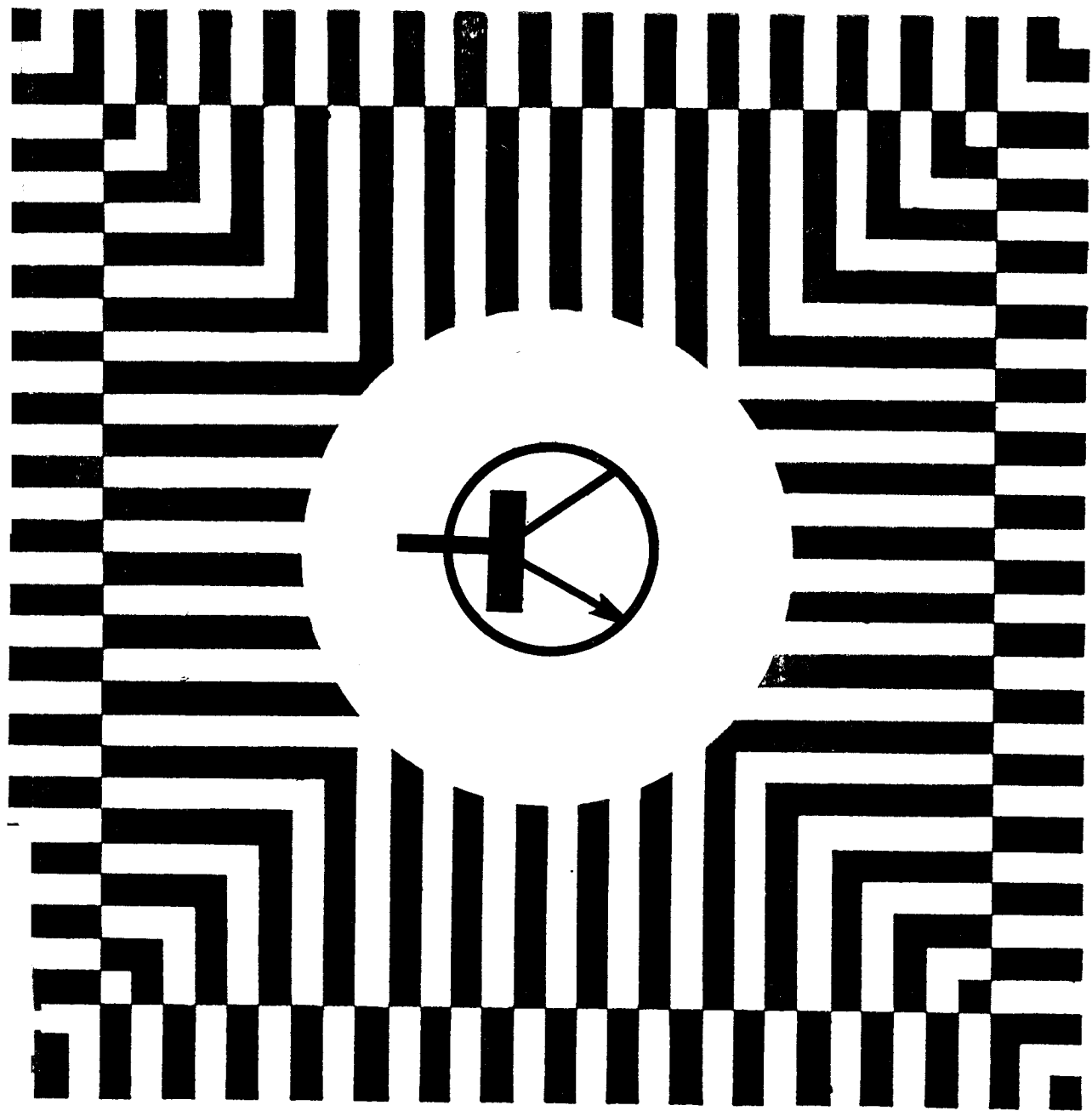


晶体管电路基础

东北三省职业技术教育教材编写组编



辽宁科学技术出版社

职业中学试用课本

晶体管电路基础

东北三省职业技术教育教材编写组 编

辽宁科学技术出版社

一九八五年·沈阳

晶体管电路基础

Jingtiguan Dianlu Jichu

东北三省职业技术教育教材编写组 编

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里1号)

辽宁省新华书店发行 沈阳新华印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: $12 \frac{1}{4}$ 字数: 280,000

1985年12月第1版

1985年12月第1次印刷

责任编辑: 刘绍山

责任校对: 丁东戈

封面设计: 邹君文

印数: 1—32,000

统一书号: 15288·169

定价: 2.10元

前 言

为了适应中等职业教育不断发展的需要,东北三省职业技术教育协会无线电教材编写组在编写了无线电专业课教学大纲的基础上,编写了一套专业课教材,计有:《电工基础》、《晶体管电路基础》、《脉冲电路基础》、《晶体管收音机》、《电子管收音机》、《晶体管录音机》、《晶体管黑白电视机》、《彩色电视机》等八本。

这套教材可供三年制职业中学无线电专业的师生在教学中使用,也可供二年制无线电专业的师生选用。

为了使教材既切合职业中学的教学实际,又遵循无线电专业本身的科学规律,我们在教材编写过程中认真注意了如下几个问题:

1. 力图体现以基本晶体管电路为基础,以晶体管收音机、电视机为重点的适应职业中学培养目标的知识体系。

2. 努力保持八本教材在专业整体上的系统性,处理好它们之间的关系。

3. 教材内容尽量浅显通俗,着重基本原理、基本概念的叙述和分析,注意知识的由浅入深、循序渐进。

4. 根据学生的基础实际,尽可能避免繁琐的数学推导,对必要的定量分析尽量采用简化计算方法,以便于理解接受。

5. 结合职业中学的特点,在教材中体现了对实验和实习教学的足够重视,用较大的篇幅编写了实验和实习的设计思路、实验和实习的原理、实验和实习方法及实验和实习的结果分析等内容。

6. 根据职业中学的教材特点,各章节中均有不少例题,每章章末均有小结和适量的习题,以供教师教学中参考和学生复习之用。

7. 为了贯彻“教育要面向现代化、面向世界、面向未来”的战略方针,在处理好传统教材和现代科学文化新成就的关系及培养学生能力、适应知识更新的需要方面做了一些不成熟的尝试。

《晶体管电路基础》一书是无线电专业的一门专业基础课。主要讲授半导体基础知识及放大、反馈、振荡、整流与稳压电路的基本理论、基本分析方法及常用电路。本课程的特点是侧重于具体电路的定性分析。本书第一、二、九章由徐福元同志执笔,第三、四章由石济民同志执笔,第五、六章由叶世俊同志执笔,第七、八章由杨福祥同志执笔。全书经李子栋、刘彭两同志审稿并由吉林教育学院玄世纯等同志审订。

由于职业教育的发展尚属初创阶段,在教学领域内有许多问题均有待于进一步探讨。虽然我们主观上希望本套教材能对职业中学教学工作有所贡献,但因时间仓促,经验不足,加之这套教材没有经过教学实践的检验,错误和不妥之处在所难免,恳请广大师生及其它读者提出宝贵意见,以便进一步修订。

东北三省职业技术教育教材编写组

1985年3月

目 录

前 言

第一章 晶体管基础知识	1
第一节 半导体基础知识.....	1
第二节 PN 结及其单向导电性.....	5
第三节 晶体二极管.....	9
第四节 晶体三极管.....	14
本章小结	27
习题一	28
第二章 晶体管放大电路基础	29
第一节 基本交流放大电路的组成和静态工作点.....	29
第二节 放大电路的基本分析方法.....	30
第三节 静态工作点稳定问题.....	44
第四节 放大电路的三种基本组态.....	47
本章小结	51
习题二	51
第三章 晶体管交流放大器	53
第一节 基本交流放大器的工作原理.....	53
第二节 交流放大器的特性指标.....	56
第三节 多级放大器的耦合.....	58
第四节 多级放大器分析.....	61
第五节 放大器的频率特性及宽带放大器.....	63
第六节 调谐放大器.....	64
第七节 场效应管放大器.....	66
本章小结	73
习题三	74
第四章 反馈放大器	75
第一节 反馈的基本概念.....	75
第二节 反馈的类型及判别方法.....	76
第三节 负反馈对放大器性能的影响.....	80
第四节 射极输出器.....	84
本章小结	86
习题四	86

第五章 正弦波振荡器	88
第一节 正弦波振荡器的基本概念	88
第二节 振荡器的基本工作原理	89
第三节 LC 振荡器	91
第四节 RC 振荡器	101
第五节 晶体振荡器	109
本章小结	112
习题五	113
第六章 功率放大器	115
第一节 功率放大器概述	115
第二节 单管甲类功率放大器	118
第三节 推挽功率放大器	122
第四节 无输出变压器的功率放大器	124
本章小结	127
习题六	127
第七章 直流放大器	128
第一节 直流放大器的特点	128
第二节 直流耦合放大器	130
第三节 直流放大器的零点漂移及其克服方法	135
第四节 差动式放大电路	138
第五节 晶体管恒流源差动电路	142
第六节 差动式放大电路的其它几种接法	143
第七节 差动式放大电路应用举例	144
本章小结	145
习题七	146
第八章 整流与稳压电路	148
第一节 单向整流电路	148
第二节 滤波电路	158
第三节 稳压管及简单稳压电路	164
第四节 串联式晶体管稳压电路	169
第五节 稳压电源实例	175
本章小结	176
习题八	178
第九章 实 验	181
实验一 示波器的使用	181
实验二 半导体二极管和三极管的特性	184

实验三	单级放大电路.....	186
实验四	负反馈放大电路.....	187
实验五	差动放大电路.....	189
实验六	串联稳压器.....	190

第一章 晶体管基础知识

本章首先复习半导体物理基础知识，并讨论本征半导体和杂质半导体的导电规律。然后介绍 PN 结的物理特性和单向导电原理。接着介绍二极管的伏安特性、主要参数和三极管的电流分配，放大作用，特性曲线和主要参数等。

第一节 半导体基础知识

一、导体、半导体、绝缘体

(一) 物质的电阻率

在自然界大量物质中，有的物质很容易传导电流。一般电阻率在 10^{-3} 欧米以下，称为导体。金属一般都是导体。有的物质几乎不传导电流，电阻率一般在 10^{10} 欧米以上，称为绝缘体。橡皮、陶瓷、塑料和石英等都是绝缘体。还有一类物质，它的导电性能介于导体和绝缘体之间，电阻率在 $10^{-3} \sim 10^{10}$ 欧米之间，我们称它为半导体。如：锗、硅、硒、砷化镓等。

电阻率 ρ 是表示物质导电性能的物理量。电阻率 ρ 代表长度为 1 米、横截面积为 1 平方毫米的均匀物质在温度为 20°C 时所具有的电阻值，其单位是欧米，单位符号是 $\Omega \cdot \text{m}$ 。物质的电阻率越小，其导电性能越好。

世界上所有的物质都表现出千差万别的特性，其根本原因在于物质内部结构不同，而就导电性能而言，半导体之所以区别于导体和绝缘体，介于二者之间，并有许多独特性质，也是和其内部结构分不开的。为从结构上说明半导体特性，就必须先研究原子的结构。

(二) 物质的原子结构

世界上一切物质都是由原子构成的。而原子又是由带正电的原子核和带负电的核外电子组成的。原子所带正电量和电子所带负电量相等，故一般情况下，整个原子是电中性的。电子绕着原子核不停地高速运转，电子与原子核保持着一定的距离，即所谓轨道半径。核外电子在不同半径的轨道上运动，这些电子运行轨道的层次称为电子壳层。每层的电子数目均有一定的规则。由内往外第一层最多有两个电子，第二层最多有 8 个电子，第三层最多有 18 个电子，第四层最多有 32 个电子，而最外层的电子不超过 8 个。如硅原子，原子核带 14 个电子电量的正电荷。而其外围有 14 个电子按规则分布在三层电子轨道上。第一层有 2 个电子，第二层有 8 个电子，第三层有 4 个电子。锗原子原子核带 32 个电子电量的正电荷。外围 32 个电子分布为：第一层 2 个，第二层 8 个，第三层 18 个，最外层也是 4 个。硅、锗原子结构如图 1—1 所示。

原子的内层电子离核较近，受原子核吸引力强，它与原子核结成较稳定的整体，称为原子实。硅、锗原子实带电量都是 $+4$ 。而最外层电子离原子核最远，所以原子核对它的束缚力最弱，也最容易在外界能量作用下改变它的运行轨道。物质的许多化学物理性质都取决于外层电子的数目，因此把外层电子数目叫化合价，把外层电子叫价电子。

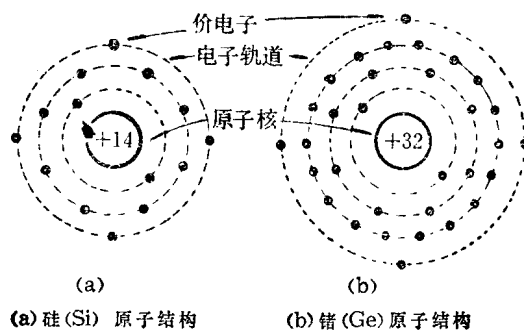
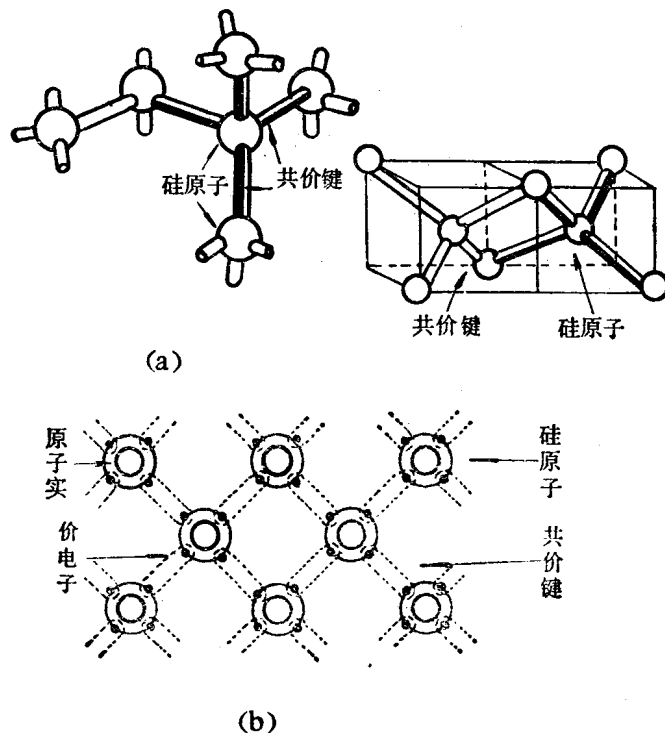


图1—1 硅、锗原子结构平面示意图

导体如金属材料铜，最外层有两个价电子。这两个价电子很容易挣脱原子核束缚而成为自由电子。大量铜原子结合成金属铜时，这些自由电子不是某一原子所独有，而是整块金属所共有。由于金属含有大量的自由电子，在外加电场作用下，自由电子会逆电场而运动形成电流。这就是金属导电的实质。

绝缘体则相反，因其外层电子受原子核束缚力很大，很难成为自由电子。所以导电能力很低，电阻率很高。

那末，半导体硅、锗原子中的价电子处于什么状态呢？为什么它的导电能力介于导体



(a) 立体模型图 (b) 平面模型图

图1—2 硅、锗晶体结构模型

和绝缘体之间？为回答这两个问题，下面我们研究本征半导体和杂质半导体。

二、本征半导体

普通一块晶体由许许多多小晶粒组成，而每个晶粒内部的原子是按着一定的几何图案有规律地排列着的。但是对整块晶体而言，在一般情况下，晶粒内原子排列虽然整齐，但每个晶粒的方向彼此不同，故原子的排列还是无规律的，不整齐的，叫多晶体。而把多晶体经加工提炼成单晶体时，如硅、锗半导体材料制成单晶体后，原子排列就由杂乱无章状态变成了非常整齐的状态，构成所谓对称的周期性点阵，形成晶体结构，如图1—2所示。

由纯净的半导体原子组成的结构完整的半导体称为本征半导体。

由于本征半导体内部原子的规则排列，所以每一个原子的价电子不仅受到自身原子核的束缚，还要受到相邻原子的原子核的束缚，即价电子处于本身原子核与相邻原子核的共同作用下，不再专属于某个原子，这种情况称为价电子的共有化运动。这时相邻的两原子都各有一个价电子为二者所共有，这两个价电子叫相邻两原子的共有“电子对”，如图1—3所示。

共有电子对的存在，使相邻两个原子相互结合起来，这种结合叫共价结合，价电子所形成的束缚作用叫做共价键。由于共价键有很强的结合力，故能使各个原子按一定形式排列，形成牢固的点阵。共价键中的电子因受两个原子核引力的约束，如果没有足够的能量是不易脱离公共轨道而跳到键外成为自由电子的。一般把处于共价键中的电子叫束缚电子。

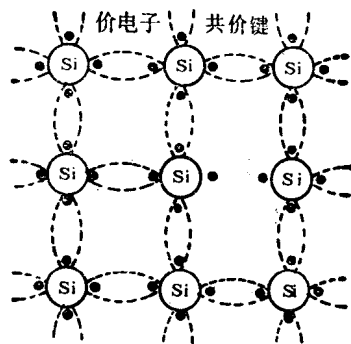


图1—3 硅晶体结构的共价键示意图

本征半导体在绝对零度情况下和无外界激发时，所有价电子都处于共价键中，呈束缚电子状态。而束缚电子不导电，所以几乎没有能够参加导电的电子，低温下的本征半导体相当于绝缘体。而在常温下，本征半导体共价键中一些价电子受热激发后获得能量，摆脱共价键的束缚而成为自由电子。同时，在共价键中就留下相应的空位。这些空位，叫做空穴。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点，如图1—4所示。

由于共价键中出现了失掉电子而产生的空穴，所以在外加电场作用下，邻近共价键中的束缚电子会来填补这些空穴，而这些电子原来位置又留下一些空穴，邻近其它电子又可转移到这些新的空位。

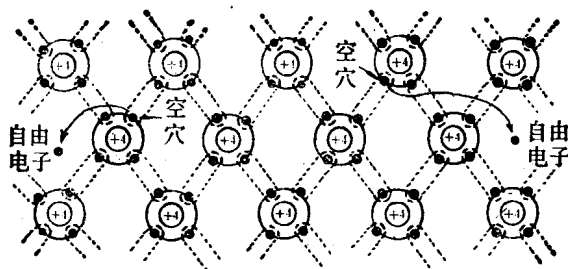


图1—4 晶体中的本征激发

这就出现了空穴的移动。而空穴移动的实质是由于束缚电子连续递补所形成，束缚电子始

终在共价键内移动。这和已摆脱共价键束缚的自由电子移动是完全不同的。空穴越多，共价键中束缚电子的移动越方便，形成的电流也越大。因此，由束缚电子在键内移动形成的半导体的导电能力，并不与束缚电子的多少成正比，而与空穴多少成正比。因此，半导体由于束缚电子移动而形成的导电能力，以空穴的移动来描绘反而更确切。可见，半导体中同时存在两种运载电流的粒子，一是空穴，二是自由电子，我们都称为载流子。把空穴看成带正电荷的载流子，把电子看成是带负电荷的载流子。载流子的多少是衡量导电能力的标志。这样半导体就有空穴和自由电子两种导电机构，这就和金属导电有了根本的区别。

在本征半导体中，空穴和电子总是成对出现的，我们称之为空穴电子对。我们把晶体中由于受热或接受其它能量而激发出空穴电子对这种现象，叫本征激发。半导体激发时产生空穴电子对，空穴与电子相遇后还会重新结合，这种结合叫复合。虽然，激发、复合不断进行，但在一定温度下，半导体内总保留一定数量的载流子。即有空穴也有电子。但任何时候本征半导体电子和空穴数总相等。一般来说，温度越高载流子越多。

当半导体两端加上电压后，电子、空穴都会在电场力作用下做定向运动，使半导体导电。空穴带正电，沿场强方向移动，电子带负电，逆场强方向移动。虽然移动方向相反，但由于所带电荷性质相反，两种载流子形成的电流方向却是一致的，都从电源正极流向负极。电路总电流则为空穴电流与电子电流之和，这点是应该注意的。

三、杂质半导体

所谓杂质，不是指本征半导体拉制过程中，不慎混在其中的其它物质。而是指用扩散方法有意掺入的其它元素的少量原子。这些原子的数量相对于半导体基体而言，微乎其微，因而形象地称之为杂质，但它却可以使半导体导电性能发生显著变化。人们利用这个特点，根据不同需要往往可以制成各种性能的半导体，从而为半导体的广泛应用提供了可能。

在杂质半导体中，因掺入元素的不同，可分为两大类即电子半导体（N型半导体）和空穴半导体（P型半导体）。

（一）N型半导体

在本征半导体硅或锗的晶体内往往掺入微量的五价元素，如磷或锑等，被称为施主杂质。由于其数量甚微，整个晶体结构基本不变。但晶体点阵中某些位置的硅原子将被磷原子所取代。磷原子最外层有5个价电子，它以4个价电子与相邻硅原子组成共价键后，还多余1个价电子。这个价电子虽不受共价键的束缚，但仍受磷原子核的正电荷所吸引，只能在磷原子核周围活动。不过受磷原子核的吸引终究比共价键的束缚作用微弱得多，通常在常温下即可脱离磷原子而成为自由电子，如图1—5所示。

磷原子由于丢失1个价电子而成为带正电的磷离子，叫施主离子。正离子数目与电子数目相等，N型半导体仍然是中性的。磷离子不能移动，不能参与导电。掺入1个磷原子则得到1个正离子和自由电子。由此可见，N型半导体中自由电子数目可以人为控制，掺入微量磷元素就可以使半导体的自由电子数猛增，但却不增加空穴数量。这点与本征半导体产生电子不同，有1个电子必有一个空穴。相反由于自由电子增多，还增加了空穴被复合的机会，所以使空穴数量反而减少。因此N型半导体中自由电子占绝大多数，自由电子

为其多数载流子，空穴则为少数载流子。N型半导体主要靠带负电的电子进行导电。

(二) P型半导体

在本征半导体中掺进微量的三价元素，如硼。这三价元素称为受主杂质。硼原子最外层有3个价电子。掺入后，晶体点阵中某些位置为硼原子所取代。它以3个价电子与周围3个硅原子组成3个完整的共价键，还有1个共价键就缺少1个价电子，因而在1个共价键上要出现1个空位，即空穴。常温下，邻近共价键中的价电子很容易填补这个空穴，而同时这个原子又形成一个新的空穴。这种补充空位所需要的能量是较小的。由于硼原子在晶体中能接受电子，故称之为受主杂质或P型杂质。当硼原子接受1个电子后，硼原子多了1个电子而成为负离子叫受主离子。同时在晶体中产生1个空穴。但在产生空穴的同时并不产生新的自由电子，只是原来硅晶体本身还仍会产生少量空穴电子对。如图1—6所

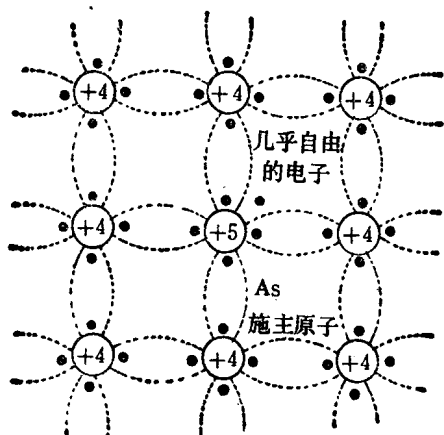


图1—5 具有施主杂质的半导体晶体结构示意图

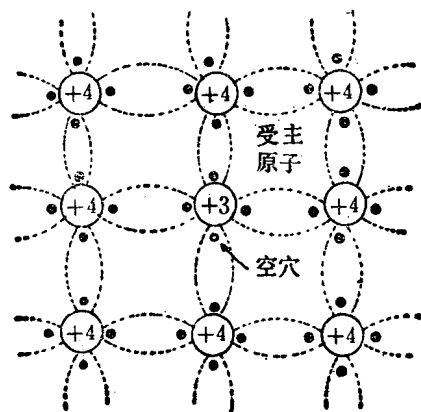


图1—6 具有受主杂质的半导体晶体结构示意图

示。所以我们控制掺杂程度即可控制多余的空穴数目。在P型半导体中，空穴数远大于自由电子数。在这种半导体中，以空穴导电为主，故空穴为多数载流子，而自由电子为少数载流子。

第二节 PN结及其单向导电性

一、PN结的基本原理

(一) PN 结

当我们把P型半导体和N型半导体以一定的制造工艺结合起来，如烧结等方法，那末在P型半导体和N型半导体交界的地方，就会出现一具有特殊物理现象的极薄区域，这就形成了PN结。而PN结是构成晶体二极管、三极管、可控硅等半导体器件的基础。因此研究它，对掌握各种晶体管和半导体器件有着重要意义。

(二) PN 结的形成

PN 结如上所述是由P型半导体和N型半导体所构成的。N型半导体在室温下，施主杂

质原子电离成带负电的电子和带正电的施主离子。P型半导体在室温下，受主杂质电离成带正电的空穴和带负电的受主离子。此外，P型半导体和N型半导体中还有少数受本征激发产生的电子和空穴。但其数量要比杂质激发的载流子少得多。应该指出，P型、N型半导体正负电荷总数是相等的，各保持电中性。

在P型半导体和N型半导体以一定方式结合以后，在它们的交界处就出现了电子和空穴浓度的差别。N型区电子多、空穴很少，P型区空穴多、电子很少。这样，电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。扩散这种物理现象在自然界中是常见的。如一瓶酒精，其分子向周围空间扩散，以至酒精气味可在离瓶稍远的地方被嗅到。这是气体分子热运动引起的气体分子的扩散现象。而载流子的热运动也会引起固体中的扩散现象。载流子扩散的结果，使P区、N区的电中性条件均受到破坏，P区失去空穴，留下带负电的杂质离子，N区失去电子留下带正电的杂质离子。由于物质结构原因，离子不能任意移动而不参与导电。这些不能移动的离子通常称为空间电荷。它们集中在交界面两侧并形成一很薄的空间电荷区。这就是所说的PN结。而在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了。因此空间电荷区有时又称为“耗尽层”。它的电阻率很高，扩散越强，空间电荷区越宽。

二、PN结单向导电性

上述多数载流子的扩散是否要一直扩散到浓度均衡为止呢？不是。因为随着扩散的进行，空间电荷区已形成。在交界面两侧留下的正负离子在交界面处就形成了一个内电场。这个内电场的场强方向是阻碍P区空穴和N区电子即多数载流子向对方区域扩散的。但内电场建立后却有利于P区电子和N区空穴即少数载流子的漂移。因为内电场出现后对少数载流子有吸引作用。只要少数载流子进入交界面这个特殊薄层，就会被内电场拉向对方区，形成少数载流子漂移。其形成的电流叫漂移电流。而由于扩散所形成的电流叫扩散电流。起初扩散运动占优势。但随着多数载流子的扩散，空间电荷区逐渐加宽，内电场越来越强，对扩散运动的阻碍作用也越来越大，扩散电流逐渐减小。与此同时，空间电荷区加宽，内电阻增强，对少数载流子的漂移却越来越有利，漂移电流逐渐增大。到了某时刻，必有扩散过去的多数载流子数量和漂移过来的少数载流子数量相等，亦即漂移电流和扩散电流彼此相等，这就达到了一种所谓动平衡状态。此时，虽然扩散和漂移仍然继续进行，但由于扩散电流与漂移电流彼此相等（相互抵消），使穿过PN结的净电流为零。使交界面两侧的电荷量不再增加，这个特殊薄层一般约数十微米厚，如图1—7所示。

由上面的讨论可知，PN结在没有外加电压时，处于动平衡状态，称为平衡PN结。而PN结的单

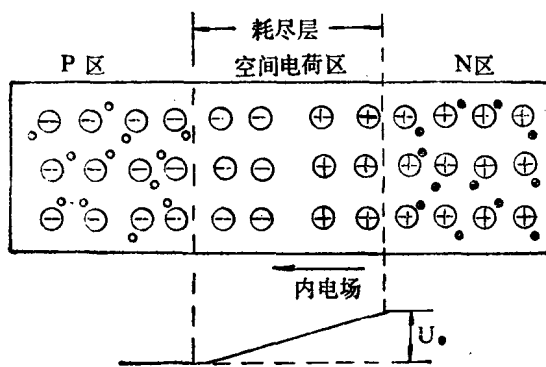


图1—7 平衡状态下的PN结

向导电性却只有在外加电压时才能显露出来。

我们先讨论外加正向电压时的情况。所谓加正向电压，即电池正极接P区，负极接N区，如图1—8所示。

由于外加电压P区为正，N区为负。外加电压方向即由P区指向N区。则P区中的多数载流子空穴和N区中多数载流子自由电子在这个电场作用下都要向PN结移动。当空穴和电子分别从左右两侧进入空间电荷区时，它们立即与区内两侧正负离子进行中和，从而减少了正负离子数量，即减少了空间电荷量，使阻挡层厚度变薄，内电场减弱。当然也可以理解为，外加正向电压在结内产生的外加电场恰好与内电场方向相反，削弱了内电场。由于内电场减弱，扩散运动遇到的阻力相应减小，P区空穴可越过PN结进入N区，N区电子也可以越过PN结扩散到P区。因为它们都是多数载流子，供应充分，所以扩散电流随外加电压增大而增大。因为这个电流是外加电压产生的，所以叫正向电流。需要指出，外加电压实际上只需零点几伏就能使正向电流大大增加。这是因为，PN结内电场会在PN结内形成一个内建电势差。内建电势差在锗PN结内只有0.2~0.3伏左右，在硅PN结内只有0.6~0.8伏左右。因此，只要外加正向电压在PN结上的电压降能够克服这个内建电势差，就会使PN结的正向电流大大增加。而且，P区、N区中载流子很多，电阻率较小。而PN结中缺乏载流子，所以电阻率很大。因此外加正向电压主要是降落在PN结上。

当外加反向电压时，反向电流很小。加反向电压就是把电极正极接到N型区，负极接到P型区，如图1—9所示。

由于外加电场方向由N型区指向P型区，因此，P型区中的空穴，N型区中的电子将受力背离PN结移动。结果P区空穴移走，

暴露了一些负离子，给空间电荷区增添了一层负电荷。同理，N区电子移走，暴露了一些正离子，给空间电荷区增添了一层正电荷。这就使空间电荷区正负电荷增多，宽度加厚，内电场加强。当然也可以看成，外加电场与内电场同向，加强了内电场。由于内电场增强，使多数载流子扩散受到了更大的阻力。P区中空穴，N区中电子很难克服内电场阻力而向对方区域扩散。但P区和N区中，由热激发产生的少数载流子却更容易逆内电场方向向对方区域漂移。即P区边界的少数载流子——电子要被PN结内电场拉向N型区，N区边界的少数载流子——空穴也将被PN结内电场拉向P型区，从而形成漂移电流。在反向电压情况下，漂移运动成为矛盾的主要方面，PN结内电流由起支配地位的漂移电流决定，方向与扩散电流相反。此电流由外加反向电压产生，所以叫反向电流。但是应强调，反向电

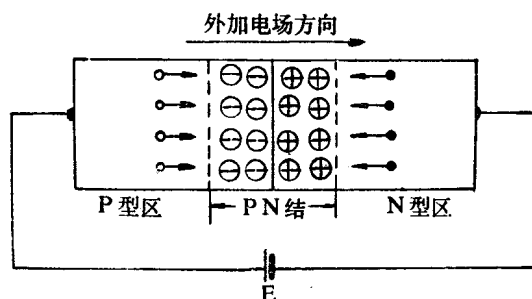


图1—8 PN结加上正向电压时的情况

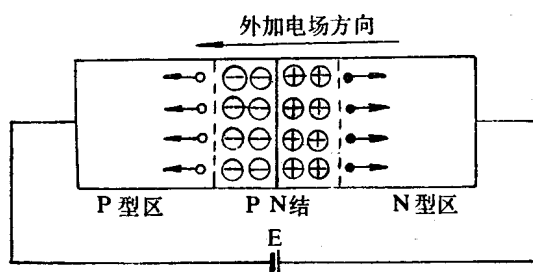


图1—9 PN结加上反向电压时的情况

流由少数载流子形成，其浓度很小，所以反向电流很小，一般为微安数量级。

在一定温度下，由热激发而产生的少数载流子数量是一定的。只要外加电压所产生的电场足以把它们都吸引过来形成电流，则电压再高，也不能使载流子数量增加，电流数值趋于恒定。这时反向电流就是“反向饱和电流”。反向饱和电流虽小，但受温度影响很大。所以，PN结加反向电压时，可认为基本上不导电，表现为一个很大的电阻。可见，PN结正向电阻很小，反向电阻很大，这就是它的单向导电性。

三、PN结电容效应

PN结除上面讨论的单向导电性外，还具有电容性质。大家知道，一个电容最基本的性质是能够充电和放电。如果PN结也有把电荷“存入”、“放出”的作用，那么我们就可以认为PN结具有电容效应。下面先讨论PN结电容效应之一——结电容。

结电容是由耗尽层引起的。首先，耗尽层内缺少导电载流子，导电能力很低，相当于介质。耗尽层两侧的P区和N区的导电能力相对来说比较高，相当于金属。其次，外加电压改变时，耗尽层电荷量将随之改变。这种现象和电容作用类似。

当外加正向电压增大时，空间电荷区变窄。这是因为P区空穴和N区的电子在增强了的外电场作用下，又有一部分进入空间电荷区，中和掉了一部分正离子和负离子。因此外加正向电压增加不仅使扩散电流增大，而且使一部分空穴和电子存入了“空间电荷区”，如图1—10(a)所示。而当外加正向电压减少时，空间电荷区变宽，一部分电子和空穴从“空间电荷区”取出来，使一部分正负离子重新暴露出来。外加反向电压越高，外电场使多数载流子背离交界面的运动越剧烈，更多的空穴和电子从空间电荷区放出来，如图1—10(b)所示。这就是所谓耗尽层有与电容类似的充、放电效应。由这个耗尽层引起的电容叫结电容或势垒电容。

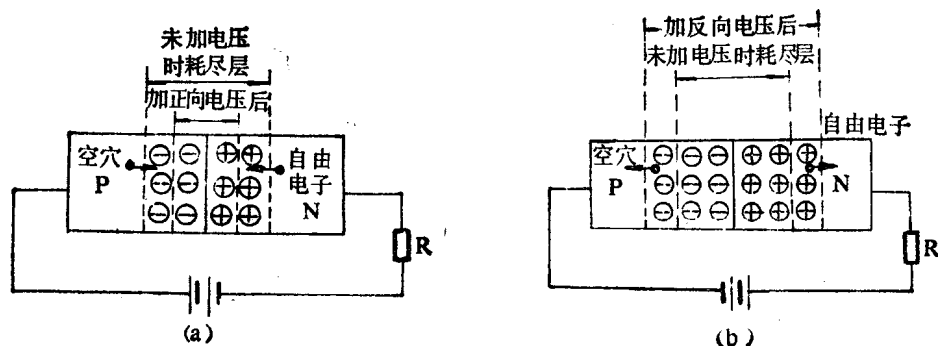


图1—10 PN结的结电容

结电容容量在PN结加正向电压时，数值较大，加反向电压时，数量较小。一般在几皮法至一、二百皮法之间。

下面讨论PN结电容效应之二——扩散电容。

扩散电容，是由N区电子和P区空穴相互扩散过程中的积累引起的。具体讲，PN结在

正向电压作用下, P区空穴向N区扩散, N区电子向P区扩散。而扩散到对方区域后, 由于来不及立即和对方区域多数载流子复合掉, 因而会在PN结附近, 有一定程度的积累。而这种积累的程度会随着外加电压的大小或者说随着扩散电流强弱而有所增减。这是一种“存”“放”电荷的效应。因此把这种由于扩散过程形成的电容叫做扩散电容。

扩散电容在正向导电时, 数值较大。加反向电压时, 小到可以忽略。一般数值在0~几百皮法之间。

结电容和扩散电容是并联关系。PN结的总电容为二者之和。当PN结正向运用时, 扩散电容比结电容大的多。且正向电压时, 结阻很小。结电容与结电阻是并联关系, 作用不明显。可认为只有扩散电容起作用, 其数值在几百皮法。PN结反向运用时, 扩散电容为零, 只考虑结电容, 其数值为几个皮法。

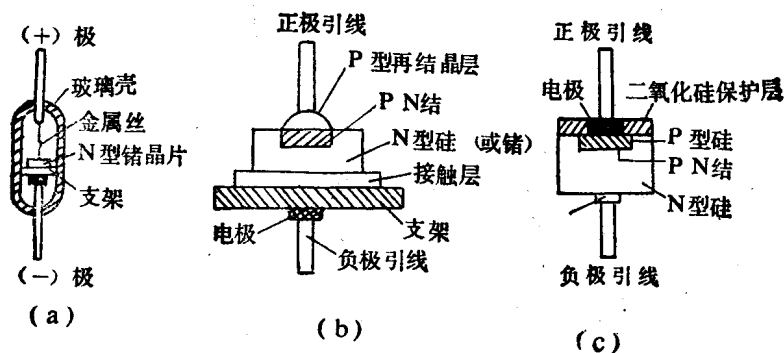
由于PN结存在电容, 使得它工作在交流时出现电抗分量。低频时尚可忽略。而当工作在较高频率时, 容抗下降, 旁路作用随频率增高而越加明显。使其单向导电性不能发挥, 即高频特性变坏。因此PN结总电容的存在, 限制了晶体管的最高工作频率。

第三节 晶体二极管

一、二极管的结构

根据晶体二极管的结构不同, 可分为点接触型二极管和面接触型二极管两种。

点接触型二极管, 是由一根很细的金属触丝和一块半导体(如锗)的表面接触。然后在正方向通过很大的瞬时电流, 使触丝和半导体牢固地熔接在一起, 构成PN结, 并做出相应的电极引线, 外加管壳密封而成。与金属丝接在一起的引线是二极管正极, 从晶体支架引出的线为二极管的负极。点接触二极管由于金属触丝很细, 形成的PN结面积很小, 所以极间电容很小, 使其可能在很高的频率下工作。例如: 常用的点接触二极管2AP1—2AP8工作频率可达150兆赫。所以, 点接触二极管多用于高频检波, 变频和开关电路中。但不能承受高的反向电压和大的电流。只能用来作小电流整流。点接触型二极管结构, 如图1—11(a)所示



(a) 点接触型

(b) 面结型 (合金型)

(c) 面接触型 (平面型)

图1—11 二极管的几种主要结构类型

面接触型或称面结型晶体二极管，结构如图1—11(b)所示。它的管芯是面接触的。以合金法或扩散法做成。图示是用合金法制成的面结型二极管的结构。由于是面接触，PN结面积比较大，允许通过的正向电流可比点接触型大数倍，数十倍乃至数万倍。但由于极间电容较大，所以不适宜用在高频电路中，只适用于整流。如 2CP31是面接触型硅二极管，最大整流电流为250毫安，最高工作频率只有 3 千赫。

图 1—11(c)则是采用光刻、杂质原子扩散等近代生产工艺制成的平面型二极管。结面积较小时，PN 结电容亦小，所通过的工作电流也小。这种二极管适用于作脉冲电路中的开关元件。结面积较大时，适用于大功率整流。

二、二极管的伏安特性

(一) 什么是伏安特性曲线

为了正确使用二极管，必须了解二极管的性能，即搞清楚加在二极管两端的电压 U 和通过二极管电流 I 之间的关系。由于电压用伏表示，电流用安表示，所以通常把二极管电压和电流的关系称为二极管伏安特性。为了使伏安特性更易于分析观察，常常把测得的成对的电压、电流数据在 $I-U$ 坐标上描点绘成曲线。这曲线称为二极管伏安特性曲线。

(二) 伏安特性的测试

图 1—12(a)、(b)就是用来测试二极管伏安特性的原理性电路。

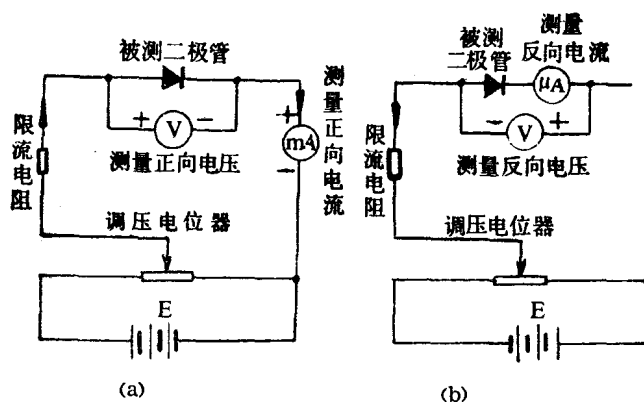


图1—12 测量二极管正、反向伏安特性原理图

测试过程简述如下：先如图接好电路。而后，逐点改变调压电位器的滑动接头位置，记录每一次电压表和电流表所显示的数据。然后在横坐标为 U 、纵坐标为 I 的坐标平面上标出相应点。再把这些点用光滑的曲线连接起来，即得到如图所示的二极管伏安特性曲线。测量正向特性曲线时，所加电压较小，但电流比较大。测量反向特性曲线时，所加电压较大，电流较小。要注意两种情况，电池、电表接法及量程之不同。

图 1—13是某硅二极管的特性曲线，其它二极管的特性曲线形状与之类似。

(三) 二极管伏安特性曲线，大体可分为正向特性，反向特性和反向击穿部分，下面分别加以介绍

1. 正向特性。二极管两端电压 U 为零时，电流 I 也为零，所以特性曲线由坐标原点开始。其原因是在 PN 结未有外加电压时，结内只有一个内电场。在这个电场作用下所产