ ，式中 $N_A$ 为受主杂质浓度。在正常掺杂情况下，由于锗或硅的原子密度远大于杂质浓度，所以可近似认为载流子的产生率 $g$ 和复合率系数 $r$ 保持不变。因此，对杂质半导体来说仍然保持 $n \cdot p = n_i \cdot p_i = n_i^2$ 。可以证明：

对于N型半导体

$$\begin{aligned} n_n \cdot p_n &= n_i^2 \\ n_n &\approx N_D \\ p_n &= \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{aligned}$$

对于P型半导体

$$\begin{aligned} n_p \cdot p_p &= n_i^2 \\ p_p &\approx N_A \\ n_p &= \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \end{aligned}$$

由上述公式可见，对于杂质半导体由于多数载流子浓度比本征载流子浓度 $n_i$ 或 $p_i$ 大得多，而少子浓度要比本征载流子浓度小得多，但是两者之乘积保持不变，并等于 $n_i^2$ 。

## 第二节 PN结与晶体二极管

### 一、PN结的基本原理

PN结是晶体二极管，晶体三极管和其他半导体器件的基本结构，因此在半导体器件中占有非常重要的地位。

#### (一) PN结的形成

PN结是由P型和N型半导体通过一定的方式结合而成，所谓一定的结合方式是指并非简单地将两块半导体接触在一起，而是在一块完整的晶体上，利用掺杂的方法，使晶体内部形成相邻接的P型和N型半导体的结合。为了说明形成的过程，我们首先了解一下结合以前P型和N型半导体的情况。如图1—5(a)所示。在不计本征激发时，P型和N型半导体处处呈电中性，即导电的载流子必然与带电离子成对地出现。对于P型半导体，空穴数等于带负电的受主离子数。对于N型半导体，电子数等于带正电的施主离子数。

结合以后，交界面两边的载流子浓度有很大的差别，载流子要从浓度大的区域向浓度小的区域扩散，称载流子的扩散运动。P区存在大量多子空穴，必然向空穴浓度很小的N区扩散；同理，N区存在大量多子电子也必然向电子浓度很小的P区扩散。扩散到对方的载流子

[1] 由于空穴带正电，P是Positive(正)的字头，故名为P型半导体。

又成为对方的少子，很快就被复合掉。因此在交界面两边很窄的区域内，将留下不能移动的正、负离子。交界面左方，留下负离子，右方留下正离子，于是在交界处形成了缺少载流子的空间电荷区称为耗尽层。这就是PN结，如图1—5(b)所示。在交界面两边的正负离子形成一个内建电场，其方向由右向左。显然，该电场要阻止双方载流子的继续扩散。在开始扩散时，内建电场较小，阻止扩散的作用较小；扩散继续进行，内建电场增加，阻止扩散也逐渐加大，达到动态平衡时，交界面两边的电荷量不再变化，内建电场也达到一定值。

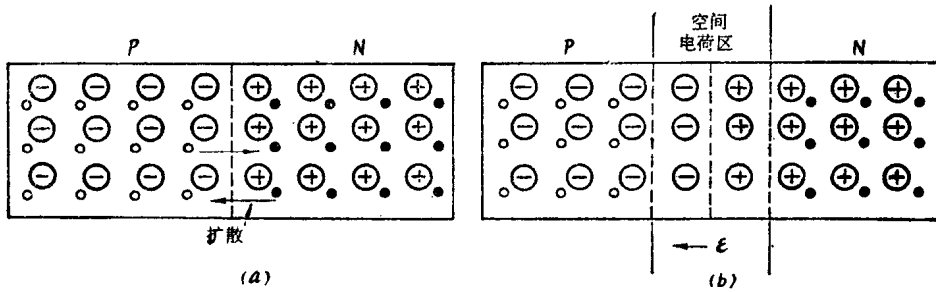


图1—5 PN结形成  
(a) 载流子的扩散；(b) 平衡状态下的PN结。

扩散只是PN结的一种现象。PN结还有另一种现象，就是少子在电场作用下的漂移运动。上述内建电场阻止多子扩散运动的进行，却要引起少子漂移运动，如N区少子空穴，只要接近耗尽层，就会被内电场吸引而拉到对方的P区中去，产生漂移电流。

因此，在动态平衡时，当P区空穴向N区扩散，产生空穴扩散电流的同时，就有一个数量相等的空穴漂移电流由N区流向P区，两者数量相等，方向相反。同理电子扩散电流也必然被电子漂移电流抵消。因此动态平衡时，流过PN结的总电流为零。

### (二) PN结的接触电位

内建电场在PN结中产生的电位差，称接触电位 $V_{\phi}$ ，它主要由半导体材料和掺杂浓度决定，一般硅的 $V_{\phi}=0.7V$ 左右；锗的 $V_{\phi}=0.2V$ 左右。N区的电位比P区高，好象壁垒一样，它要阻止P区空穴向N区扩散，如图1—6(a)所示，所以 $V_{\phi}$ 又称“电位壁垒”（简称位垒）。

P型与N型半导体结合成PN结后，它的能带状态也引起变化。图1—6(b)所示为PN结的简化能带图，图中只画出能带图的导带底和价带顶。图中空穴能量与电子能量方向相反。形成PN结后，P区的电子能量高于N区，高出的数值为 $qV_{\phi}$ ，其中 $q$ 是电子电荷量。因此N区电子向P区扩散，受到了阻力，只有克服位垒的阻力才能达到P区。

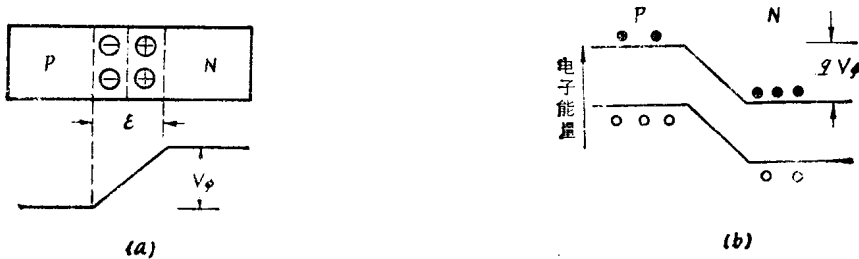


图1—6 PN结的电位  
(a) PN结的接触电位；(b) PN结的能带图。

(三) PN结的单向导电性

什么是PN结的单向导电性？我们先观察一个实验现象。如图1-7所示。当电池E与PN结正向连接时（P型部分接电池正极，N型接电池负极），电路内电流I很大，PN结呈电阻很小。反之当电池与PN结反向连接时（P型区接电池负极，N型区接正极），电路内电流I很小，称为反向饱和电流，PN结呈大电阻。这一物理现象称PN结的单向导电性。



图1-7 PN结连接方式 (a) 正向连接, (b) 反向连接。

下面进一步讨论这一现象。

1. PN结加正向电压

图1-8所示为PN结加正向直流电压的情况，假设PN结中已没有载流子，所以电阻率很高，而呈电中性的P区或N区存在大量载流子，电阻率较低，可以认为外加电压V全部落在PN结两端。在正向电压作用下，位垒高度将由原来的 $qV_p$ 减小为 $q(V_p - V)$ 。位垒的减少使多子更容易向对方扩散，所以扩散电流增加，PN结产生了正向电流。加大外加电压V，位垒更低，扩散电流更大，故正向电流随外加电压V增加而增大。

在这种情况下，由少数载流子形成的漂移电流，其方向与扩散电流相反，但和正向电流相比较，其数值很小，一般都可忽略不计。

2. PN结加反向电压

图1-9所示为PN结加反向电压的情况，在反向电压作用下，位垒高度将由原来的 $qV_p$ 增加到 $q(V_p + V)$ 。由于位垒高度增加，于是多子向对方的扩散减少。在这种情况下，漂移电流超过了扩散电流，PN结产生了反向电流。反向电流是由少子的漂移引起，其数值远小于正向电流。

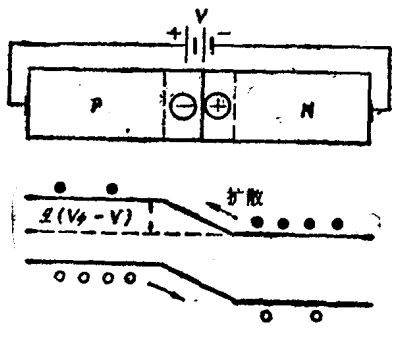


图1-8 加正向电压时载流子的运动

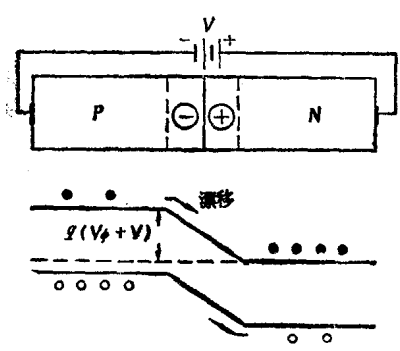


图1-9 加反向电压时载流子的运动

在一定温度时，由于热激发所产生的少子浓度数量是一定的，只要外加电压所产生的外电场足以把它们吸引过来形成电流，继续增加外加电压时，电流的数值趋于一恒定值，称此电流为反向饱和电流并用 $I_s$ 表示。

## 二、PN结的电流方程

上述定性讨论了PN结在外加电压下的电压与电流关系。由半导体物理可以推导出PN结两端电压与流过PN结电流的关系式称PN结的电流方程，电流  $I$  与外加电压  $V$  的关系式如下：

$$I = I_s(e^{V/V_T} - 1) \quad (1-3)$$

式中  $I_s$  即为反向饱和电流； $V_T = kT/q$  称等效电压， $k$  是玻兹曼常数，在温度  $T = 300\text{ K}$  时， $V_T \approx 26\text{ mV}$ 。

当外加正向电压时，一般  $V \gg V_T$ ，因此正向电流可近似表示为

$$I = I_s e^{V/V_T} \quad (1-4)$$

当外加反向电压时，一般  $e^{V/V_T} \ll 1$ ，因此反向电流近似为

$$I \approx -I_s \quad (1-5)$$

## 三、晶体二极管的伏安特性

晶体二极管实际就是一个PN结，两端加上接触电极，引出线和管壳构成。它的结构示意图如图 1—10 (a) 所示，它的电路符号如图 1—10 (b) 所示，图中箭头表示正向电流的流通方向。

### (一) 理想伏安特性

伏安特性就是指二极管两端的电压和流过二极管电流之间的关系曲线。

二极管的理想伏安特性，可由PN结电流方程式 (1—3) 表示，即

$$I = I_s(e^{V/V_T} - 1)$$

由上式可描绘出外加电压与流过二极管电流之间的关系曲线如图 1—11 所示。由图可见，外加正向电压时，电流  $I$  呈指数增长，外加反向电压时，电流  $I \approx -I_s$ ，其值基本不变。

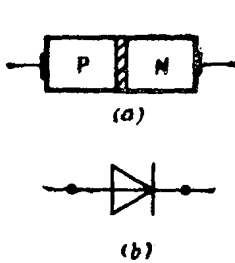


图 1—10 晶体二极管  
(a) 结构示意图；(b) 电路符号。

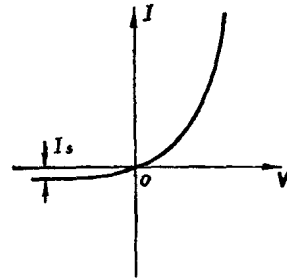


图 1—11 二极管的理想伏安特性

### (二) 晶体二极管的实测伏安特性

实际晶体二极管的伏安特性可用图示仪测量，也可用逐点描绘法进行测量。图 1—12 所示是逐点测量晶体二极管伏安特性的原理电路，测量时将直流电源  $E$  从零开始逐点增加，同时相应测量管子两端的电压和流过管子的电流，便可以测得一组数据，根据测试数据绘成伏安特性曲线如图 1—13 所示。

实际测得的晶体二极管伏安特性与上述理想伏安特性有几点差别：

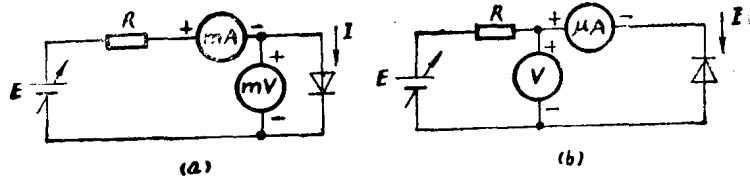


图 1-12 测量二极管伏安特性电路  
(a) 正向特性; (b) 反向特性。

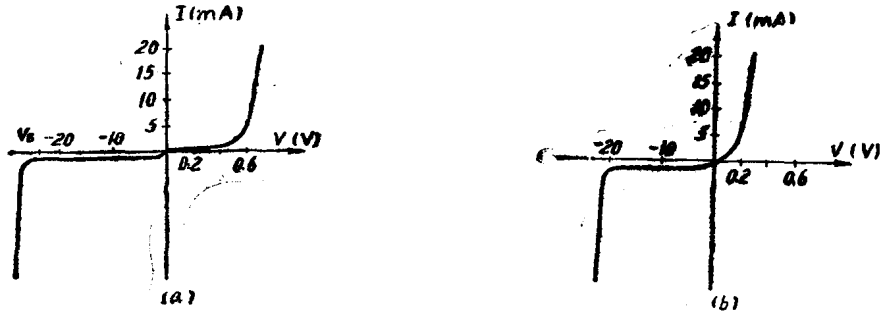


图 1-13 实测二极管伏安特性  
(a) 硅二极管; (b) 锗二极管。

1. 在正向伏安特性的起始部分, 由于正向电压较小, 外电场还不足以克服 PN 结内电场, 这时正向电流几乎为零, 二极管呈现出一个大电阻, 好象有一个门坎称为“门限”电压, 硅管的“门限电压” $V_F = 0.5 \sim 0.6V$ ; 锗管的门限电压 $V_F = 0.1 \sim 0.2V$ 。当正向电压大于门限电压时, 内电场被大大削弱, 正向电流随正向电压迅速增加。

2. 加反向电压时, 反向电流数值很小。在同样温度下, 硅管的反向电流比锗管小许多。锗管的反向饱和电流在 $\mu A$ 数量级; 硅管的反向电流在 $nA$  ( $10^{-9}A$ ) 数量级。反向电流实际还包含了二极管的漏电流, 它随电压有微量增加。

3. 当反向电压高达某一数值时, 反向电流激增, 称为“反向击穿”, 该电压称为反向击穿电压 $V_B$ 。反向击穿时, 产生很大的反向电流, 一方面破坏了二极管的单向导电性, 另一方面容易烧坏管子。一般情况下(如用作整流)是不允许进入击穿范围的。关于二极管的击穿现象下面要进一步讨论。

#### 四、晶体二极管的电阻

普通电阻元件, 其阻值 $R$ 是常数, 即电阻两端电压与流过电阻的电流保持线性关系, 称这类电阻为线性电阻。

对于晶体二极管, 由二极管伏安特性可知, 二极管是一非线性元件。即二极管两端电压与流过二极管的电流呈非线性关系, 二极管的电阻随工作电流而变化称非线性电阻。

非线性电阻通常需用直流电阻 $R$  (又称静态电阻) 和交流电阻 $r$  (又称动态电阻或微变电阻) 来进行描述。

##### (一) 直流电阻

二极管两端直流电压 $V_D$ 与电流 $I_D$ 之比定义为直流电阻 $R$

$$R = \frac{V_D}{I_D} \quad (1-6)$$



由图 1—14 所示，加正向电压  $V_D$ ，流通电流  $I_D$ ，由  $V_D$  和  $I_D$  决定工作点  $Q$ 。原点  $O$  与  $Q$  点连成一条直线，由几何关系可知：

$$\tan \alpha = \frac{I_D}{V_D} = \frac{1}{R}$$

- 可见：（1）原点  $O$  与  $Q$  点连线的斜率的倒数就是正向电阻  $R$ 。  
 （2）直流电阻与工作点  $Q$  有关，工作点不同，直流电阻值也不同。  
 （3）加反向电压时，电流很小，因而反向直流电阻值很大。



图 1—14 二极管的正向直流电阻

（二）怎样确定工作点  $Q$

图 1—15 (a) 所示为简单二极管电路，它由电源  $E_D$ 、负载电阻  $R_L$  和二极管  $D$  构成，试求回路电流  $I_D$  和二极管直流电阻  $R$ 。

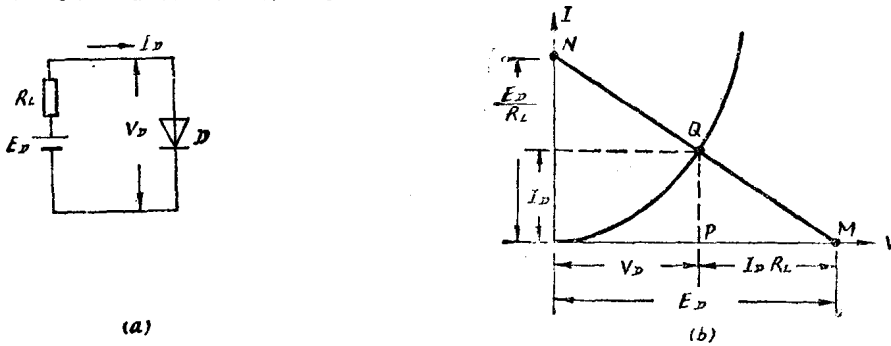


图 1—15 简单二极管电路分析

由于二极管的直流电阻与工作点  $Q$  有关，所以首先要确定二极管的工作点  $Q$ ，通常可采用图解法：

由电路可列出方程

$$V_D = E_D - I_D R_L \quad (1-7)$$

式中  $V_D$  与  $I_D$  分别表示二极管两端直流电压和流过二极管的电流，它们两者之间的函数关系可由伏安特性曲线表示

$$I_D = f(V_D) \quad (1-8)$$

图解法就是用作图来求解上述两个方程之解。先画出方程式 (1—8)，它是二极管伏安特性曲线。方程式 (1—7) 是一条直线，我们任取两点就可连成一直线。

令  $I_D = 0$ ，则  $V_D = E_D$ ，得到点  $M$ ；

令  $V_D = 0$ ，则  $I_D = E_D / R_L$ ，得到点  $N$ 。