

[美] A·E·菲茨杰拉德 戴维·E·希金博特姆 阿尔文·格拉贝尔 著

基本电工学

中 册 (电 子 学)

南京航空学院电工教研室 译
孙 希 鲁 主译

人民教育出版社

本书是根据美国 McGraw-Hill 图书公司 1975 年出版的 A·E·Fitzgerald 教授等著 Basic Electrical Engineering 第四版翻译的。该书自 1945 年第一版出版后,一直为美国大学电工学课程较为流行的教材之一。全书共十七章,其中一至六章为电路基础理论,七至十二章为电子学,十三至十七章为电机和控制系统。中译本按此三大部分分上、中、下三册出版。

中册为电子学部分,包括:电子器件的物理基础,电路模型及其应用,单级电子电路,多级放大电路,频率的产生、选择和变换,脉冲和数字电路。

本书系统新颖,内容丰富,叙述简明,注重物理解释,内容安排灵活,便于读者根据不同需要选用。

本书可供大学电工学教师、非电专业学生以及有关科技人员参考。

基 本 电 工 学

中 册

(电 子 学)

A·E·菲茨杰拉德

[美] 戴维·E·希金博特姆 著

阿尔文·格拉贝尔

南京航空学院电工教研室 译

孙 希 鲁 主译

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

人 民 教 育 出 版 社 印 刷 厂 印 装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.75 字数 234,000

1981 年 6 月第 1 版 1982 年 6 月第 1 次印刷

印数 00,001—16,500

书号 15012·0334 定价 1.00 元

中 册 目 录

第七章 电子器件的物理基础	1
7-1 电子学的性质	1
7-2 电子器件	2
7-3 半导体	7
7-4 电荷流动过程	9
7-5 结型二极管	11
7-6 二极管电路的图解分析	15
7-7 结型晶体管的特性	21
7-8 结型晶体管的图解分析和偏置	28
7-9 场效应管的特性	36
7-10 场效应管的图解分析和偏置	41
7-11 可控硅	46
7-12 集成电路	48
习题	53
第八章 电路模型及其应用	62
8-1 结型二极管的等效电路	62
8-2 低频共发射极等效电路	67
8-3 高频晶体管模型	70
8-4 场效应管的等效电路	75
8-5 双口网络	80
8-6 波特图	91
8-7 渐近波特图	94
8-8 器件参数的测定	100
习题	103
第九章 单级电子电路	110
9-1 共发射极放大级	110
9-2 射极电阻无旁路情况下的放大级	123
9-3 共源极放大级	126

9-4 射极跟随放大器和源极跟随放大器	131
9-5 偏置的稳定	137
习题	145
第十章 多级放大电路	153
10-1 级联联接的晶体管放大器	153
10-2 级联放大器的频率响应	161
10-3 场效应管级联放大器	171
10-4 加宽频带的方法	180
10-5 差动放大器	184
10-6 运算放大器	188
10-7 放大器的特性和表示方法	191
10-8 传递函数和方框图	195
10-9 反馈放大器的几个一般特性	198
10-10 典型的反馈放大器的组态	202
10-11 反馈放大器的稳定性	208
习题	213
第十一章 频率的产生、选择和变换	223
11-1 频域中的信号处理	223
11-2 正弦波振荡器	225
11-3 RC 调谐振荡器	226
11-4 LC 调谐振荡器	230
11-5 选频放大器	235
11-6 调谐放大器	236
11-7 采用 RC 反馈放大器的频率选择	241
11-8 调制和检波	245
11-9 模拟计算机用的电路	247
习题	250
第十二章 脉冲和数字电路	256
12-1 时域中的信号处理	256
12-2 二极管整形电路	259
12-3 简单的晶体管和场效应管开关	262

12-4 多谐振荡器	267
12-5 开关速度特性	277
12-6 扫描电路	277
12-7 二进制	281
12-8 逻辑门	283
12-9 二进制运算电路	292
习题	297
部分习题答案	303

第七章 电子器件的物理基础

在前面关于电路分析的几章中,受控电源是作为一个基本电路元件介绍的。用来提供受控电源特性的各种器件构成了大多数电子线路的基础。本章的目的是介绍为了解这些器件的作用所必需的物理概念。因为在电子线路中,半导体器件起着主要作用,所以本章只叙述这些器件,而且将重点放在结型晶体管、场效应管及结型二极管的特性和作用方面。应用半导体的电气性能来阐述电子器件对恒定和时变两种激励的响应。其中,恒定激励的响应给出直流特性或静态特性,而时变激励的响应给出交流特性或动态特性。

7-1 电子学的性质

电子学是电工学的一个分支,它广泛地论述用电磁能传输和处理信息。之所以用电磁能是由于它使用方便,传输迅速而且比较容易,其有关部件的大小通常也是合适的。

信息传输是通讯、控制和计算等各种不同领域都具有的共同特征。信息可能仅仅是一个热电偶的输出,用它激励一个继电器,使锅炉开始工作,这种技术经常用于家庭和工业的温度控制系统。另一方面,在电视广播系统中,所处理的是从演播室发出的音频和视频信息。另一个例子是用于指挥航天器开动其返回火箭的信息,这里所用的复杂信号是以计算机处理的数据为基础的。

通常,原始信息和输出端所要求的信息必须变换成电磁能,或者作相反的变换。这个变换过程必须由能够同时保持信息内容和在使用电磁能方面具有优点的电子器件和电路来完成。在演播室中,送话器和电视摄象机内的光导摄象管将声和光的信息变换成

电信号,而在观看节目的地方,由扬声器和阴极射线显象管完成相反的变换。各种控制和计算系统则是利用热电偶、光电池一类的光电器件以及测速仪等来完成变换过程的。

信息一旦成为电磁能的形式以后,还必须予以处理以实现系统所期望的目标。例如,热电偶输出的能量如果不足以驱动继电器,就要用放大器把能量提高到所要求的电平。同样,为了调谐到一个特定的电视频道,必须要把所需的信号从其它频道的信号中分离出来。这一滤波的过程只允许需要传输的频率成份通过这系统,这样所起的作用就是选择性。

处理过程往往包括产生为完成一定的电子功能所需要的新的信息,而这些电子功能正是系统有效地工作所必不可少的。用来使电视系统的音频和视频部分同步的信号,以及调定时间程序以开动宇宙飞船返回火箭所用的信号,都是一些必须产生新信息的例子。

在处理过程中,所要求的能量大小本身并不是处理结果,而只是保证达到所要求的目标所要考虑的问题。这样,从电子学观点来看,一艘小船上的雷达系统和从月亮上发回信号的兆瓦系统有几乎相同的特征。所需要的能量的差别决定于系统的射程,而不是决定于电子技术的处理方法。电子技术的处理方法要用到各种器件及其有关电路的信号传输特性。

显然,电子学研究的领域有两个方面。一个是电子器件的作用原理和电路特性,另一个是关于电路功能和适合于传送所需信息的系统。

7-2 电 子 器 件

大多数电子器件的功用是提供受控电源的特性,而差不多每个电子电路都要利用受控电源的电路特性。为了了解这些器件的

作用,先来研究最常用的电路特性是有好处的。

这些特性中的第一个在图 7-1 中说明,图中用具有四个端子的电路元件来描述电压控制电流源。输入端 1-1' 提供控制电压 V , 而输出端 2-2' 呈现强度为 gV 的电流源的作用。参数 g 的单位以西门子表示,它把电流源的强度与控制电压联系了起来。由于 g 表示输入量和输出量之间的关系,通常称它为跨导(转移电导)。

端子 1' 和 2' 通常可以是公共的,如图 7-1 中虚线所示。因此,只需用三个端子就可以表示作为电路元件的受控电源。应

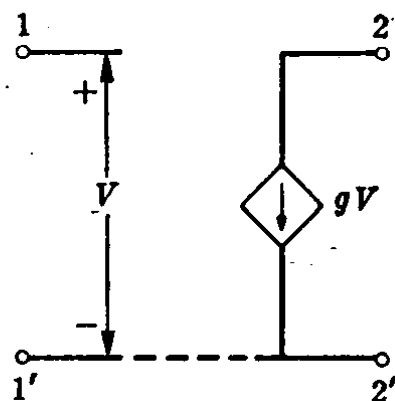


图 7-1 理想电压控制电流源的示意图

用三端或四端元件的好处是:控制端连接的元件与受控电源连接的元件可以分隔开来。可以认为,受控电源能提供“远距作用”,以致各种电路元件实际上可以不相连接。

电路的第二个有用特性是:电路的各个部分也是能够隔开的。图 7-2a 所示是一个受控电源,其输入和输出端分别具有外加激励信号 V_s 和 I_o 。电阻 R_s 和 R_o 是与 V_s 和 I_o 相关联的电源内阻,而 R_L 表示负载电阻。所要求的响应是控制电压 V 和负载电压 V_L ,这两个电压可应用叠加原理求得。由 V_s 所产生的 V 和 V_L 用图 7-2b 所示的电路来确定,而由 I_o 所产生的 V 和 V_L 则用图 7-2c 中的电路来求得。

将克希荷夫电压定律应用于图 7-2b 的输入电路,得

$$-V_s + I_s R_s + V = 0$$

因为 1-1' 端是开路的, I_s 为零,所以 $V = V_s$ 。

将克希荷夫电流定律应用于输出端,则

$$gV + \frac{V_L}{R_L} + \frac{V_L}{R_o} = 0$$

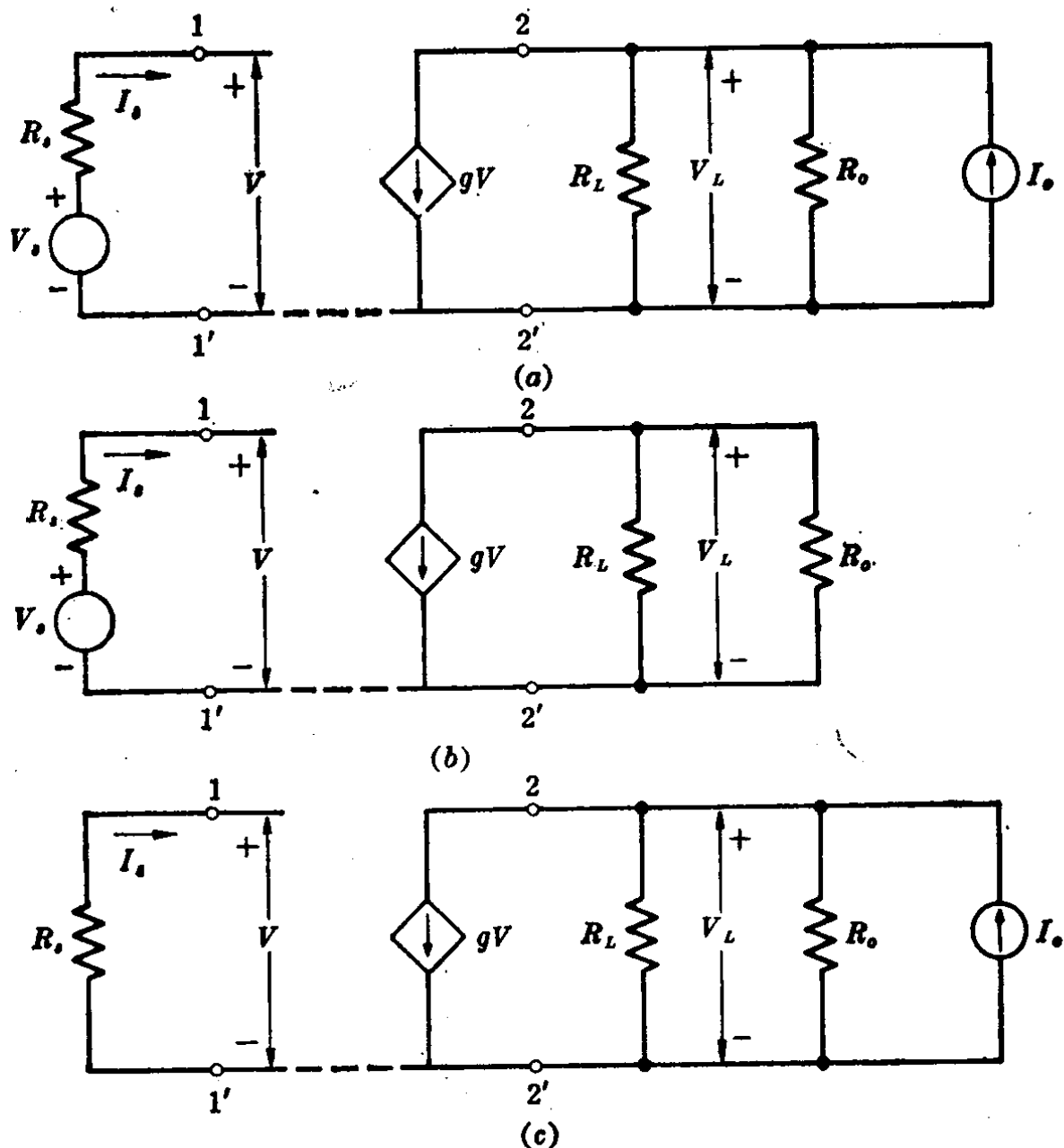


图 7-2 (a) 在输入和输出端具有外加激励的电压控制电流源；
(b) 研究 V_s 作用的图 7-2a 的电路图；(c) 研究 I_o 作用的图 7-2a 的电路图

由于 $V = V_s$, V_L 为

$$V_L = \frac{-gV_s}{1/R_o + 1/R_L}$$

在图 7-2c 中, 输出端的 KCL 方程为

$$-I_o + \frac{V_L}{R_L} + \frac{V_L}{R_o} = 0$$

由上式可得

$$V_L = \frac{I_o}{1/R_o + 1/R_L}$$

输入端的 KVL 表达式为

$$I_s R_s + V = 0$$

然而, 由于 1-1' 端是开路的, I_s 为零, 因此 V 也为零。

V 和 V_L 的总的响应是 V_s 和 I_o 所产生的响应之和, 为

$$V = V_s, \quad V_L = \frac{I_o - gV_s}{1/R_o + 1/R_L}$$

分析这些响应说明, V_L 取决于 V_s 和 I_o , 而 V 仅取决于 V_s 。 V_s 在输入端的作用已通过受控电源传送到输出端。但 I_o 的作用并没有通过受控电源从输出端传送到输入端, I_o 和输入端在电路上是隔离的。这个结果说明了一个事实, 即电信号只能在一个方向上通过受控电源传播, 并且方向是从控制端到电源端的。只能在一个方向上传输的电路和器件称为单向电路和器件。

电路的第三个并且是最重要的特性, 用图 7-3 电路的 P_L 与 P_s 作比较来说明, P_L 是负载 R_L 所消耗的功率, P_s 是电源 V_s 所供给的功率。输入回路的 KVL 方程是

$$-V_s + I_s R_s + V = 0$$

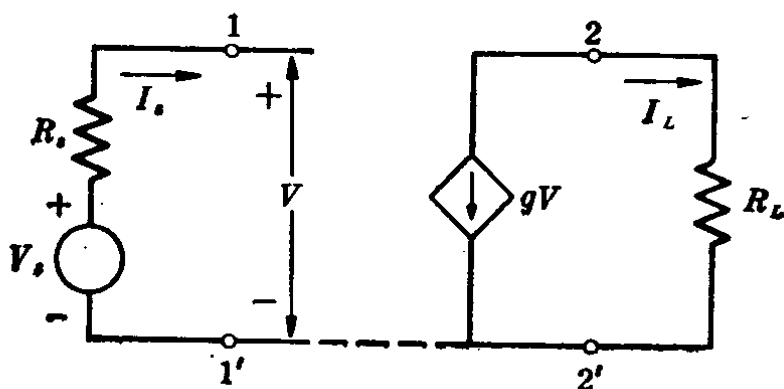


图 7-3 有激励和负载的电压控制电流源

端子 1-1' 是开路的, I_s 为零, 从而 $V = V_s$, 且 $P_s = I_s V_s = 0$ 。 P_L 的值由 $I_L^2 R_L$ 给出, 其中 I_L 为 gV_s , 因此 P_L 等于 $g^2 R_L V_s^2$ 。由于

P_L 不为零而 P_s 为零, 所增加的能量必须由受控电源来提供。 P_L 大于 P_s 这个事实是重要的, 它说明, 相对于电路某一处的信号能量, 受控电源能使电路中另一处的信号能量增加。此外, 可以实现用小能量来控制大能量。这种电路特性(通常用功率增益来描述)是电子放大器的基础。如果没有这种放大作用, 大多数电子系统在使用上就要大受限制, 或者不切实际以致没有用处。

外加的能量称为偏置能量, 一般加在提供受控电源特性的具体器件上。在大多数电子器件中, 用直流(恒定)电源提供偏置能量; 相反, 信号能量则是由强度随时间变化的电源供给的。受控电源输出端信号能量的增加是从供给器件的偏置能量得来的。

为了了解各种电子器件是如何提供受控电源特性的, 需要知道各种材料中所发生的物理现象和电学现象。同样, 必须研究供给器件的能量的大小和形式, 以及器件对它的响应。此外, 还需要说明与大多数电子器件有关的一般性质和术语。

一切电子器件的基本原理是控制带电粒子的流动。把信息内容转换成电磁能, 以形成用于控制电荷流动的信号。构成大多数器件的基础是:

- 1 可移动的带电粒子源
- 2 根据信息内容控制粒子流的手段
- 3 为完成所要求的功能, 收集带电粒子并最后提取信息的手段

器件内具有上述一项或多项物理性能的一部分称为电极^①。通常是把这些电极封入金属、玻璃或陶瓷壳体内, 然后通过壳体的引出线进行电的连接。以固体作为流过带电粒子的介质(在此施加控制)的器件称为固体器件。

① 这里的电极是我们通用的区的意思——译者注。

二极管是两个端线的电子器件。只有在器件和外电路接通并有能量供给时,电荷流动才会发生。粒子流的控制是用加到二极管两端的外部电压来完成的。

在三个电极的器件中,例如在结型晶体管和场效应晶体管中,有两个电极和在二极管中的作用一样。当各端线与外电路接通时,就可产生电荷流动。主要给电路供应能量的电源连接在其中两个电极上,控制作用除了由电源电路作用外,还要由接到第三个电极上的外电路来完成。在晶闸管以及其他专用器件中,都用了三个以上的电极,加进另外的电极是为了获得想要的特有性能。

使用一个给定的器件,需要了解产生终端特性的物理现象。重点放在终端特性上是很重要的,因为端线是其它电气元件能够连接上去的唯一地方,也是可以进行测试的唯一地方。

一般说来,供给器件的能量有直流(恒定)和交流(时变)两种。大部分直流能量是由主电源(偏置电源)供给,并建立有效地利用器件所需要的特定的工作电压和电流。交流能量通常包含信息,并产生反映受控电荷流作用的电压和电流。因此,器件中的电压和电流包含直流和时变两个分量。在本章及以后的四章中,为了方便,经常是分别确定各个分量。直流或静态特性通常用一条或数条伏安特性曲线来描述,这些特性曲线表示了器件端电压和电流间的关系。交流或动态特性通常用称为等效电路或电路模型的一些电路元件来研究,这些将在第八章中阐述。

7-3 半 导 体

半导体是电阻率介于导体和绝缘体之间的固体。在许多电子器件中,半导体提供可移动的电荷,构成电流通过并受控制的介质。硅(Si)和锗(Ge)是最常用的半导体,两者均为四价,并具有与钻石相似的晶体结构。因此,在晶体中的价电子和原子之间存在

着强大的束缚力。在纯净的状态下，没有异种原子带来的化学杂质，也没有结构的不完善，这些材料称为本征半导体。

尽管锗和硅晶体是不带电的，但施加一定形式的能量，就会产生可移动的电荷而不妨碍整个系统的电中性，这种可移动的电荷称为载流子。在本征半导体中，可移动的电荷往往是借助于与大于 0°K 的温度有关的热能来克服束缚力而产生的。在这个过程中，产生空穴和电子两种载流子。一旦一个键被打断，一个价电子便自由运动。在晶体中一处键上的电子挣脱后，同样也产生一个电子的空位，这种电子的空位称为空穴，它显示出一个可单独移动的正电荷的特性。因为电子和空穴两者以相等的数量产生，晶体仍保持电中性。但是，两种载流子都可能受到力的作用，从而可对电荷流动过程产生影响。

由于在本征半导体中束缚力很强，除非使用大量的外加能量，否则只能产生少量的载流子。因此，本征半导体的电气性能类似于绝缘体，不适用于电子器件。

用来产生大量载流子的一个非常普通的办法，是将仔细控制其份量的杂质掺入半导体。加了杂质的半导体称为杂质半导体。通常添加的杂质，典型的是五个价电子的原子，如砷(As)和锑(Sb)，或者是三个价电子的原子，如镓(Ga)和硼(B)。每种类型的杂质形成某一种载流子占优势的半导体。

运动的载流子是由杂质原子代替晶体中各点的基质材料产生的。一般采用的杂质浓度掌握在一个杂质原子对 10^6 到 10^8 个基质原子的范围内。这样，大部分物理和化学性质主要还是基质半导体的，只是导电性能有显著改变，使杂质半导体更接近于金属。

为了说明载流子是怎样产生的，可研究两个硅半导体的样品，一个已经加了杂质砷，另一个则加了镓。当一个硅原子被砷原子代换时，砷原子提供了五个价电子，只有四个用于构成晶体中的

键,剩下的这个价电子,若给它补充少量的能量,就可以自由运动,而这种能量通常是由晶体的热能提供的。用这个方法产生的主要载流子是带负电荷的电子,因此,这一类杂质半导体称为 n 型半导体。

在另一个样品中,镓原子代替了晶体中的硅原子。镓原子只能提供构成键所需要的四个价电子中的三个,由于键中缺少一个电子,而导致产生了一个空穴。当给以少量能量时,空穴就运动,这些能量通常由晶体的热能提供。因为带正电荷的空穴是主要载流子,因而这一类杂质半导体称为 p 型半导体。

因为热激发产生了一些电子-空穴对,在杂质半导体中,同时存在着两种类型的载流子。但在正常工作温度下,由杂质含量产生的载流子是主要的。在杂质半导体中,占优势的可移动电荷称为多数载流子,而较少的可移动电荷称为少数载流子。

7-4 电荷流动过程

所谓电荷流动过程指的是描述载流子运动的作用原理。在杂质半导体中,存在着用于实施控制电荷流动的两种机理。第一个是影响载流子运动的静电力作用的结果,这个受迫运动称为漂移,就是产生导电的机理。

在半导体中,不能简单地描述载流子的运动,在无外力作用的情况下,物质的热能导致电子和原子都处于振动状态,这些振动在空间是杂乱无章的,但是是受约束的,以致在给定方向上全部粒子的净平均速度为零。如果净平均速度不为零,就会有电流存在。振动还引起了运动的电子和原子的相互作用。由于这许多相互影响,我们不能描述个别粒子的运动,只能够谈论大批粒子的净平均运动。

· 当有外力作用时,通常是借助于电场,粒子受到作用,引起的

定向运动叠加在杂乱的热运动上，这就导致在外加电场的方向上产生一个净平均速度。因此，就有一个由空穴运动和电子运动形成的合成电流。电子和空穴运动的方向相反，但由于它们带的电荷也相反，所以两者产生的电流方向是相同的。在杂质半导体中，这个电流基本上是多数载流子的运动。

第二个重要的流动机理是扩散，是一个无作用力的过程，它是以系统中载流子分布不均匀为基础的。这个过程能够用气体分子运动理论的典型问题来说明。在图 7-4 所示的系统中， N_1 个气体分子均匀分布于全部容积 V_1 ， N_2 个气体分子均匀分布于全部容积 V_2 ，最终的分子浓度分别是 N_1/V_1 和 N_2/V_2 ，而且它们是不相

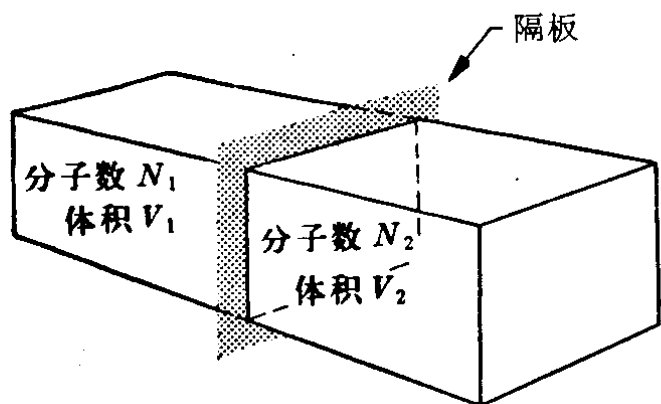


图 7-4 理想气体被隔板分割为两个体积

等的。如果把隔板移去，经过一段时间之后，气体将处于新的压强之下，气体分子在整个容积中的分布将变成均匀的（每个器壁上的压强将是相同的）。分子的重新分布是由基于容器两部分中浓度不相等的

扩散过程完成的。气体分子的流动是从高浓度区流向低浓度区。

在隔板所在处存在着扩散的趋势，然而，隔板的严密性迫使粒子仍留在它们原来所在的部分。一旦这个约束被解除，就发生扩散过程。

在半导体中，扩散产生电流无须利用外加电场。这是由于体内载流子浓度不同而产生带电粒子的流动。扩散电流是电子扩散和空穴扩散电流之和，这说明它们的电荷符号相反。因为扩散运动的方向是朝着低浓度区域的，所以在描述少数载流子流动中，扩散是个主要因素。

在半导体中出现的第三种现象是复合，它是由电子与空穴碰撞引起的。复合过程本质上是电子返回晶体键的空位的过程。复合率正比于载流子的浓度，即载流子的数目越多，发生电子-空穴复合的可能性就越大。在描述少数载流子的流动中，复合是重要的，因为受到作用的电荷的百分比是值得注意的。同时在材料中电子-空穴对也不断产生，将复合率与产生率之间的差额称为净复合率是合适的。

描述半导体中载流子的全部流动，必须包括所有三种流动现象。每一种载流子必须分别处理，样件失去的一些电子或空穴是由漂移、扩散或净复合造成的。复合作用对空穴和电子来说是一样的，因为在复合过程中，两种载流子成对地被消除。样件中的电流是电子电流和空穴电流分量之和。这些效应是定量地描述器件的电流和终端特性的基础。

7-5 结型二极管

一切半导体器件以之为基础的主要结构单元是 pn 结。这种结是由 p 型和 n 型半导体的物理结合所构成的，如图 7-5 所示。此外 pn 结也被用作两端器件，称为结型二极管，它的电路符号如图 7-6 所示。

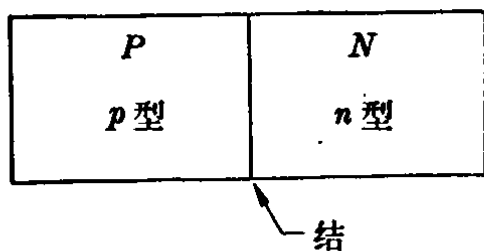


图 7-5 pn 结

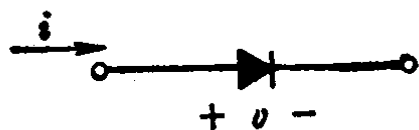


图 7-6 结型二极管的电路符号

二极管具有几个有用的电路特性，其中最重要的通常是用静态特性或伏安特性曲线来描述。图 7-7 是理想二极管的静态特性曲线，曲线表明电流只能由一个方向通过器件，所以二极管起着—

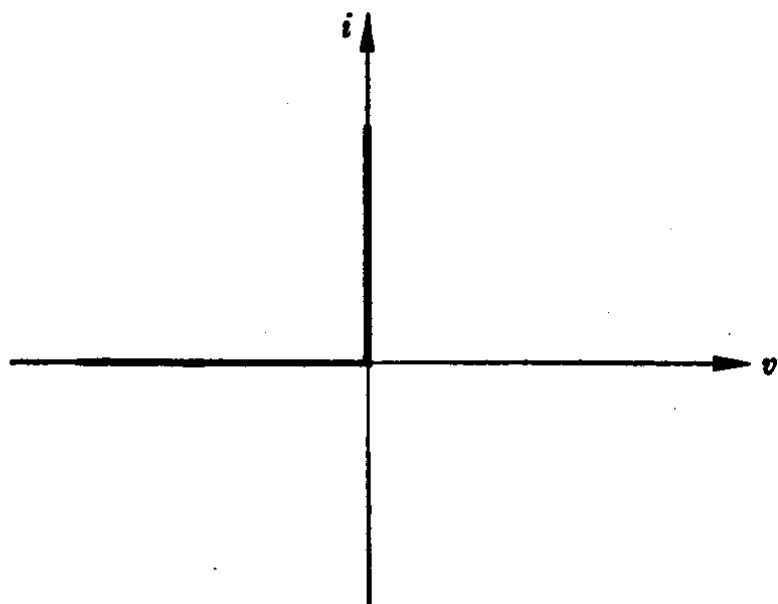


图 7-7 理想二极管的伏安特性

个单向电路元件的作用。器件的单向导电性是重要的，它在开关电路中提供“通-断”特性，而在波形形成和整流电路中，只有极性合适的信号能够被检出或处理。

pn 结的物理过程，用上节中研究的

载流子流动过程来说明。假定每种半导体都含有均匀的杂质，在 p 区中空穴的浓度比在 n 区中的大。同样，在 n 区中电子的浓度比 p 区中大。这个浓度差在结合部分两边形成一个梯度，导致载流子的扩散，空穴由 p 区向 n 区扩散，电子由 n 区向 p 区扩散。扩散的结果在结的两边产生电荷符号相反的固定离子，如图 7-8 所示。这个区域向两边延伸到 n 区和 p 区，并被称为耗尽区或空间电荷区。由于它们已经分别扩散到了 p 型和 n 型材料内，因此在这个区域里，没有可移动的载流子存在。

在结两边的固定离子(即空间电荷)的极性是相反的，因而建立起一个电场。这个电场的两种效应是：形成势垒和产生漂移电流。漂移电流导致空穴从 n 区移到 p 区，而电子从 p 区移到 n 区，在平衡而且没有与外部电路连接的情况下，无净电流存在，也就是穿过结的空穴和电子的净数目均为零。因此，电流的漂移分量和扩散分量相等而且指向相反。

在没有外电源能量的情况下，跨越耗尽区建立的势垒起着阻止载流子流过结区的作用。一个外电源接到 n 区和 p 区之间，如图 7-9a 所示，用来提供附加的电能。电压源 V 称为偏置电压，它削