

电子技术基础

黑龙江省电工学研究会 编

哈尔滨船舶工程学院出版社

内 容 简 介

本书系根据国家教委电工学课程指导小组制定的课程基本要求,由黑龙江省高等学校电工学研究会主持编写的。

全书共分八章,包括模拟电子技术和数字电路两大部分。在内容选取上,注意了加强基础和少而精的原则,广泛吸取国内、外有关教材之长,对原有内容删繁就简,增加近代电子新技术知识,集成电路和数字电路基础都有所加强。本书的重点在于基本电路分析与应用,也引进适量的实用技术。每节后附有思考题,每章结束都有小结和习题。所有习题与例题都作了更新,力争作到启发学生思维、开阔学生视野、锻炼学生分析与计算能力。

本书可作为高等工科院校非电专业电工教材,也可作为电大、夜大、自学考试电工教材,对工程技术人员和管理人员也是较好的参考书。

电 子 技 术 基 础

黑龙江省电工学研究会编

哈尔滨船舶工程学院出版社出版

新华书店首都发行所发行

沈阳市第六印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张17.5 字数406千字

1988年9月 第1版 1988年9月 第1次印刷

印数: 1—10000册

ISBN7-81007-045-2/TN·1

定价: 2.60元

前 言

本教材是按照国家教委所属高等院校工科电工课程教学指导委员会电工学课程教学指导小组提出的并经武汉会议审定的《电子技术》基本要求，由黑龙江省高等工科院校电工学研究会主持编写的。书稿的大部分是在原有讲稿的基础上，广泛吸取国内、外有关教材之长完成的。在编写过程中，充分注意加强基础和少而精的原则，并按《基本要求》的精神，进行了认真的内容选择。

由于本教材是为高等院校工科非电专业编写的，所以内容的重点在于基本电路的分析与应用；同时也引进了适量的实用技术，旨在加强培养学生分析问题和解决问题的能力。另外，由于集成技术的广泛应用，所以本教材中介绍了一定数量的集成电路，但分立元件电路仍占有相当的比重。

按照《基本要求》规定，本课程的总学时数应控制在70学时（包括实验教学）以内，各部分学时的分配比例建议如下，仅供参考：

模拟电路部分约40学时；

数字电路部分约30学时；

其中实验教学部分约14学时。

本教材每章后均附有习题，大部分节后附有思考题。这些题目选自国内外各有关教材及历届研究生考试试题集。力争作到启发学生思维，开阔学生视野，锻炼学生分析与计算能力。

本教材由哈尔滨工业大学秦曾煌教授担任主审，参加审定工作的还有：张保郁教授、董学忠副教授和许宏志副教授。

本书由戴超仁主编。参加编写的有：常明兰（写第一、二、三章）；戴超仁、曹玉泉（写第四、五章）；马时华、马桂云、郑世科（写第六、七、八章），唐玉朝同志对前三章的初稿进行了审校。

本书和黑龙江省电工学研究会编写的《电工技术基础》是姊妹篇，所以两本书力求格调一致，明确地说，本书是在吸取了《电工技术基础》不少有益经验的基础上完成的。

我们诚恳地表示，限于编者的水平，加之时间紧迫，本书中一定存在不少错误与欠妥之处，敬希广大读者给予指正！

编 者 88.3

目 录

第一章 半导体器件的基本知识	(1)
1-1 半导体器件的基础——PN结	(1)
1-2 半导体二极管.....	(6)
1-3 稳压管.....	(9)
1-4 半导体三极管.....	(12)
1-5 场效应管.....	(20)
小结.....	(27)
习题.....	(28)
第二章 单级放大电路	(31)
2-1 基本放大电路的组成及工作原理.....	(31)
2-2 放大电路的基本分析方法.....	(36)
2-3 静态工作点的稳定.....	(47)
2-4 放大电路的频率响应.....	(51)
2-5 射极输出器.....	(54)
2-6 场效应管放大电路.....	(57)
小结.....	(61)
习题.....	(62)
第三章 多级放大电路	(66)
3-1 概述.....	(66)
3-2 直接耦合多级放大电路.....	(70)
3-3 差动放大电路.....	(72)
3-4 直接耦合式功率放大电路.....	(79)
小结.....	(88)
习题.....	(88)
第四章 集成运算放大器及其应用	(94)
4-1 概述.....	(94)
4-2 两种集成运算放大器的外部接线.....	(98)
4-3 集成运算放大器的主要参数	(101)
4-4 集成运算放大器的使用常识	(104)
4-5 反馈放大器	(108)
4-6 集成运算放大器的两种基本电路	(114)
4-7 由集成运放构成的信号运算电路	(120)
4-8 由集成运放构成的信号处理电路	(129)
4-9 由集成运放构成的波形发生电路	(135)

小结	(138)
习题	(138)
第五章 直流稳压电源	(145)
5-1 直流稳压电源的组成	(145)
5-2 单相桥式整流电路	(146)
5-3 滤波电路	(149)
5-4 稳压管稳压电路	(154)
5-5 串联型稳压电路	(158)
5-6 集成稳压电路	(160)
小结	(164)
习题	(165)
第六章 数字电路基础及逻辑门电路	(168)
6-1 概述	(168)
6-2 计数体制	(169)
6-3 逻辑函数	(172)
6-4 基本逻辑门	(180)
6-5 TTL集成逻辑门	(185)
6-6 MOS门电路	(188)
小结	(191)
习题	(191)
第七章 集成触发器及其应用	(195)
7-1 基本触发器	(195)
7-2 主从JK触发器	(199)
7-3 触发器逻辑功能的转换	(202)
7-4 MOS集成器件液面逻辑程序控制电路	(203)
小结	(205)
习题	(205)
第八章 逻辑部件	(209)
8-1 编码器	(209)
8-2 译码器	(211)
8-3 寄存器	(216)
8-4 计数器	(219)
8-5 数-模和模-数转换器	(226)
8-6 $3\frac{1}{4}$ 位数字集成电压表	(237)
小结	(242)
习题	(242)
附录	(247)
参考书目	(263)
习题答案	(264)

第一章 半导体器件的基本知识

半导体器件具有体积小、重量轻、寿命长、工作可靠性高等许多优点，因此，在电子技术中得到了广泛的应用。

半导体二极管和三极管是最常用的半导体器件。它们的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路必不可少的基础，而PN结又是构成各种半导体器件的共同基础。本章在介绍半导体二极管之前，对半导体的导电特性做了简要叙述，其中大部分内容是物理学中已经学过的，因此，在学习时应注意与已学知识的联系。在此基础上本章介绍半导体二极管、稳压管、半导体三极管、场效应管等的结构、特性和主要参数，为学习电子电路打下必要的基础。

1-1 半导体器件的基础——PN结

1.1.1 半导体的导电特性

我们知道，自然界中的物质，按它们的导电能力可以分为导体、绝缘体和半导体三类。半导体在导电能力方面介于导体和绝缘体之间，它既不象导体那样很容易导电，又不象绝缘体那样很难导电。然而，这并不是它引起人们重视的原因。半导体材料之所以得到了广泛的应用，主要原因在于它的导电机理与导体、绝缘体迥然不同，而有着一些独特导电特性。

1. 本征半导体

不含杂质的半导体叫做本征半导体。用得最多的半导体材料是锗(Ge)和硅(Si)。图1-1是锗和硅的原子结构图，它

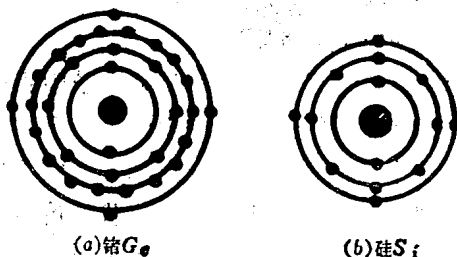


图1-1 锗和硅的原子结构图

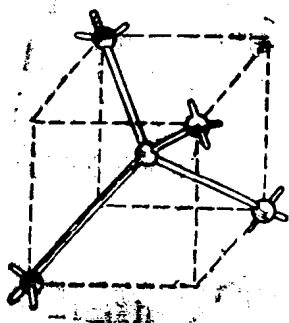


图1-2 晶体中原子的排列方式

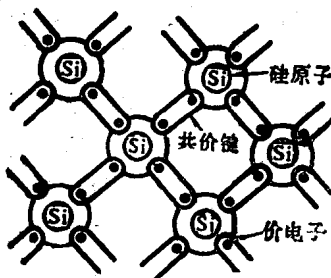


图1-3 硅单晶中的共价键结构

们各有四个价电子，都是四价元素。将锗或硅半导体材料提纯制成单晶体后，它们的原子排列便由杂乱无章的状态（叫做多晶体）变成排列非常整齐的状态（叫做单晶体），其立体结构图与平面示意图分别如图1-2和1-3所示。半导体一般都具有这种晶体结构，所以，半导体也称为晶体。这就是晶体管名称的由来。

在本征半导体的晶体结构中，每一个原子与相邻的四个原子相结合。每一原子的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个价电子对。这个价电子对是每两个相邻原子共有的，它们把相邻的原子结合在一起，构成所谓共价键的结构。

在共价键结构中，原子最外层虽然具有八个电子而处于较为稳定的状态，但是，共价键中的电子还不象在绝缘体中的价电子被束缚得那样紧。在获得一定能量（温度增高或受光照）后，共价键中的电子即可挣脱原子核的束缚，成为自由电子。温度愈高，晶体中产生的自由电子便愈多。

在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，称为空穴。在一般情况下，原子是中性的。当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，原子的中性便被破坏，而显出带正电。或者说，原子中出现了带正电的空穴，如图1-4所示。在这种情况下，晶体中的自由电子（带负电）和空穴（带正电）必然成对出现，数量相等。

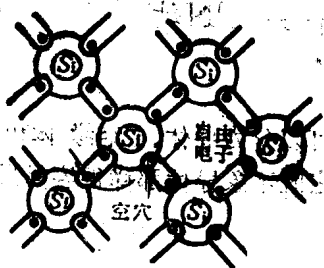


图1-4 空穴和自由电子的形成

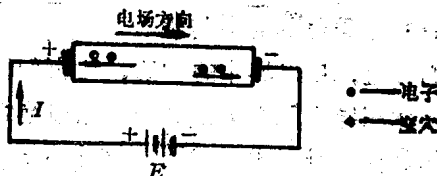


图1-5 本征半导体中载流子的运动

有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子，填补这个空穴。同时，在失去了一个价电子的相邻原子的共价键中出现另一个空穴，它也可以由相邻原子中的价电子来递补，而在该原子中又出现一个空穴。如此继续下去，就好象带正电的粒子（空穴）在运动。因此，可用空穴运动产生的电流来代替价电子运动产生的电流，但两者的运动方向相反。

必须强调，空穴的运动方式和自由电子有着本质的区别。自由电子能在晶体中自由运动，而空穴的移动是正离子吸引邻近的价电子造成的，即造成空穴移动的价电子移动只能从一个束缚状态到另一个束缚状态。

因此，当半导体两端加上外电压时，半导体中将出现两部分电流：一是自由电子作定向运动所形成的电子流，一是仍被原子核束缚的价电子（注意，不是自由电子）递补空穴所形成的空穴电流，如图1-5所示。

在半导体中，同时存在着电子导电和空穴导电，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属在导电原理上的本质差别。

自由电子和空穴都称为载流子。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现。当自由电子运动到共价键上的空穴处，自由电子和空穴就会重新结合，使自由电子和空穴都消失，这种过程称为自由电子-空穴对的复合。所以，在室温下，本征半导体中，不断进行着两种相反的过程，即自由电子

-空穴对的不断产生和不断复合。在一定温度下，这种过程将达到动态平衡，使自由电子-空穴对保持一定数量，温度愈高，自由电子-空穴对即载流子数目愈多，导电性能也就愈好。所以，温度对半导体器件性能的影响很大。

2. N型半导体和P型半导体

本征半导体中虽然有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量极少，导电能力仍然很低，用处不大。但是，如果在本征半导体中掺入有用的其它微量元素（称为杂质），就会使半导体的导电能力大大提高。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

由于掺入的杂质不同，杂质半导体可分为两大类。一类是在硅或锗的晶体中掺入磷（或其它五价元素）。磷原子的最外层有五个价电子，如图1-6所示。由于掺入硅晶体的磷原子数比硅原子数少得多，因此，整个晶体结构基本上不变，只是在某些位置上的硅原子被磷原子所取代。磷原子参与共价键结构只需要四个价电子，多余的第五个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子（见图1-7）^①。于是半导体中的自由电子数目大量增加，自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式，故称它为电子半导体或N型半导体。例如在室温27℃时，每立方厘米纯净的硅晶体中约有自由电子或空穴 1.5×10^{10} 个。掺杂后成为N型半导体，其自由电子数目可增加几十万倍。由于自由电子增多而增加了复合的机会，空穴数目便减少到每立方厘米 2.3×10^5 个以下。故在N型半导体中，自由电子是多数载流子，而空穴则是少数载流子。

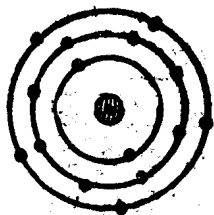


图1-6 磷原子结构

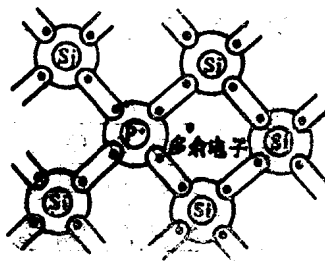


图1-7 硅晶体中掺磷出现自由电子

另一类是在硅或锗晶体中掺入硼（或其它三价元素）。每个硼原子只有三个价电子（见图1-8），故在构成共价键结构时，将缺少一个电子而形成空穴（见图1-9）^②。这样，在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体

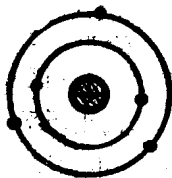


图1-8 硼原子结构

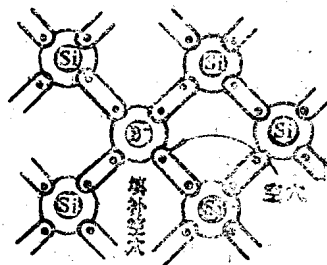


图1-9 硅晶中掺硼出现空穴

① 磷原子失去一个电子而成为正离子。

② 硼原子得到一个电子而成为负离子。

称为空穴半导体或P型半导体，其中空穴是多数载流子，而自由电子是少数载流子。

应当注意，不论是N型还是P型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但是整个晶体仍然是不带电的。

1.1.2 PN结的形成

P型或N型半导体的导电能力虽然大大增强，但并不能直接用来制造半导体器件。通常是在一块晶片上，采取一定的工艺措施，在两边掺入不同的杂质，分别形成P型半导体和N型半导体，而它们的交界面就形成PN结。这个PN结就是构成各种半导体器件的基础。PN结既如此重要，那么它又是怎样形成的呢？

1. PN结是由多数载流子的扩散和复合运动形成的

图1-10(a)所示的是一块晶片，两边分别形成P型和N型半导体。图中 $\ominus$ 代表得到一个电子的三价杂质（例如硼）离子，带负电； $\oplus$ 代表失去一个电子的五价杂质（例如磷）离子，带正电。由于P区有大量空穴（浓度大），而N区的空穴极少（浓度小），因此，空穴要从浓度大的P区向浓度小的N区扩散，并与N区中的自由电子相复合；同样，N区中的大量自由电子（浓度大）也要向自由电子极少的（浓度小）P区扩散，并与P区中的空穴相复合。扩散首先在P型和N型半导体交界面处进行，如图1-10(a)所示。多数载流子扩散和复合的结果，在P型区一边由于失去空穴，仅剩下一些带负电的三价杂质离子，形成负空间电荷区。而在N型区一边由于失去电子，仅剩下一些带正电的五价杂质离子，形成正空间电荷区。这样，在P型半导体和N型半导体交界面的两侧就形成了一个空间电荷区，这个空间电荷区叫做PN结。

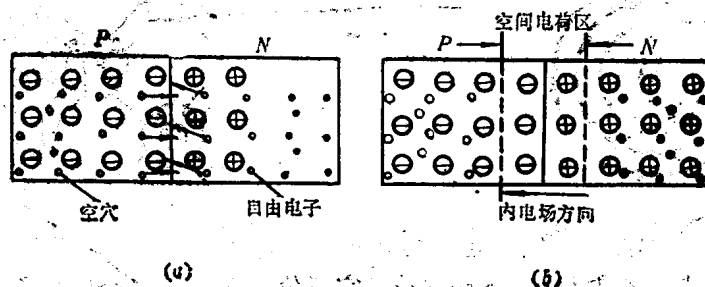


图1-10 PN结的形成

形成空间电荷区的正负离子虽然带电，但是它们不能移动，不参与导电。而在这个区域内，载流子极少，所以空间电荷区的电阻率很高。此外，这个区域内多数载流子已扩散到对方并复合掉，或者说消耗尽了，所以，空间电荷区有时称为耗尽层。

2. PN结中载流子的矛盾运动

正负空间电荷在交界面两侧形成一个电场，称为内电场，其方向从带正电的N区指向带负电的P区，如图1-10(b)所示。由P区向N区扩散的空穴在空间电荷区将受到内电场的阻力，而由N区向P区扩散的自由电子也将受到内电场的阻力，即内电场对多数载流子（P区的空穴和N区的自由电子）的扩散运动起阻挡作用，所以，空间电荷区又称为阻挡层。

空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，这是一方面。但另一方面，内电场对少数载流子（P区的自由电子和N区的空穴）则可推动它们越过空间电荷区，进入对方。这种少数载流子在电场作用下有规则的运动称为漂移运动。

扩散和漂移是互相联系，又是互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时，多数载流子的扩散运动占优势。但在扩散运动进行过程中，空间电荷区逐渐加宽，内电场逐步加强。于是在一定条件下（例如温度一定），多数载流子的扩散运动逐渐减弱，而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。最后，扩散运动和漂移运动达到动态平衡。也就如图1-11中所示的那样，P区的空穴（多数载流子）向右扩散的数量与N区的空穴（少数载流子）向左漂移的数量相等；对自由电子讲也有同样情况。达到平衡后，空间电荷区的宽度基本上稳定下来，PN结就处于相对稳定的状态。

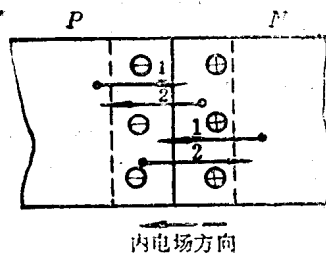


图1-11 扩散运动与漂移运动达到平衡

- 1—多数载流子扩散运动的方向
- 2—少数载流子漂移运动的方向

在上述的动态平衡状态下，扩散运动和漂移运动仍在继续进行，但由于两者大小相等、方向相反，所以即使用一根导线把P型和N型半导体连起来，PN结上也不会有电流流过。只有当外加一定方向的电压时，才会使扩散和漂移这对矛盾运动的平衡破坏，促使PN结处于导通状态或截止状态。

1.1.3 PN结的单向导电性

1. 外加正向电压使PN结导通

如果在PN结上加正向电压，即外电源的正端接P区，负端接N区（见图1-12）。由图可见，外电场与内电场的方向相反，因此，扩散与漂移运动的平衡被破坏。外电场驱使P区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷，同时N区的自由电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷。于是，整个空间电荷区变窄，内电场被削弱，多数载流子的扩散运动增强，形成较大的扩散电流（正向电流）。在一定范围内，外电场愈强，正向电流（由P区流向N区的电流）愈大，这时PN结呈现的电阻很低。正向电流包括空穴电流和电子电流两部分。空穴和电子虽然带有不同极性的电荷，但由于它们的运动方向相反，所以电流方向一致。外电源不断地向半导体提供电荷，使电流得以维持。

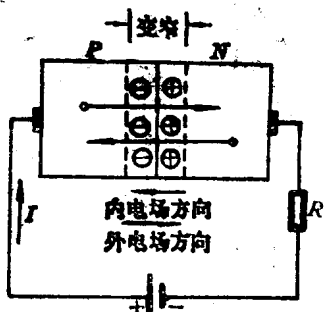


图1-12 PN结加正向电压

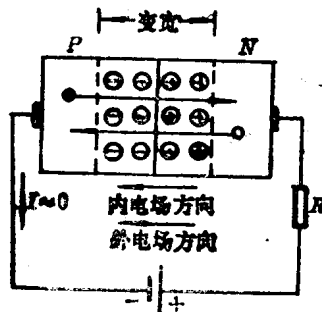


图1-13 PN结加反向电压

2. 外加反向电压使PN结截止

若给PN结加反向电压，即外电源的正端接N区，负端接P区（见图1-13），则外电场与内电场方向一致，也会破坏扩散和漂移运动的平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走，使得空间电荷增加，空间电荷区变宽，内电场增强，使多数载流子的扩

散运动难于进行。但另一方面，内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动，在外电场的作用下，N区中的空穴越过PN结进入P区，P区中的自由电子越过PN结进入N区，在电路中形成了反向电流（由N区流向P区的电流）。由于少数载流子数量很少，因此反向电流不大，即PN结呈现的反向电阻很高。又因为少数载流子是由于价电子获得热能（热激发）挣脱共价键的束缚而产生的，环境温度愈高，少数载流子的数量愈多。所以，温度对反向电流的影响很大。这就是半导体器件的温度特性很差的根本原因。

由上述分析可见，PN结有单向导电性。即在PN结上加正向电压时，PN结电阻很低，正向电流很大（即PN结处于导通状态）；加反向电压时，PN结电阻很高，反向电流很小（即PN结处于截止状态）。

〔思考题〕

- 1-1-1 半导体导电与金属导电有什么本质的差别？
- 1-1-2 什么叫本征半导体、杂质半导体、P型半导体、N型半导体？它们各自的特点是什么？
- 1-1-3 什么是扩散电流和漂移电流？内电场对它们各起什么作用？
- 1-1-4 什么叫PN结的单向导电性？PN结具有单向导电性的内因和外因是什么？
- 1-1-5 在图1-12中，若将外加直流电源换成正弦交流电源，PN结上将会流过什么样的电流？

1-2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构

半导体二极管（简称二极管）是由一个PN结构成的电子器件，在PN结两端加上电极引线并用管壳封装起来，便构成一只半导体二极管。其中，由P型半导体区域引出的电极称为阳极，N型半导体区域引出的电极称为阴极。常用图1-14（d）所示的符号表示。图中箭头所指为正向电流的方向。

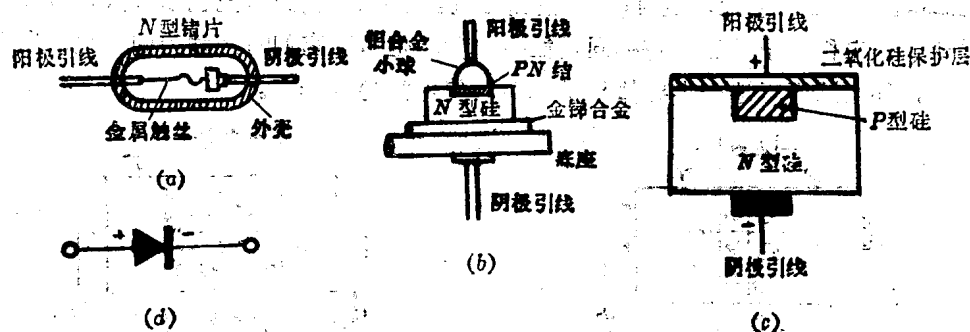


图1-14 半导体二极管的结构及符号

(a) 点接触型 (b) 面接触型 (c) 平面型 (d) 符号

按照结构工艺的不同，二极管通常有以下几种类型：

1. 点接触型二极管，结构如图1-14（a）所示。它的特点是PN结的面积小，只能通过较小的电流（几十毫安以下），但结电容^⑥小，因此，主要用于高频信号的检波与小电流的整流，也用作脉冲数字电路的开关元件。

⑥ PN结具有电容效应

2. 面接触型二极管, 结构如图1-14(b)所示。由于其PN结的面积大, 可以通过较大的电流(几百毫安至几百安), 但结电容大, 一般不能用于高频电路, 主要用于低频电路和整流电路。

3. 硅平面开关管, 结构如图1-14(c)所示。它是用制造平面管的工艺制造的。这种管子的性能稳定, 结面积的大小可以控制。结面积较大的管子, 可以通过较大电流, 适用于大功率整流。结面积较小的管子, 结电容小, 适用于脉冲数字电路中作开关管。

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

由于二极管是一个PN结构成的, 因此具有PN结的单向导电性, 其伏安特性曲线如图1-15所示。由图中可见, 二极管的伏安特性分为正向特性和反向特性两个部分

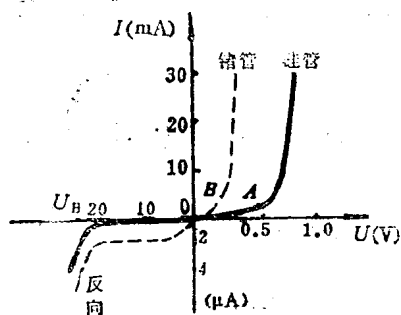


图1-15 二极管的伏安特性曲线

1. 正向特性

当外加正向电压时, 由于PN结处于正向接法, 便有正向电流通过。但是, 当外加正向电压很低时, 外电场不足以克服PN结内电场对多数载流子扩散运动的阻力, 二极管呈高阻状态, 故此时的正向电流很小, 几乎为零。当外加正向电压超过一定数值后, 内电场被大大削弱, 二极管呈低阻状态, 电流随电压的上升增长很快, 这个一定数值的正向电压称为死区电压。

硅管的死区电压约为 $0 \sim 0.5\text{V}$ (图中OA段) 之间。锗管为 $0 \sim 0.2\text{V}$ (图中OB段) 之间, 其大小受温度影响很大。二极管正向导通时的压降很小, 一般情况下, 硅管约为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$, 锗管约为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

2. 反向特性

当外加反向电压时, 由于PN结处于反向接法, 有利于少数载流子的漂移运动, 形成很小的反向电流。反向电流有两个特点, 一是它随温度的上升增长很快; 二是只要反向电压在一定范围内, 反向电流基本不随反向电压变化。这是因为少数载流子数量很少, 在一定温度下每单位时间内只能提供一定的数量, 当外加电压所产生的电场足够把它们全部吸引过来形成电流之后, 电压即使再高(在一定范围内)也不会使载流子数目增加。正因为这样, 反向电流又常被称为反向饱和电流。通常硅二极管的反向电流可以做到纳安级 ($1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$), 锗管的反向电流可以做到微安级 ($1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$)。由于锗管的反向电流比硅管大得多, 因此, 锗管受温度的影响比较明显。

当反向电压增加到一定数值时, 外电场产生的电场力大到足以把共价键中的价电子强行“拉出”, 成为自由电子。这时, 载流子数目急剧上升, 而处于强电场中的载流子又因获得很大能量, 将其他价电子撞击出来, 如此形成连锁反应, 将造成反向电流的突然增大。这种现象称为反向击穿, 此时的电压称为反向击穿电压 U_B 。二极管发生反向击穿后, 由于其反向电流突然增大, 二极管便会失去单向导电性。当没有适当的限流措施时, 因电流大、电压高而将使管子造成永久性的损坏。因此, 二极管工作时, 所加的反向电压值应小于其反向击穿电压。

1.2.3 半导体二极管的主要参数

半导体二极管的特性除用伏安特性曲线表示外，还常用它的参数来表示。在选择和使用半导体器件时，首先应了解它的主要参数，以便正确选用。各种参数可以从半导体器件手册中查出。下面介绍其几种主要参数。

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管能够允许通过的最大正向平均电流值。它是由半导体材料和PN结的面积决定的。当电流超过这个允许值时，将由于发热过度而使管子损坏，使用时必须注意。

2. 反向击穿电压 U_B 与最高反向工作电压 U_{RM}

U_B 是指二极管反向击穿时的电压值。击穿后，其反向电流剧增，导致管子损坏。一般手册上给出的是最高反向工作电压 U_{RM} ，约为反向击穿电压的一半或三分之二，以确保管子的安全使用。

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是指在二极管加上最高反向工作电压时的反向电流值。反向电流大，说明管子的单向导电性能差，且受温度影响大。

此外还有最高工作频率、极间（结）电容等参数。常用二极管的型号和参数，可参看本书附录二。

由于二极管具有明显的单向导电性，因此，在电子电路中常用于整流、检波、元件保护以及作为开关元件等。

【例1-1】在图示电路中，输入端A的电位 $U_A = +3V$ ，B的电位 $U_B = 0V$ ，求输出端F的电位 U_F （电阻R接负电源 $-12V$ ）

【解】因为A端电位比B端电位高，所以 D_A 先导通。如果二极管正向压降是 $0.3V$ ，则 $U_F = +2.7V$ 。当 D_A 导通后， D_B 上加的是反向电压，因而截止。

在这里， D_A 起箝位作用，把F端的电位箝制在 $+2.7V$ ； D_B 起隔离作用，把输入端B和输出端F隔离开来。

【例1-2】在题图（a）所示的电路中，D为理想二极管。当输入电压 U_i 为图（b）所示的波形时，输出电压 U_o 应该是什么样的波形？

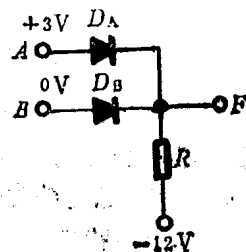
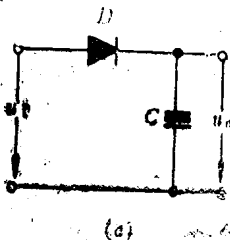
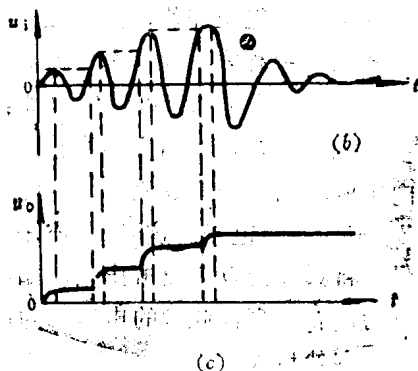


图 1-16【例1-1】图



(a)



(c)

图 1-17【例1-2】图

【解】当D导通时，输入电压 U_i 对电容C充电。由于D为理想二极管，所以，C上的充电电压与 U_i 相等。当 U_i 比电容C上的电压低时，D截止，C因无放电回路，其电压将保持原来的最大值。

当电压 U_i 超过原来的最大值时, 二极管 D 又导通, 于是, U_i 又向 C 充电至另一最大值。所以输出电压最后固定在输入电压 U_i 的最高峰值上, U_o 的波形如图(c)所示。此电路通常称为峰值耦合电路。

【例1-3】请判断图示电路中的硅二极管 D 能否导通? 若将硅管换成锗管能导通吗? 若能导通, 流过二极管的电流是多少?

〔解〕若要判断硅二极管能否导通, 需先求出未接二极管时 A 点的电位。

$$U_A = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6 \cdot \frac{0.25}{4.7 + 0.25} \approx 0.3 \text{ V}$$

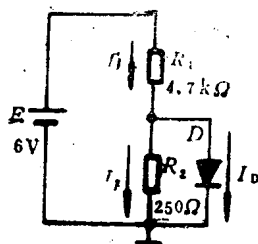


图 1-18〔例1-3〕图

硅管导通时的正向压降为 $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$, 所以, 当接有硅二极管时, 管子不能导通。当换成锗管时, 因为锗管的正向压降为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$, 所以, 换成锗管后, 管子能导通。

锗管导通后, U_A 被钳位在 0.2 V , 所以

$$I_D = I_1 - I_2 = \frac{E - U_A}{R_1} - \frac{U_A}{R_2} = \frac{6 - 0.2}{4.7 \times 10^3} - \frac{0.2}{250} = 0.43 \text{ mA}$$

〔思考题〕

1-2-1 点接触型和面接触型二极管各有什么特点?

1-2-2 硅二极管和锗二极管各有什么特点?

1-2-3 有两只同型号二极管, 都加着 1 V 的正向电压, 一只正向电流大, 一只正向电流小, 哪一只管子较好呢? 为什么?

1-2-4 如何用简单方法判别硅二极管和锗二极管? 怎样判别二极管的正负极及管子的好坏?

1-2-5 什么是死区电压? 为什么会出现死区电压?

1-2-6 如果把一节 1.5 V 的干电池以正向接法直接接到 $2\text{AP}4$ 管的两端, 你估计会出现什么情况?

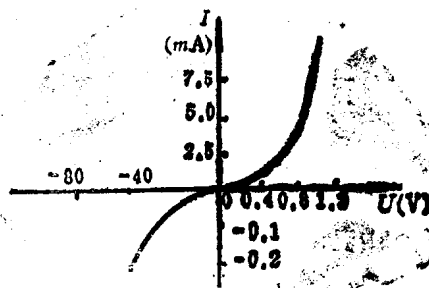


图1-19 2AP4的伏安特性

1-3 稳压管

1-3-1 稳压管的稳压作用

稳压管是一种特殊的面接触型半导体二极管。由于它在电路中能起稳定电压的作用, 故称为稳压管。它的外形和内部结构与普通二极管类似。其图形符号及伏安特性曲线如图 1-20 所示。

稳压管和普通二极管的区别就在于稳压管的反向伏安特性比较陡。当反向电压小于 U_Z 时, 稳压管的反向电流比普通二极管的反向饱和电流小得多, 几乎为零。但当反向电压增加到 U_Z (反向击穿电压) 以后, 反向电流突然急剧上升, 即管子发生反向击穿现象。这对普通的二极管必须严格禁止, 因为它意味着元件的损坏。但对稳压管来说, 由于在制造工艺上采取了适当的措施, 使得接触面上各点的电流比较均匀, 并在使用时把反向电流限制在一定数值内, 就可以使管子虽然工作在反向击穿状态, 但其 PN 结的温度仍不超过允许的数值, 不致于损坏。即稳压管具有可逆的反向击穿特性。

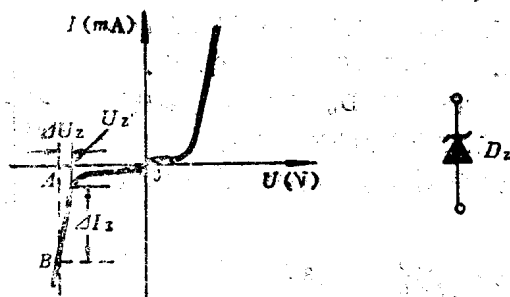


图1-20 稳压管的伏安特性及图形符号

由于击穿区的伏安特性很陡，电流在很大范围内变化时管子两端的电压基本不变，具有稳定电压的作用。这样，稳压管就可以利用“击穿现象”达到“稳压”的目的。

稳压管的正常工作范围是在伏安特性曲线上的反向电流开始突然上升的A点和B点之间。由于硅管的热稳定性比锗管好，因此一般都用硅管做稳压管，例如2CW型和2DW型都是硅稳压管。

1.3.2 稳压管的主要参数

1. 稳定电压 U_Z

稳定电压就是稳压管在正常工作时管子两端的电压值。手册中所列的都是在一定条件（工作电流，温度）下的数值，即使是同一型号的稳压管，由于工艺方面和其它原因，稳压值也有一定的分散性。例如2CW18型稳压管的稳压值为10~12V，这就是说，如果把一个2CW18型稳压管接到电路中，它可能稳压在10.5V；再换一个2CW18型稳压管，则可能稳压在10.8V。

2. 电压温度系数 α

稳压管的稳定电压随工作温度有所变化，通常用电压温度系数来表示稳压管的温度稳定性。例如2CW18型稳压管的电压温度系数是0.095%/°C，就是说温度每增加1°C，它的稳压值将升高0.095%。假如在20°C时的稳压值是11V，那么在50°C时的稳压值将是

$$11 + \frac{0.095}{100} (50 - 20) \times 11 = 11.3V$$

一般来说，低于6V的稳压管，它的电压温度系数是负的；高于6V的稳压管，电压温度系数是正的；而在6V左右的管子，稳压值受温度的影响就比较小。因此，选用稳定电压为6V左右的稳压管，可得到较好的温度稳定性。

在要求温度稳定性高的电路中，可采用具有温度补偿措施的稳压管。例如2DW7型硅稳压管，它是在一块硅片上用同样的工艺制作出两只管子，如图1-21所示。这两只管子的稳压值相同，但彼此反向串联。通常反向工作的管子具有正电压温度系数，正向工作的管子具有负电压温度系数，这样由于温度变化所引起的电压变化将互相补偿，使总的电压温度系数减小。这种管子的1、2两端可以任意连接不分正负极。中间引出的3端供单独使用其中一个稳压管时接线用。

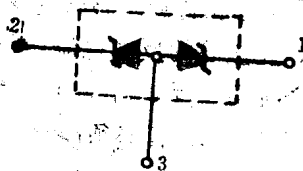


图1-21 具有温度补偿的稳压管

3. 动态电阻 r_z

动态电阻是稳压管端电压的变化量与相应的电流变化量的比值。

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (1-1)$$

稳压管的反向伏安特性愈陡, 则由 ΔI_z 引起的 ΔU_z 愈小, r_z 愈小, 稳压性能愈好。

4. 耗散功率 P_z

反向电流通过稳压管的PN结时, 要产生一定的功率损耗, 因此, PN结的温度将升高。根据允许的PN结工作温度决定出管子的耗散功率。常用的小功率管约为几百毫瓦至几瓦。

5. 稳定电流 I_z 和最大稳定电流 I_{zM}

稳定电流是指工作电压等于稳定电压时的反向电流。

最大稳定电流是指稳压管允许通过的最大反向电流。它近似等于 P_z 和 U_z 的比值, 即

$$I_{zM} = \frac{P_z}{U_z} \quad (1-2)$$

使用稳压管时, 工作电流不能超过 I_{zM} 值, 否则可能导致损坏。

为了限制稳压管击穿后的电流, 使用时必须在电路中串联电阻, 如图1-22所示。当 $U < U_z$ 时, 稳压管未击穿, 电路不通。当 $U > U_z$ 时,

稳压管击穿, 此时的电流 $I_z = \frac{U - U_z}{R}$ 。必须适当选择R

值, 使得 $I < I_{zM}$, R称为限流电阻。

【例1-4】在图1-18中, $U = 20V$, $R = 1.6k\Omega$, 稳压管 D_z 的稳定电压 $U_z = 12V$, $I_{zM} = 18mA$ 。问通过稳压管的电流 I_z 等于多少? 限流电阻值是否合适?

【解】 $I_z = \frac{U - U_z}{R} = \frac{20 - 12}{1.6} = 5mA$

因 $I_z < I_{zM}$, 故电阻值合适。

【思考题】

1-3-1 利用稳压管和二极管的正向伏安特性是否也可以稳压?

1-3-2 有两只稳压管 D_{z1} 、 D_{z2} , 稳定电压分别为5.5V、8.5V, 正向压降均为0.5V, 若稳定电流都相等, 问怎样得到3V、6V、9V、14V的稳定电压?

1-3-3 稳压管的电路如图示。已知: 2CW17的稳定电压 $U_z = 10V$, 稳定电流 $I_z = 5mA$, 动态电阻 $r_z = 20\Omega$, 额定耗散功率 $P_z = 250mW$ 。

- 求: (1) $E = 6V$ 和 $E = 8V$ 时, $U_o = ?$ $I = ?$ $U_R = ?$ (2) $E = 15V$ 和 $E = 20V$ 时, $U_o = ?$ $I = ?$ $U_R = ?$
(3) 分析以上计算结果, 说明什么情况下能够稳定 U_o 。
(4) 为使电路正常工作, E的最大值是多少?

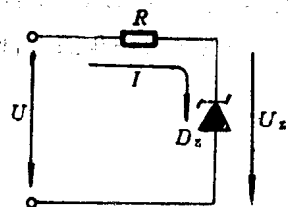


图1-22 稳压管的限流措施

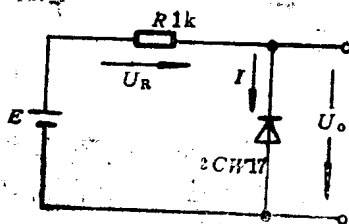


图1-23 (1-3-3)图

1-4 半导体三极管

半导体三极管（简称晶体管）是由两个PN结构成的半导体器件。由于它工作时参与导电的有自由电子和空穴两种载流子，所以，常把半导体三极管称为双极型晶体管。半导体三极管是最重要的一种半导体器件。自1948年问世以来，它的放大作用和开关作用促使电子技术飞速发展。下面我们从管子的结构入手，介绍它的电流放大作用、输入特性、输出特性及它的主要参数

1-4-1 三极管的基本结构

目前我国生产的晶体管主要有两种结构。图1-24 (a) 所示的是硅平面管（3D系列），图1-24 (b) 所示的是锗合金管（3A系列）。不论平面型或合金型，都分成NPN或PNP三层，因此，又把晶体管分成NPN型和PNP型两类。它们的核心部分都是两种PN结。其结构示意图和表示符号如图1-25所示

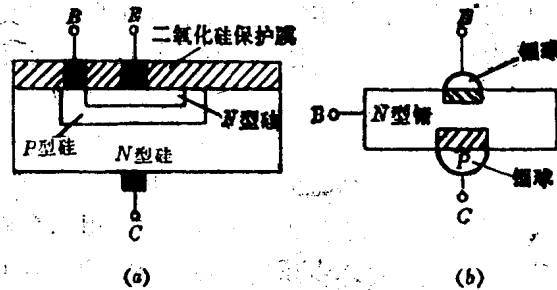


图1-24 晶体管的结构 (a)平面型；(b)合金型。

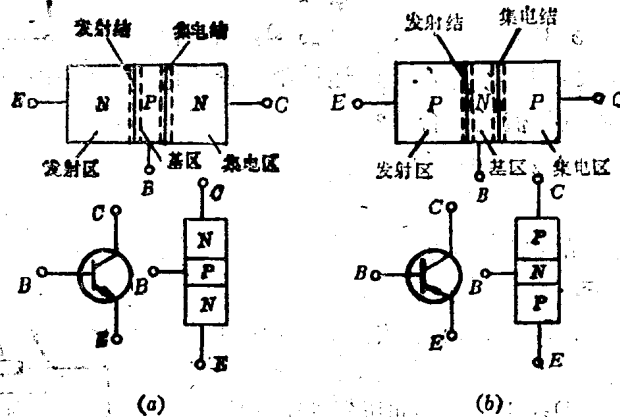


图1-25 晶体管的结构示意图及表示符号 (a)NPN型；(b)PNP型。

由图1-25可见，三个半导体材料区构成两个反向串联的PN结，中间一个区是两个PN结公用的，叫做基区，另外两个区一个叫发射区，一个叫集电区④。发射区与基区之间的PN结称为发射结，集电区与基区之间的PN结称为集电结。从三个区分别引出三根电极，即发射极E、基极B、集电极C。

表面上看，三极管是两个反向串联的PN结。但是，把两个孤立的PN结，比如两个二极管反向串联起来，它是不会具有三极管的电流放大作用的。作为一个放大元件，三极管在结构上必须具有两个特点。（1）发射区的掺杂浓度要远大于基区的掺杂浓度；（2）基

④ 掺入发射区的杂质比集电区要多，但集电区的尺寸比发射区要大，所以，两者不能互换。