

电子线路

北京职业高中电子类教材编审组

王军伟 宋树清 李小军 梅光宇 编

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书内容包括：半导体基础知识和器件，低频小信号放大器，调谐放大器，负反馈放大器，正弦波振荡器，直流放大器，集成电路基础，功率放大器，整流及稳压电路，调制、解调及变频电路。

本书注重职业教育特点，分析电路时，避免使用高等数学及复杂公式，而着重介绍基本概念、分析方法和实用工程计算。书中编集了各单元电路的调试、故障排除实验。

电 子 线 路

北京职业高中电子类教材编审组

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

山东电子工业印刷厂印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:23.125 字数:549千字

1986年8月第1版 1994年10月第10次印刷

印数:196500—206600册 定价:11.00元

ISBN 7-5053-0407-0/TN·149

出版说明

随着中等教育结构改革的不断深入，职业高中有了很大发展，为了解决当前急需的教材问题，我们和电子工业出版社共同组织了职业高中电子类教材编审组。该组由有经验的职业高中教师，从事多年电子技术研究工作的工程师和高等院校的讲师、副教授组成，并请北京市职业教育研究会理事长、北京教育学院副院长邵绪朱同志担任编审组指导。

按计划首批编写《电工原理》、《电子线路》、《黑白电视机原理与维修》(上)、《黑白电视机原理与维修》(下)、《收录机原理与维修》、《脉冲与数字电路》、《彩色电视机原理与维修》共七种，以后还将编写计算机等其他方面的专业课教材，使之成为一套具有职业高中特色的电子技术专业教材。

这套教材的编写原则和编写大纲是遵循国家教委有关对中等职业技术教育的要求和在各职业高中制定的教学大纲(草案)的基础上，经过认真、反复地讨论而拟定的。在编写过程中吸取了北京市几年来职业高中的教学经验，特别注意了知识的完整性、系统性、科学性和实用性。但由于编写这一层次的教材，确实是一个新课题，肯定有不妥之处，希望读者在使用过程中提出宝贵意见，以便进一步改进。

北京教育学院职业教育研究室

1986年3月

前 言

本书为职业高中电子技术专业教材，总参考教学时数为 200 学时，其中实验课为 20~25 学时。本书主要内容包括：半导体基础知识和半导体器件；低频小信号放大器基础和各类放大器；各类振荡器；整流及稳压电路；集成运算放大器。为便于讲授与学习，每章都有小结和习题。带“*”的为选修内容。

本书分九章。第一、二章由团结湖一中职业高中教师宋树清编写；第三、四章由 136 中职业高中教师李小军编写；第五、六、七章由 148 中实验职业高中教师梅光宇编写；第八、九章和实验由 136 中职业高中教师王军伟编写，并由王军伟担任主编。

参加本书审定的有：北京无线电工业学校何希禹讲师；北京教育学院副院长邵绪朱。最后由王昌喜讲师阅改并完成全稿的编辑加工。

由于编审者经验不足，水平有限，书中会有一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

北京职业高中电子类教材编审组

1986年3月

目 录

第一章 半导体基础知识和晶体二、三极管	1
第一节 半导体基础知识	1
一、导体、绝缘体和半导体	1
二、半导体的共价键结构	1
三、本征半导体与两种载流子	2
四、杂质半导体	4
第二节 PN结	6
一、PN结的形成	6
二、PN结的单向导电特性	8
三、PN结的电容效应	9
第三节 晶体管二极管	9
一、晶体二极管的结构	9
二、晶体二极管的伏安特性	11
三、二极管的分类和主要参数	13
四、晶体二极管的简易测量	14
五、硅稳压二极管	15
第四节 晶体三极管	17
一、晶体三极管的结构及放大原理	18
二、晶体管放大的概念和三种联接方式	22
三、晶体三极管特性曲线	23
四、晶体三极管的参数	28
五、晶体三极管的简易测量	30
本章小结	32
习题	33
第二章 小信号放大器	35
第一节 基本放大器	35
一、放大器的基本概念	35
二、低频小信号单管共发射极放大器构成原理.....	38
第二节 低频小信号放大器的直流分析	42
一、放大器直流通路的计算法	42
二、放大器直流通路的图解法	45
三、电路元件参数变化对负载线和工作点的影响	47
四、静态工作点的稳定问题.....	49
五、几种常用工作点稳定的放大电路	50
第三节 低频小信号放大器的交流分析	58

一、放大器交流通路的估算法	59
二、放大器交流通路的图解法	63
三、小信号 h 参数等效电路法	68
第四节 低频小信号放大器分析举例	74
一、具有电流负反馈的共发射极放大电路	74
二、具有电压负反馈的共集电极放大电路	76
三、共基极放大器及三种电路比较	82
第五节 放大器的频率特性	84
一、电路元件带来的影响	85
二、放大器的频率特性	86
第六节 阻容耦合多级放大器	88
一、级间耦合方式	88
二、阻容耦合多级放大器的分析	89
第七节 高频小信号调谐放大器	92
一、LC 并联谐振回路的频率特性	92
二、简单调谐放大器	94
三、典型高频小信号调谐放大器	97
四、高频小信号调谐放大器举例	100
第八节 场效应晶体管放大器	104
一、结型场效应管	105
二、绝缘栅型场效应管	110
三、场效应管的参数及使用注意事项	112
四、场效应管与晶体管的比较	113
五、场效应晶体管放大器举例	113
本章小结	116
习题	117
第三章 负反馈放大器	121
第一节 反馈的基本概念	121
一、反馈的定义	121
二、负反馈放大器的组成及方框图	122
三、反馈放大器的分类	123
四、反馈的判断方法	126
第二节 负反馈对放大器性能的影响	128
一、降低放大倍数	128
二、提高放大倍数的稳定性	129
三、改善非线性失真	131
四、对放大器内部噪声的影响	132
五、展宽频带	132
六、对输入电阻的影响	133
七、对输出阻的影响	134
第三节 电压串联负反馈放大器	136
一、判断反馈类型	137

二、交流参数计算	137
三、射极输出器的特点及应用	138
第四节 电流串联负反馈放大器	140
第五节 低频放大器的自激和防止	143
一、自激的概念	143
二、自激的产生原因及防止	144
本章小结	145
习题	146
第四章 正弦波振荡器	149
第一节 振荡的基本原理	149
一、振荡器的定义	149
二、振荡器的组成	149
三、振荡器的分类	150
四、振荡器的起振和平衡	150
五、振荡条件	152
第二节 LC正弦波振荡器	154
一、变压器耦合(互感耦合)振荡器	154
二、电感耦合(电感三点式)振荡器	157
三、电容耦合(电容三点式)振荡器	158
四、三点式振荡器相位条件的一般判断法则	159
五、电容三点式振荡电路的改进	160
第三节 频率稳定与石英晶体振荡器	162
一、振荡频率的稳定	162
二、石英晶体的特点	164
三、石英晶体振荡器	166
第四节 RC振荡器	168
一、RC移相式振荡器	168
二、RC桥式振荡器	173
三、双T型振荡器	176
本章小结	178
习题	178
第五章 直流放大器	181
第一节 直流放大器的特点	181
一、直接耦合	181
二、电位移动问题	183
三、零点漂移问题	185
第二节 差动放大器	187
一、双端输入-双端输出差动电路	187
二、实用电路介绍	189
三、差动放大器的改进措施	193
第三节 其它形式的差动电路	194

由上而下

一、单端输入-双端输出式差动电路	194
二、双端输入-单端输出式差动路	195
三、单端输入-单端输出式差动电路	196
四、输入信号为一般形式时的分析方法	197
本章小结	197
习题	197
第六章 集成运算放大器	199
第一节 集成电路概述	199
一、什么是集成电路	199
二、集成电路的特点	199
三、集成电路的分类及用途	201
四、集成运算放大器	201
五、集成运算放大器的分类	201
第二节 集成运算放大器电路分析	203
一、集成运算放大器的符号	203
二、集成运算放大器的封装形式	203
三、集成运算放大器的方框图	204
四、集成运算放大器	205
第三节 运算放大器的基本功能	212
一、运算放大器的基本接法	212
二、运算放大器的基本应用	215
三、关于“虚地”概念的几个问题	217
本章小结	218
习题	218
第七章 低频功率放大器	220
第一节 功率放大器的特点和分类	220
一、特点	220
二、分类	221
第二节 甲类单管功率放大器	222
一、变压器的作用	222
二、放大器的功率	224
三、放大器的非线性失真	228
第三节 乙类推挽功率放大器	229
一、电路组成	230
二、工作原理	230
三、电路性能分析	231
四、放大器的非线性失真	237
五、乙类推挽功率放大器的简单设计举例	239
第四节 无变压器功率放大器	240
一、概述	240
二、无输出变压器功率放大器	241

三、互补对称功率放大器	243
四、无变压器功率放大器的缺点	253
第五节 大功率管的保护	255
一、晶体管的热击穿及其保护措施	255
二、晶体管的过压击穿及其保护措施	256
三、二次击穿及其防护措施	257
第六节 集成功率放大器	258
一、5G38功率放大器	258
二、SL-38功率放大器	264
本章小结	264
习题	265
第八章 晶体管直流稳压电源	267
第一节 整流电路	267
一、单相半波整流电路	267
二、单相全波整流电路	269
三、桥式整流电路	271
四、倍压整流	273
五、小结	275
第二节 滤波电路	275
一、电容滤波电路	276
二、电感(L型)滤波器	279
三、 Γ 型滤波电路	281
四、 π 型滤波器	281
五、几种滤波电路的特点比较(小结)	282
第三节 直流稳压电源的基本原理	282
一、稳压的必要性和主要性能指标	282
二、常用的稳压方法	283
第四节 并联型硅稳压管稳压电路	284
一、稳压原理	284
二、电路中各元件的选择	285
三、稳压电路的主要性能指标	287
第五节 串联型晶体管稳压电源	287
一、串联型晶体管稳压电路的基本电路	288
二、串联型稳压电路性能的改进	293
三、实例分析	298
四、串联晶体管稳压电源的电路设计	300
第六节 其它类型稳压电源	301
一、集成电路稳压电源	301
二、开关式稳压电源简介	303
本章小结	304
习题	305

第九章 调制、解调和变频	306
第一节 调制、解调概述	306
一、调制的作用与基本方法	306
二、调制的方式	307
三、解调	308
四、非线性电路及其分析方法	308
第二节 调幅与检波	309
一、调幅的基本原理与电路	309
二、检波	313
第三节 变频	316
一、变频及其作用	316
二、变频原理及电路分析	318
第四节 调频与鉴频	321
一、调频波与调频电路	321
二、鉴频的基本方法	324
三、鉴频电路分析	324
本章小结	333
习题	333
实验	335
实验一 测量晶体二极管和晶体三极管的特性	335
实验二 单管共发射极放大电路的调整与测试	335
实验三 两级共发射极放大器的综合测试	337
实验四 负反馈放大器	339
实验五 LC正弦波振荡器	340
实验六 差动放大器	340
实验七 运算放大器性能测量	342
实验八 变压器耦合推挽功率放大器	344
实验九 OTL功率放大器	346
实验十 整流滤波电路	347
实验十一 串联稳压电路	348
附录	350
附录一 半导体器件型号命名法	350
附录二 半导体二极管参数举例	350
附录三 部分常用半导体三极管参数举例	351
附录四 硅稳压二极管 2CW 系列	355
参考书目	356

第一章 半导体基础知识和晶体二、三极管

内容提要(1)有关半导体材料的基础知识；(2)晶体二极管的工作原理及特性参数；(3)晶体三极管的工作原理及特性参数。

目的要求 (1)弄清半导体的导电理论及共价键结构、自由电子、空穴、P型半导体、N型半导体等概念；(2)掌握PN结的形成以及其单向导电性；(3)掌握二极管、三极管的工作原理、特性、参数及测量和使用三用表的基本知识。

第一节 半导体基础知识

一、导体、绝缘体和半导体

物质用其导电性能来衡量，可以分成三类。一类是导电性能良好的物质，叫**导体**。如银、金、铜、铝、铁等金属都是导体。另一类是几乎不能导电的物质，叫**绝缘体**。如塑料、陶瓷、玻璃、橡皮等。还有一类物质，它们既不象导体那样容易让电流通过，又不象绝缘体那样几乎不能导通电流。它们的导电性能介于导体和绝缘体之间，这样一类物质叫**半导体**。如硅、锗、砷化镓等都是半导体。

物质之所以具有不同的导电性，在于物质内部原子本身的结构和原子与原子间的结合方式。它们的导电能力决定于其内部运载电荷的粒子——**载流子**的多少和运动速度的快慢。我们知道，原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的，电子受原子核束缚力的作用，在核外的电子分成几层不停地绕核旋转。比较起来金属材料的外层电子受核的束缚力最小，因此有很多电子能够挣脱原子核的束缚而游离出来，成自由电子。这些自由电子便成了运载电荷的载流子，它们在外电场的作用下作定向运动形成电流。所以金属的导电性能良好。

在绝缘材料中，原子的外层电子受原子核的束缚力很大，几乎不能挣脱原子核的束缚成为自由电子。绝缘材料原子结构的这一特点决定了它几乎不能导电的性质。

半导体材料的原子结构比较特殊，其外层电子既不象导体那样容易挣脱掉，也不象绝缘体那样束缚得很紧。这就决定了它的导电性能介于导体和绝缘体之间。

二、半导体的共价键结构

(一) 硅和锗的原子结构

让我们来看半导体材料硅和锗的原子结构。如图1-1所示。硅原子核内带14个正电荷，核外的14个电子分成三层，最外层是4个电子。锗原子核内带32个正电荷，核外32个电子分四层，最外层也是4个电子。不难发现，虽然它们的核外电子的数目不同，但最外层的电子都是四个。这就决定了它们会有某些共同的物理化学性质。通常把原子的最外层电子叫价电子，元素的原子有几个价电子就称该元素为几价元素。所以硅和锗都

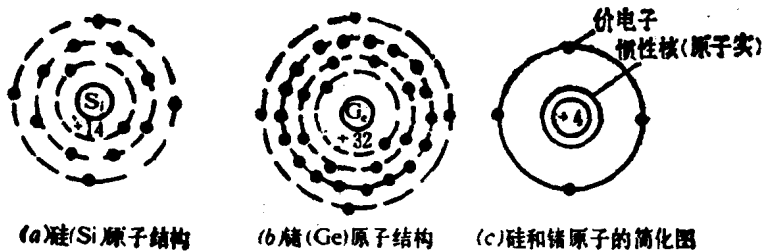


图 1 - 1 硅、锗原子结构平面示意图

是四价元素。为了讨论方便把半导体原子核画成图1-1(c)。

研究证明，硅、锗等半导体的原子相互结合的时候，原子之间的距离都相等，它们按照一定的规律排列成晶体形状，因此习惯上又把半导体叫做晶体。下面我们以硅为例，讨论半导体的共价键结构。

(二) 半导体的共价键结构

从化学课程中我们知道，原子最外层电子的数目决定了元素的性质。原子最外层有 8 个电子时称为稳定结构。物质的原子在结合时总希望自己能达到稳定结构。硅原子的

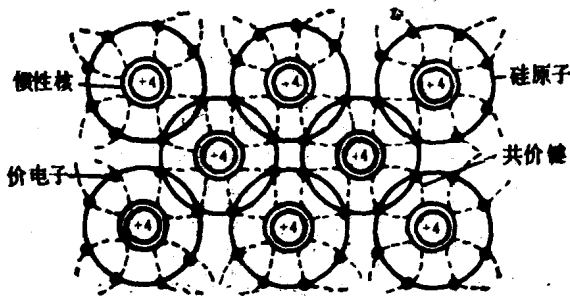


图 1 - 2 硅晶体的共价键结构

最外层电子是 4 个，它要达到稳定结构必须再获得 4 个电子。事实上，硅原子在结合的时候，每个原子最外层的四个电子，不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的 4 个原子发生联系。如图1-2所示。一方面，每个硅原子都从邻近的四个硅原子那里各“借”来一个电子，使自己的最外层有 8 个电子，形成稳定结构(如图1-2中实线所示)。另一方面，它同时也把

自己最外层的 4 个电子分别“借”给周围的四个原子，使它们也能形成稳定结构。这样，每两个原子之间就有一对共用的电子(如图 1-2 中虚线所示)。即这两个电子既能出现在自身原子核的轨道上，也时常出现在相邻的另一个原子的轨道上。我们把这两个共用的价电子所形成的束缚叫做共价键。硅原子之间的这样一种结合方式叫共价键结构。

三、本征半导体与两种载流子

(一) 本征半导体和本征激发

上面所说的这种不含杂质的、原子按一定规律排列得很整齐的半导体叫做本征半导体。本征半导体的这种共价键的稳定结构，只有在周围温度很低的情况下才能存在。这时，由于电子全部地被束缚在共价键里，所以本征半导体中没有载流子，也就是说它相当于一个绝缘体。但是，半导体的价电子受原子核的束缚力不象绝缘体那么大。在常温下，会有少数价电子由于热运动获得足够的能量，挣脱束缚跳出共价键游离成为自由电子。从而形成电子载流子。如图 1-3 所示。通常把这种现象叫做热激发或本征激发。

自由电子在外电场的作用下，产生带负电的电子电流。

(二) 半导体中的另一种载流子——空穴

值得注意的是，价电子挣脱束缚成为自由电子后，同时在共价键上留下了一个缺少电子的空位子，这个空位在效果上相当于一个与电子带相同电量的自由正电荷，通常把它叫做空穴。空穴在外电场的作用下，也能发生运动状态的改变，产生带正电的空穴电流。

空穴究竟是怎样改变状态后才产生电流呢？让我们来看硅晶体结构平面示意图1-4。设空穴首先在图1-4(a)中A处出现。在外电场(图1-4(d))的作用下，邻近原子上的价电子很

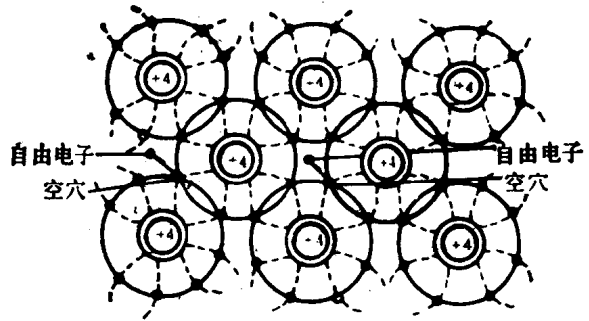


图1-3 热激发产生电子-空穴对

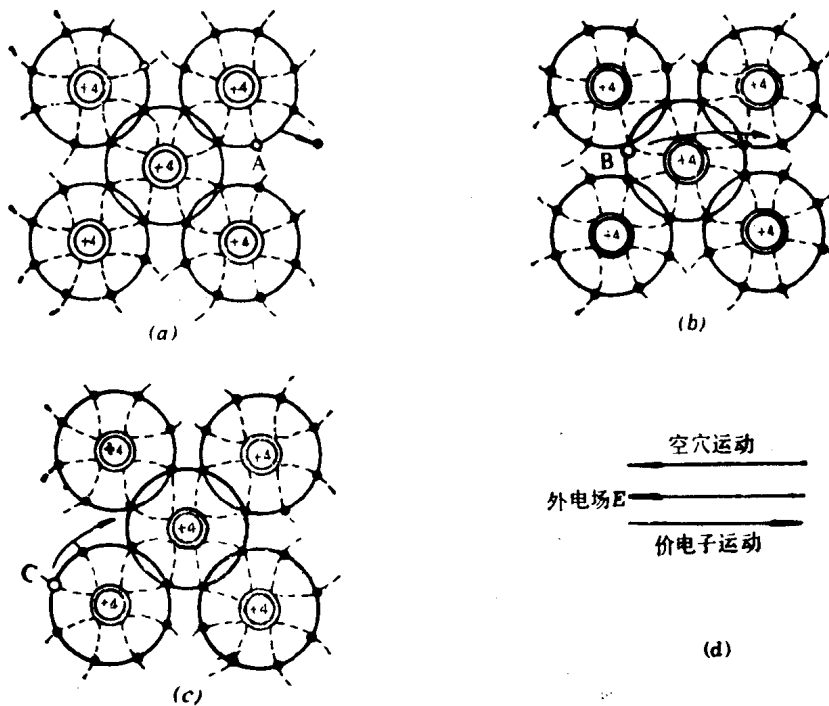


图1-4 空穴的运动过程

容易挣脱共价键的束缚，跳到A处的空穴中去。而在B处留下了新的空穴(图1-4(b))。这就相当于空穴从A处移到了B处。若邻近原子的价电子又跳到B处，则空穴又从B处转到了C处(图1-4(c))，由此可见，在外电场的作用下，价电子的递补，形成空穴沿电场方向运动，这就是空穴导电的过程。

(三) 两种载流子和电子空穴对

综上所述，在一定的温度下，半导体内有两种载流子。一种是带负电的自由电子，一种是带正电的空穴。这是半导体的一个重要特征。半导体在外电场作用下形成的电流，由两部分组成。一部分是自由电子逆电场方向运动形成的电子电流，另一部分是由

共用价电子递补空穴所形成沿电场方向的空穴电流。两种载流子移动的方向相反，但所形成电流的方向是相同的，如图1-5所示。即：

$$I = \text{电子电流} + \text{空穴电流}$$

应该指出，半导体内由于热激发而不断地产生自由电子，同时出现数量相等的空穴。因此，自由电子和空穴总是相伴而生，成对出现的。所以，把它们叫做电子-空穴对。

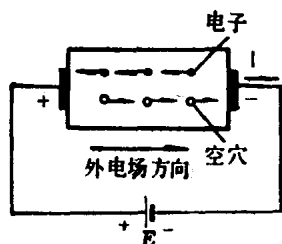


图1-5 半导体的载流子运动

另一方面，自由电子在运动中，又会重新回到空位子上，与空穴结合，使电子-空穴对消失。这样一个与激发相反的过程叫做复合。不难看出，激发和复合的过程也使空穴产生了位置的移动。

在半导体中，激发产生电子-空穴对和复合消灭电子-空穴对的运动是同时进行着。在一定的温度下激发与复合可以达到动态平衡，即激发产生的电子-空穴对与复合消灭的电子-空穴对数量相等，半导体内的电子-空穴对保持一定的数目。

半导体中电子-空穴对的多少与温度有关，温度越高，电子-空穴对越多，导电性能越好。反之导电性能就越差。人们利用半导体的这种性能制成热敏元件。另外，用其它方法如光照或掺入“杂质”等，也能改变半导体的导电性能。这样就能人为地控制半导体电导性的强弱，制成有各种用途的半导体器件。

四、杂质半导体

利用在本征半导体里掺入杂质(三、五价元素)的方法，就得到了杂质半导体。掺杂的目的是要控制半导体的导电率。

(一) N型半导体

在本征半导体中掺入少量的磷和锑等五价元素，就得到了N型半导体。下面以本征硅中掺入少量磷为例进行讨论。

由于硅原子比掺入的杂质——磷原子的数目多得多，所以整个晶体的结构是不变的，只是某些位置上的硅原子被磷原子所代替。如图1-6所示。但是磷有五个价电子，其中的四个同周围的硅原子组成共价键，剩下的一个价电子没有被束缚在共价键内，而只受磷原子核的吸引，所以它所受到的束缚力弱得多。在室温条件下，所有磷原子中多余出的价电子都能挣脱原子核的束缚，变成自由电子。由于硅中掺入磷以后，每个磷原

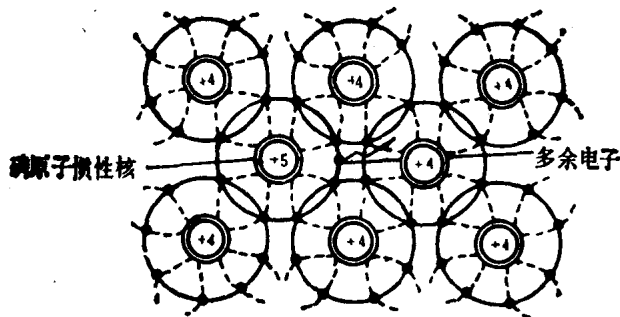


图1-6 N型半导体平面结构示意图

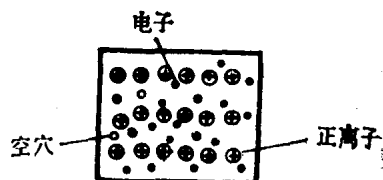


图1-7 N型半导体中带电粒子的分布

子总能贡献出一个自由电子。所以通常把这类杂质叫做施主杂质或施主元素。

磷原子失去一个电子后，便成了带正电的磷离子。磷离子与空穴不同，它被牢牢地固定在晶格内，不能自由移动。因此它不是载流子。

一般情况下，掺入硅中的磷原子，相对于硅原子来说数量甚微。但是，却比本征硅中电子-空穴对的数量大很多倍。因而使半导体中载流子的数量发生了很大的变化。首先，由于每个磷原子能提供一个自由电子，使自由电子的数量大大增加，半导体的导电性能增强了很多。其次，由于自由电子的增多，复合的机会也随之增多了，使本征激发产生的空穴明显减少。与此同时还出现了很多正离子。（如图1-7所示）。为了区别，通常把这里的自由电子叫做多数载流子，把这里的空穴叫做少数载流子。不难看出，若在这种杂质半导体两端加上电压，其中的电流仍然是电子电流和空穴电流之和，但是。此时电子电流比空穴电流大很多倍。空穴电流几乎可以忽略。也就是说，这种半导体主要靠自由电子导电。所以把它叫做电子型半导体或N型半导体。

（二）P型半导体

在本征半导体中掺入少量的硼或镓等三价元素，就得到了P半导型体。下面以本征硅中掺入硼元素为例进行讨论。

同前面讨论的N型半导体类似，本征硅中掺入极少量的硼原子后，晶体的结构也不改变，只是某些位置上的硅原子被硼原子代替，如图1-8。由于硼原子只有三个价电子，所以它与周围的四个硅原子组成共价键时就少一个电子。这时它会在其附近的硅原子上“俘获”一个价电子来补充，组成稳定结构。在这一过程中，硼原子接受了一个电子变成负离子，同时相当于硼原子“释放”出一个空穴。如图1-8所示。在室温条件下，几乎所有的硼原子都能释放一个空穴，从而使半导体中空穴的数量大大增加，导电性能明显增强。

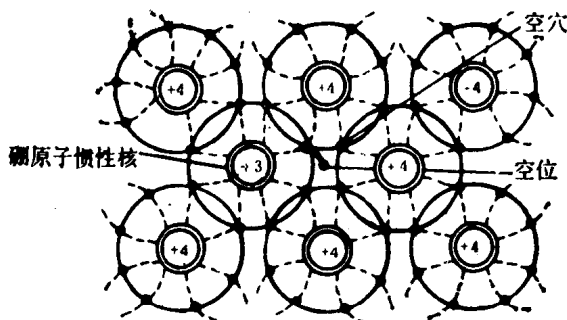


图1-8 P型半导体平面结构示意图

同N型半导体的情况比较，这里的硼原子都是接受一个电子，因此把这一类杂质叫做受主杂质或受主元素。这里的空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。这种半导体主要靠空穴导电。所以把它叫做空穴半导体或P型半导体。

（三）两种半导体的转化

实际上，一块半导体中经常是既有受主杂质，又有施主杂质。哪种杂质的浓度大，就由哪种杂质决定其导电类型。比如，在硅中先掺入磷，使之成为N型硅。然后再掺入硼，那么当硼的浓度超过磷时，会使原来自由电子的绝大部分与空穴复合，剩下的自由电子数目较之空穴的数目就变得很少了，N型硅就转化成了P型硅。

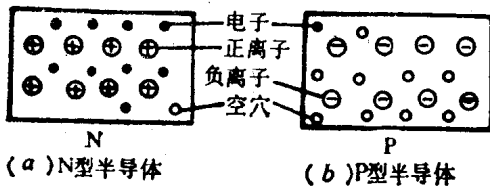
前面我们对各种半导体中载流子的数量及导电性能有了一定的了解。为使读者更好地理解上述内容，我们给出一组载流子浓度和电阻率关系的数据，见表1-1。其目的在于具体地说明，在一定温度，一定掺杂的情况下，各种半导体中载流子的数量及导电性能的差异。表中同时列出了金属铜的有关数据，以资比较。

表1-1 载流子浓度和电阻率

材 料		原子浓度 (个原子/米 ³)	载流子浓度		电 阻 率 (欧姆·米)
			电 子 (个电子/米 ³)	空 穴 (个空穴/米 ³)	
铜		8.4×10^{28}	8.4×10^{28}		2.13×10^{-8}
300K 本征 半 导 体	硅	5.0×10^{28}	1.5×10^{16}	1.5×10^{16}	2300
	锗	4.4×10^{28}	2.5×10^{19}	2.5×10^{19}	0.450
450K 本征 半 导 体	硅	5.0×10^{28}	6.5×10^{14}	6.5×10^{14}	1.251
	锗	4.4×10^{28}	6.8×10^{23}	6.8×10^{23}	0.024
300K 杂质 半 导 体	N 型 硅	5.0×10^{28}	5.0×10^{20}	4.5×10^{11}	0.096
	N 型 锗	4.4×10^{28}	4.4×10^{20}	1.4×10^{13}	0.073

第二节 PN结

上节中我们讨论了 N型半导体和 P型半导体的导电规律和其中载流子的情况。在 N型半导体中,自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子,同时还有不能移动的正离子。



在 P型半导体中,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子,同时还有不能移动的负离子。如图 1-9(a)、(b) 所示。不难看出,两种半导体都是电中性(即不显电性)的。如果我们把一块 N型半导体和一块 P型半导体结合在一起,情况会怎样呢?这就是本节所要讨论的问题。在讨论这个问题之前,我们首先介绍自由粒子的一种运动——扩散运动。

微粒在自由空间里,自发地从浓度较高的地方向浓度较低的地方运动。这种现象叫做扩散运动。如我们能闻到各种气味,就是微粒扩散的结果。在半导体中,空穴和自由电子,也是能运动的粒子,当它们在空间里有浓度差时,也会产生扩散运动。

一、PN结的形成

(一) 扩散过程和结果

当把一块 P型半导体和一块 N型半导体有机地结合在一起时,在 N型区和 P型区的界面两边,多数载流子的浓度相差很大,载流子将自发的产生扩散运动。如图 1-10(a) 所示。P 区几乎没有自由电子, N 区的自由电子就越过界面到达 P 区,并且很快和空穴相遇复合,使电子-空穴对消失。同样 N 区几乎没有空穴, P 区的空穴也将越过界面到达 N 区,并很快和 N 区的自由电子复合,也会使电子-空穴对消失。这样就使界面两边一个很窄的区域里,电子-空穴对的数目大量减少。通常把这个区域称为空间电荷区。不难看出空间电荷区内载流子很少,只留下了不能移动的正、负离子,所以又称它为耗尽层,如图 1-10(b) 所示。

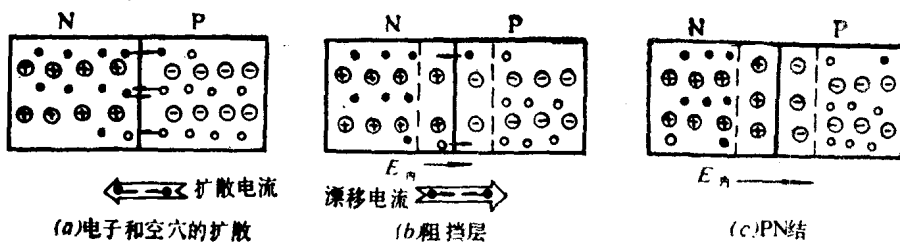


图1-10 PN结的形成

(二) 内电场的产生使载流子运动发生变化

1. 内电场的产生 从图 1-10(b) 可以看出,在空间电荷区内,由于载流子的复合,使这个区域的电中性被破坏了。N区一侧由于失去自由电子,而带上了正电。P区一侧由于失去了空穴而带上负电。在界面两边就有了电位差,即产生了一个由N区指向P区的电场。如图 1-10(b) 所示。因为这个电场是由物质内部扩散所产生的,所以把它叫做内电场。

2. 内电场阻碍多子的扩散 我们知道,电荷在电场中要受电场力的作用,正电荷受力方向与电场方向相同,负电荷受力方向与电场方向相反。因此,内电场建立以后,N区的多子自由电子向P区扩散,进入空间电荷区时,将受到一个指向N区的电场力作用,一部分自由电子将被拉回N区。同样,P区的空穴向N区扩散进入空间电荷区时,受到一个指向P区的电场力作用,一部分空穴也被推回到P区。这样,由于内电场的作用,使两边的多数载流子的扩散受到阻碍,扩散运动慢慢地减弱。由于空间电荷区的内电场阻碍多子扩散,故又把空间电荷区称之为阻挡层。

3. 内电场使少数载流子产生漂移 由于内电场的作用,使界面两边的少数载流子容易越过阻挡层,向各自的对方运动如图1-10(b)。N区的空穴进入阻挡层,受到指向P区的电场力作用,在这个电场力的作用下,空穴被推到P区。同样,P区的自由电子进入阻挡层后,受到指向N区的电场力作用,自由电子被拉到N区。通常把少数载流子在内电场作用下产生的这种运动叫做漂移运动。内电场越强,被推过阻挡层的少数载流子越多。漂移运动就越强。不难看出,对同一种载流子(如空穴)来说,其扩散的方向恰好与漂移的方向相反。扩散运动和漂移运动形成了一对矛盾。

(三) 动态平衡形成PN结

事实上,多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动在一开始就同时产生了。不过,开始时扩散占优势,随着扩散的进行,N区和P区的交界面上产生了内电场,少数载流子产生漂移,而多数载流子的扩散运动减弱。就这样,总有一个时刻,扩散越过阻挡层的载流子数量和漂移越过阻挡层的载流子的数量相等。由于载流子扩散和漂移的方向相反,所以越过阻挡层的净电荷为零。即达到了动态平衡。这时扩散不再减弱,漂移也不再增强。空间电荷区的宽度及内电场的强度都不再改变。这时的空间电荷区(阻挡层)就是PN结。如图1-10(c)所示。

需要指出,扩散和漂移都是带电粒子的定向运动,都形成电流。扩散电流和漂移电