

半导体电路基础

(第一册)

北京工业学院电视教育小组 编

内 容 简 介

本书是为教育部和中央广播事业局共同举办的电视教育讲座编写的电子技术教材。

本书共分四册。第一册包括半导体器件,低频小信号放大电路,负反馈及低频功率放大电路。

第二册包括直流放大,整流滤波,稳压及自激正弦波振荡器等内容。第三、四册为脉冲及数字电路。

本书可供具有中等文化程度的工人、知识青年阅读,也可供大专院校、中等专业学校有关专业的师生参考。

半 导 体 电 路 基 础

(第 一 册)

北京工业学院电视教育小组 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1980 年 8 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 0001—105,700 字数: 281,000

统一书号: 15031·207

本社书号: 1280·15—7

定 价: 1.00 元

前 言

本书是为教育部和中央广播事业局共同举办的电视教育讲座编写的电子技术教材。

近代电子技术不仅在工业、农业、科学技术和国防方面获得了应用,而且已深入到医药、卫生、财贸、交通、文化艺术直至人民生活的许多领域。它是计算机、广播、通讯、电视、收音机、导航、雷达、自动控制和仪器仪表等科学技术部门的主要构成部分。电子技术的发展及其在各个部门的广泛应用,已成为近代科学技术发展和文明的一个重要标志。为了加快我国四个现代化的进程,普及电子技术显然十分重要。

电子技术包含的内容十分丰富,限于讲授时间与篇幅,本书只能涉及其中很小的一个基础部分——半导体电路基础。而且就在半导体电路中,我们介绍的也仅是低频放大电路和脉冲及数字电路。第一、二册为低频放大电路,第三、四册为脉冲及数字电路。为了对半导体电路有较深入的认识,本书第一章介绍了半导体器件,由于一个半导体设备一般都有半导体电源,所以我们除了写一般的半导体电路外,还加进了半导体的整流、滤波和稳压电路。第三册介绍分立元件的脉冲电路,第四册介绍数字电路和一些基本的数字集成电路。

考虑到讲座主要针对中等文化程度的听众,本书力求不用高等物理与高等数学的计算公式和方法,而着重叙述电路的基本工作原理、物理概念、基本计算方法和基本的测试仪器及其使用方法。为了学好这本教材,读者应具有初中以上程度的物理、化学、数学和电工原理知识,在每章后面我们还附

有习题和思考题,以便读者进一步掌握和运用基本概念。

在学习过程中,我们希望读者尽可能将学到的理论和实际结合起来,这是因为半导体电路是实践性很强的一门学科,只有边学边实践才能加深理解。可以利用手头已有的或能购置的一些材料和简单的万用表之类的仪器(有示波器和信号发生器等更好),做些实验,或对自己从事的工作进行技术改进,使得学以致用,不断推动生产和技术水平的提高。

我们编写这本教材是初步尝试,加上时间十分匆促,缺点和错误之处望听众和读者给我们提出指正。

本书由张润泉、张著、任世隆、苏舫、阎凤坛、胡启俊、王金良等同志编写,试验电路是何产棣同志制作的,书中插图是田桂林、贺英同志清绘的,参与校阅的还有北京工业学院无线电系和其他单位的有关同志。对于所有为本书出版付出过辛勤劳动的同志,我们在此一并致以谢意。

北京工业学院无线电系

电视教育小组

1979年2月

目 录

前言	i
第一章 半导体二极管和三极管	1
第一节 半导体的基本知识	1
第二节 P-N 结	10
第三节 半导体二极管的特性和参数	22
第四节 半导体三极管的工作原理	38
第五节 半导体三极管的特性曲线和主要参数	56
第六节 半导体三极管的简易测试	72
小结	79
思考题	82
附录一 国产半导体器件型号的命名方法	84
附录二 半导体二极管参数举例	85
附录三 半导体三极管参数举例	86
第二章 低频小信号放大电路	95
第一节 关于低频放大器的基本常识	95
第二节 单级低频小信号放大电路的工作原理	101
第三节 单级低频小信号放大电路的分析和计算	114
第四节 低频放大电路的图解分析法	139
第五节 静态工作点的稳定和偏置电路的计算	154
第六节 多级低频放大电路	170
小结	190
思考题	199
练习题	203
第三章 负反馈放大电路	209
第一节 什么是负反馈放大电路	209

第二节	负反馈对放大电路性能的改善	244
第三节	几种常用基本负反馈放大电路的分析	251
第四节	多级放大电路中的负反馈	284
小结		289
思考题		291
练习题		292
第四章	低频功率放大电路	295
第一节	低频功率放大电路的特点	295
第二节	单管甲类功率放大电路	300
第三节	乙类推挽功率放大电路	320
第四节	无变压器的推挽功率放大电路	344
第五节	集电极最大允许耗散功率	365
第六节	功率放大电路应用举例	371
小结		381
思考题		382
练习题		384

第一章 半导体二极管和三极管

我们都知道,半导体电路的应用很广,种类也很多,但是就其组成内容来看,主要是由半导体管和交直流电路两部分组成的。所以要研究半导体电路,不仅要用到已经学过的交直流电路的基本概念和分析计算方法,而且还要用到有关半导体管工作原理和特性的基本知识。因此,在研究半导体电路之前,首先介绍一下半导体管的工作原理和特性是十分必要的。这里所说的半导体管主要是指半导体二极管和三极管,也就是我们常说的晶体二极管和三极管。

第一节 半导体的基本知识

半导体管都是用半导体材料做成的,因此,要了解半导体管的工作原理和特性,首先必须对半导体的性质有所认识。

一、什么是半导体

大家常见的电线,主要是由两种材料做成的,里面的铜线或铝线是用来传送电能的,外面裹着的橡皮或塑料是用来隔离外界,防止触电的,可见选用这两种材料的原因,主要是因为它们的导电能力有很大差别。我们把容易导电的物体通称为导体,如金、银、铜、铝等;而把不容易导电的物体通称为绝缘体,如陶瓷、云母、塑料、橡胶等。可是除了导体和绝缘体之外,还存在着一大类物质,其导电能力介于导体和绝缘体之

间,通称为半导体,如锗、硅、砷化镓等。

其实,半导体之所以能成为制做半导体管的材料,并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而是由于它具有一些独特的导电性能。举例来说,同一块半导体,在不同的温度下或不同强度的光线照射下,它的导电能力会有非常大的区别;在纯的半导体中,适当掺入极微量的有用的杂质元素,它的导电能力会有成百万倍的增加等等。我们正是利用半导体的这些独特性能,制出了各种不同功能的电子器件。半导体为什么会有这些独特的导电性能呢?这要从半导体的内部结构谈起。

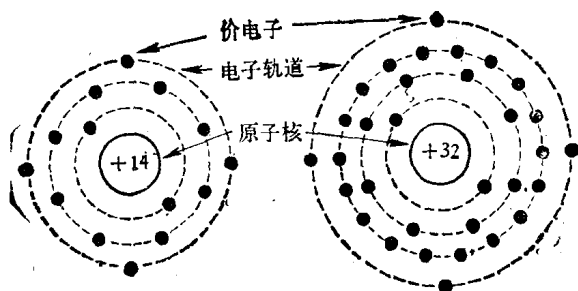
二、半导体的内部结构和导电特性

1. 半导体的内部结构

我们知道,物质是由原子组成的,原子是由带正电的原子核和若干带负电的电子组成的,电子分几层围绕原子核不停地运动。在同一个原子中,内层电子受原子核的吸引力较大,外层电子受原子核的吸引力较小,影响物质导电性能的主要是外层电子。

现在让我们具体看看如图 1-1 所示的半导体材料硅和锗的原子结构。

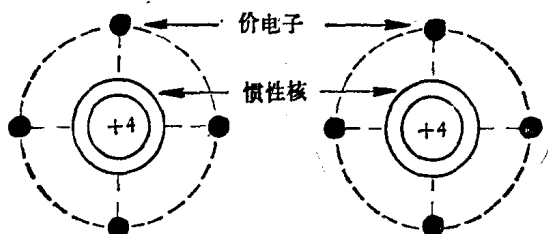
由图 1-1 (a) 可见,硅原子由带正电的原子核和围绕着它的 14 个带负电的电子组成,14 个电子按一定的规律分布在三层电子轨道上,由于原子核带 14 个电子电量的正电,所以正常情况下原子呈现中性。靠近原子核的里面两层的 10 个电子,由于受原子核的束缚力较大,很难有活动的余地,所以它们和原子核组成一个惯性核,它的净电量是 $14 - 10 = +4$ 个电子电量,而最外层的四个电子,受原子核的束缚力较小,



(a) 硅(Si)原子结构 (b) 锗(Ge)原子结构

图 1-1. 硅、锗原子结构平面示意图

通常称为价电子。为了讨论方便，可以根据这种设想，把图 1-1 (a) 所示的硅原子结构改画成如图 1-2 (a) 所示的简化结构。同理，也可以把图 1-1 (b) 所示的锗原子结构改画成如图 1-2 (b) 所示的简化结构。



(a) 硅(Si)原子 (b) 锗(Ge)原子

图 1-2 原子结构简化图

由图 1-2 可见，硅和锗原子的特点都是在一个惯性核周围环绕着四个价电子，通常有几个价电子就叫几价元素，所以硅和锗都是四价元素。

为了搞清半导体的独特导电性能，还需要进一步了解硅、锗半导体晶体中的原子排列情况。应当指出，用于制作半导体管的硅、锗材料，都必须是经过加工提炼成的纯净的单晶半导体，在单晶半导体中，其原子排列已由杂乱无章的状态变成了

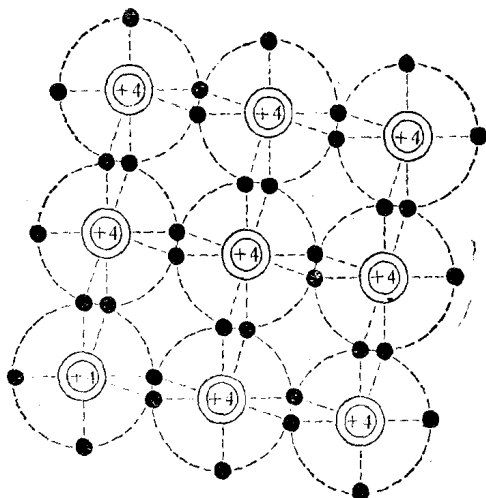


图 1-3 硅或锗单晶体的结构平面示意图(共价键结构)

非常整齐的状态.图 1-3 是硅或锗单晶体的结构平面示意图,本来应该画成立体结构,为了便于观察,画成了平面结构.

由图可见,各原子之间的距离都相等,而且相距很近.由于每个原子的最外层有四个价电子,而且原子的外层电子要有八个才是稳定状态,因此,原子与原子在组成晶体时,每一个原子都要争夺周围相邻的四个电子组成稳定状态,这样一来,每相邻两个原子都共用一对电子,叫“共有”电子对,“电子对”中的任何一个电子,一方面围绕自己原子核运动,另一方面也出现在相邻原子所属的轨道上,这种运动方式形成了联系两个原子的束缚作用,就象链条一样把两个原子互相拉住,不易远离.我们把这两个“共有”的价电子所形成的束缚作用叫做“共价键”.所以,在单晶体内,各个原子都要分别和相邻近的四个原子组成四个共价键,而所有共价键中的价电子都被束缚在相邻两原子的外层轨道上.这样的组合方式称为“共价键结构”,如图 1-3 所示的情形.

2. 半导体的导电特性

半导体硅、锗共价键结构的特点是：共价键内的共有价电子所受到的束缚力，并不那么紧，在一定温度下或在一定强光的照射下，由于热能或光能转化为电子的动能，其中少数电子就可能挣脱束缚而成为自由电子。由于自由电子是带负电荷的粒子，在外电场的作用下可以作定向运动形成电子流，所以自由电子又称为带负电的载流子。

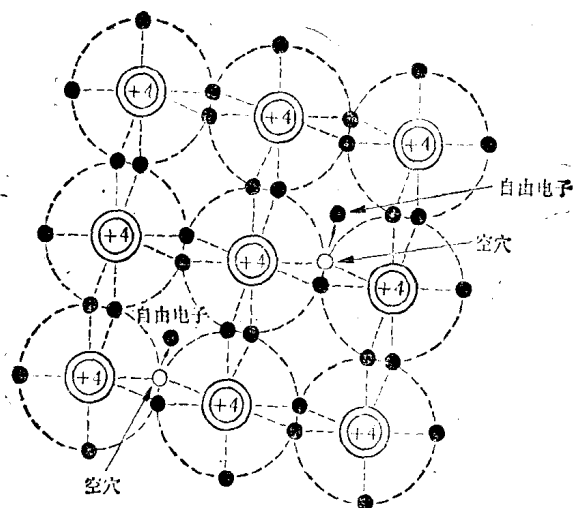


图 1-4 热运动产生的电子-空穴对

值得注意的是：共有价电子在挣脱束缚成为自由电子以后，同时留下了一个空位，如图 1-4 所示的情形，有了这样一个空位，附近的共有价电子就能很容易地过来填补，当然过来的电子又会在其原址留下新的空位，这个新空位又会被其附近的共有价电子所填补，依次递补，必然形成一种共有价电子的运动。不过由于空位出现是原子失去电子的结果，而原子失去电子必然要显正电性，因此可以认为空位是带正电的。

所以又可以把上述共有价电子的运动，想像成为一个带正电的空位在半导体中作与价电子反向的移动。为了区别于带负电的自由电子的运动，就把这种空位的运动称为“空穴”运动，空位称为“空穴”，可见空穴也是一种载流子，而且是带正电的载流子。

打个通俗的比喻，大家坐在礼堂里开会，如果前边走了人出现了空位，坐在后面的人就喜欢往前坐，这样人们依次递补空位向前坐，看起来就好象空位子向后运动一样。显然，这种移动和没有座位的人到处走动是不一样的，后一种好比是自由电子的运动，而有座位的人依次递补空位的移动则好比空穴运动。

由此可见，在一定温度下，半导体中存在着两种载流子，一种是带负电的自由电子，另一种是带正电的空穴，所以半导体在外加电压作用下，将同时产生两种载流子的导电现象，如图 1-5 所示的情形。其中的自由电子向正极移动形成电子电流，而空穴向负极移动形成空穴电流，因此流过外电路的电流等于电子电流和空穴电流的代数和，这就是纯单晶半导体的导电方式。下面我们再作一些说明。

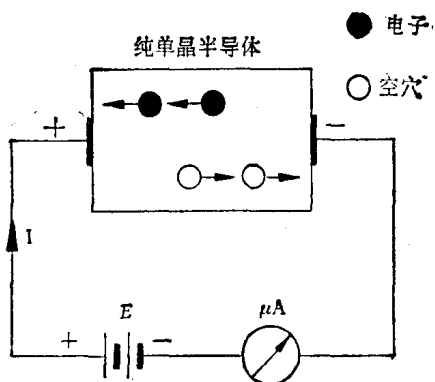


图 1-5 半导体中载流子的移动

(1) 图 1-5 中所示的空穴电流，实际上是由共有价电子依次递补空穴，而向正极移动的另一电子电流，不过为了区别于自由电子所形成的电子电流，还是叫空穴电流更为方便。

(2) 在一般室温下，硅、锗单晶半导体中的电子和空穴的数量还是非常少的，因此电路中的电流也是非常小的，不过，硅、锗单晶半导体对温度十分敏感，温度越高，电流越大。

(3) 当温度升高时，半导体里由于热运动而不断产生自由电子，同时也出现相应数量的空穴，这种过程称为“热激发”，并且把产生的电子和空穴称为“电子-空穴对”。不过，在一定温度下，半导体里的“电子-空穴对”却能维持一定的数目，这是因为随着“电子-空穴对”的增多，自由电子在运动中与空穴相遇的机会也在增多，当自由电子与空穴相遇后，就会重新结合而消失，这是一个逆变过程，我们称之为“复合”。可见，“复合”的机会是随着“电子-空穴对”的增多而增多的，因而“电子-空穴对”的增多是有限制的。在一定温度下，两种运动过程可以达到动态平衡，这时，热激发和复合的过程虽然仍在继续不断地进行，但实际存在的“电子-空穴对”数目却是一定的。

三、N 型和 P 型半导体

通过以上讨论可知，纯单晶半导体在室温下的导电性能是很差的，但是它有一些独特的导电性能是很可贵的，那就是它的导电性能容易为人们所控制。例如，温度的升高，光线的照射，有选择地掺入杂质等，就可以使其导电能力显著提高，尤其是掺杂作用，效果非常显著。例如，在硅单晶半导体中只要掺入百万分之一的有用杂质，它的导电能力就能有百万倍的增加。

为什么杂质能有这样巨大的作用呢？这仍然是由于半导体的内部结构——共价键所决定的。

1. N 型半导体

若在硅单晶半导体中掺入少量的五价元素,例如磷,磷原子就会与硅原子组成共价键结构,如图 1-6 所示。

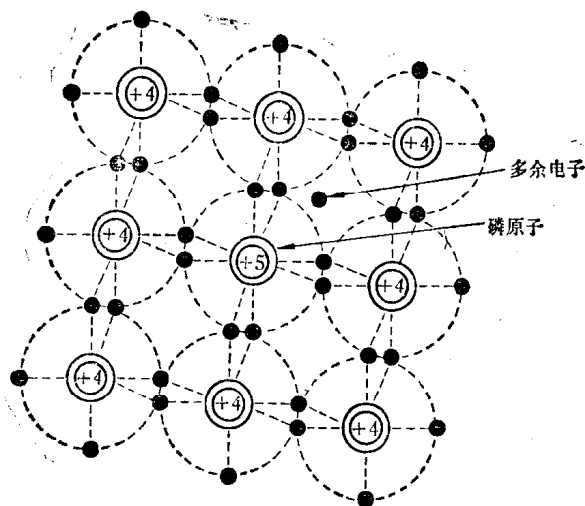


图 1-6 N 型半导体(硅掺入磷形成电子载流子)

由于磷原子的数目比硅原子要少的多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上硅原子被磷原子所代替,但由于磷原子具有五个价电子,所以一个磷原子同相邻的四个硅原子结成共价键时,还多余一个价电子,这个价电子没有被束缚在共价键内,只受到磷原子核的吸引,所以它受到的束缚力小得多,很容易挣脱束缚变成自由电子,从而使硅单晶半导体中的电子载流子数目大大增加。可见这种半导体主要是靠电子导电,所以叫做电子型半导体,或简称为N型半导体。

在N型半导体中,除了由于掺杂产生的大量自由电子外,还有由于热激发产生的少量“电子-空穴对”,因此在这种半导体中,空穴的数目相对于自由电子的数目是极少的,所以把空

穴称为“少数载流子”，而把电子称为“多数载流子”。

2. P 型半导体

若在硅单晶半导体中掺入少量的三价元素，例如硼，硼原子也会与硅原子组成共价键结构，如图 1-7 所示。

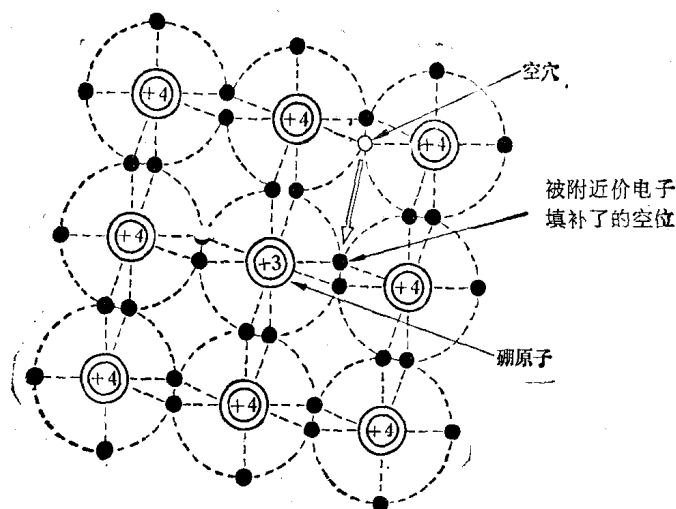


图 1-7 P 型半导体(硅掺入硼形成空穴载流子)

显然，图示情况与N型半导体完全不同，因为硼原子只有三个价电子，当它同相邻的四个硅原子结成共价键时，还缺少一个价电子，因而在一个共价键上要出现一个空位置，但是为了满足结成四个共价键的需要，这个空位置很容易接受一个外来电子的填补，而附近硅原子的共有价电子在热激发下，也很容易转移到这个空位置上来，于是就在那个硅原子的共价键上出现了一个空穴，而硼原子接受了一个价电子之后也成了带负电的硼离子。这样，每个硼原子都能接受一个价电子，同时在附近产生一个空穴，从而使硅单晶半导体中的空穴载流子数目大大增加，可见这种半导体主要是靠空穴导电，所以

叫空穴半导体,或简称为P型半导体。同样,在P型半导体中也有由于热激发而产生的少量“电子-空穴对”,所以在P型半导体中,与N型相反,空穴是“多数载流子”,而电子是“少数载流子”。

通过以上讨论可知:

(1) 在纯单晶半导体硅或锗中,掺入少量不同的有用的杂质元素,可使半导体的导电性能大大增强,由此可以获得两种类型的半导体——N型和P型半导体。

(2) 在N型半导体中,电子是多数载流子,空穴是少数载流子;在P型半导体中,则相反。

最后还应该指出,N型和P型半导体都是电中性的,对外不显电性。这主要是由于单晶半导体和掺入的杂质都是电中性的,而且在掺杂过程中既不丧失电荷也不从外界得到电荷,只是由于杂质原子的价电子数目比晶体原子的价电子数目多一个或少一个,而使半导体中出现了大量可以运动的电子或空穴,并没有破坏整个半导体内正负电荷的平衡状态。

第二节 P-N 结

在第一节中,我们讨论了N型和P型半导体的导电特性。如果在一块完整的半导体内,设法制成一边是N型,一边是P型,将会产生什么现象呢?这是一个十分重要的问题。

一、从一个实验谈起

半导体二极管就是上面所说的那种半导体,它的一部分是P型,另一部分是N型,分别用导线引出,从P型引出的一端称为二极管的正极,从N型引出的一端称为二极管的负极,

正式产品还要把半导体密封在特制的管壳内。

现在用一个二极管,两节干电池和一个手电筒的小灯泡,按图 1-8 (a) 所示的电路连接起来,小灯泡就会发光,这表明电路畅通,也意味着二极管电阻很小。如果把电池的接法倒换过来,如图 1-8 (b) 所示,小灯泡就不亮,这表明电路不通,也意味着二极管的电阻变得很大,如果用一根导线代替二极管,则不管电池按图 (a) 或图 (b) 连接,小灯泡都会发光。

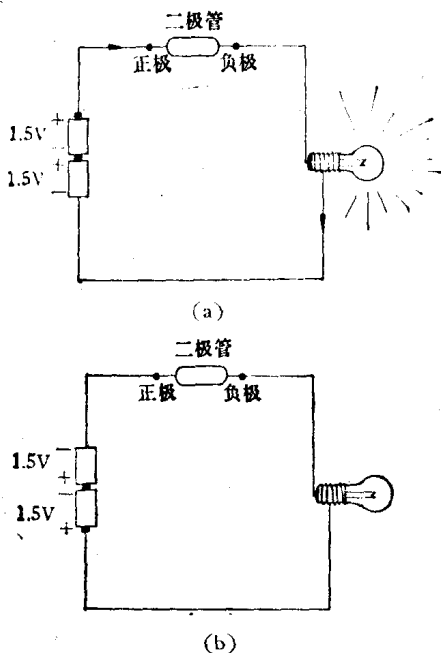


图 1-8 半导体二极管单向导电特性实验

通过这个实验可以看出, 半导体二极管的导电特性与导体不同, 只有当二极管的正极 (即半导体的 P 型部分) 与电池正极相接, 而二极管的负极 (即半导体的 N 型部分) 与电池负极相接时, 二极管的电阻才会变得很小, 使电流通畅; 反之, 电阻就会变得很大, 使电流很难通过。也就是说, 在二极管的半