

全国电子类中专学校教材协会推荐辅导教材

模拟电子技术 学习指导

(低、高频)

主 编 潘平仲

副主编 王文才 崔金辉



电子科技大学出版社

主要内容

全国电子类中专学校教材协会推荐辅导教材

模拟电子技术学习指导

(低、高频)

主 编 潘平仲

副主编 王文才 崔金辉

学·美·育·社·学

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书是全国电子类中等专业学校教材协会推荐的辅导教材。全书共分上、下篇,上篇为低频部分共八章,分别为:半导体二极管和三极管;小信号电压放大器;场效应管放大器;直流放大器;负反馈放大器;集成运算放大器;低频功率放大器;直流稳压电源。下篇为高频部分共八章,分别为:高频放大器的特殊问题;宽频带放大器;小信号调谐放大器;自激正弦振荡器;调幅与检波;调频与鉴频;混频与倍频;反馈控制电路。

本辅导教材的编写很有特色,既不同于以往的习题集,更不是教材的缩本,在章节内容上它是将每个章节的重点、难点突出后进行条理化,从而使读者对每个章节内容有个整体而清晰的理解。在解题方面,它侧重于每个典型例题的解题分析和解题思路,并对解题过程中学生易出现的错误作较详细的分析。因此可以说,本书是将模拟电子技术重点内容与解题分析融为一体。

本书适用于中等专业学校(含高职)电子类专业的学生与教师阅读使用,同时可作为电子类的各种培训的教学参考书,也特别适用于无线电技术爱好者自学参考。

声 明

本书无四川省版权防盗标识,不得销售;版权所有,违者必究。举报有奖,举报电话:(028) 6636481 6241146 3201496

全国电子类中专学校教材协会推荐辅导教材

模拟电子技术学习指导 (低、高频)

主 编 潘平仲

副主编 王文才 崔金辉

出 版: 电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号) 邮编 (610054)

责任编辑: 吴艳玲

发 行: 新华书店发行

印 刷: 西南冶金地质印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张 25.25 字数 614 千字

版 次: 1999 年 12 月第一版

印 次: 1999 年 12 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-81065-282-6/TP·164

印 数: 1-4000 册

定 价: 28.00 元

编者的话

受全国电子类中专学校教材协会的委托,我们编写了这本《模拟电子技术学习指导》。编写的目的非常明确,就是指导电子类中等专业学校的学生学好“模拟电子技术”这门课程,同时也为广大电子技术爱好者提供一本实用的自学参考书。

“模拟电子技术”是电子类专业的一门重要的技术基础课程,也是所有电子类专业的入门课程。因此,学生都十分重视这门课程的学习,同时也感到学好这门课有一定难度,希望有更多一些教学辅导资料问世。基于这种情况,我们在编写这本“学习指导”时,力求不仅仅是从教学内容上予以归纳总结,而且在解题思路上也予以分析评讲,还从学习方法上对读者加以指导。这就是我们编写的指导思想。本书的低频电路部分由福建电子工业学校潘平仲老师和淮阴电子工业学校王文才老师编写,高频电路部分由本溪电子工业学校崔金辉老师和辽宁电子工业学校钟绍实、王永东老师编写,全书由潘平仲老师统稿。由于编者水平有限,书中难免有错误或阐述不当之处,敬请各位读者指评指正。

由于编写时间仓促,书中直接引用了部分教材和参考资料上的图表,在此向这些教材和资料的原作者表示感谢。

在本书编写过程中,得到山东信息工程学校孟宪洲校长和电子科技大学出版社的大力支持和指导,在此也一并表示感谢。

编 者

1999年6月

目 录

上篇 低频部分

第一章 半导体二极管和三极管	3
§ 1.1 内容特点与学习指导	3
§ 1.2 内容提要	3
1.2.1 半导体的基本知识	3
1.2.2 PN 结	9
1.2.3 晶体二极管	11
1.2.4 晶体三极管(以NPN 型为例)	15
1.2.5 晶体管共发射极的特性曲线及主要参数	17
§ 1.3 解题示范	21
§ 1.4 复习思考题	31
§ 1.5 自测试题	34
第二章 小信号电压放大器	38
§ 2.1 内容特点与学习指导	38
§ 2.2 内容提要	39
2.2.1 放大器的基本概念	39
2.2.2 基本放大器	42
2.2.3 用图解法分析放大器	43
2.2.4 用等效电路法分析放大器	48
2.2.5 晶体管放大器偏置电路	50
2.2.6 RC 耦合多级低频电压放大器	52
2.2.7 RC 耦合放大器的频率特性	54
2.2.8 放大器的三种组态	60
§ 2.3 解题示范	63
§ 2.4 复习思考题	78
§ 2.5 自测试题	84
第三章 场效应管放大器	90
§ 3.1 学习要求	90

§ 3.2 内容提要	91
3.2.1 场效应管特点	91
3.2.2 结型场效应管	91
3.2.3 绝缘栅场效应管	96
3.2.4 场效应管放大电路	100
§ 3.3 解题示范	104
§ 3.4 复习思考题	115
§ 3.5 自测试题	119
第四章 直流放大器	123
§ 4.1 内容特点及学习指导	123
§ 4.2 内容提要	123
4.2.1 直流放大器的特殊问题	123
4.2.2 差分放大电路的工作原理和电路分析	125
4.2.3 带有恒流源的差分放大器	130
4.2.4 单端输入的差分放大器	131
4.2.5 差分放大器应用举例	132
§ 4.3 解题示范	134
§ 4.4 复习思考题	147
§ 4.5 自测试题	151
第五章 负反馈放大器	156
§ 5.1 内容特点及学习指导	156
§ 5.2 内容提要	157
5.2.1 负反馈放大器的基本概念	157
5.2.2 负反馈对放大器性能的影响	161
5.2.3 负反馈放大器的计算	166
§ 5.3 解题示范	171
§ 5.4 复习思考题	184
§ 5.5 自测试题	190
第六章 集成运算放大器	195
§ 6.1 学习要求	195
§ 6.2 内容提要	195
6.2.1 集成运算放大器的构成与特点	195
6.2.2 集成运算放大器的放大特性	197
6.2.3 利用集成运算放大器实现信号运算	199
6.2.4 集成运算放大器的非线性应用	204

§ 6.3	解题示范	209
§ 6.4	复习思考题	215
§ 6.5	自测试题	218
第七章	低频功率放大器	221
§ 7.1	学习要求	221
§ 7.2	内容提要	222
7.2.1	低频功率放大器的特殊问题	222
7.2.2	甲类功率放大器和乙类功率放大器	222
7.2.3	单管甲类功率放大器工作原理分析	223
7.2.4	典型乙类 OTL 功率放大器工作分析	226
7.2.5	OCL 功率放大器	230
7.2.6	功放管使用中必须注意的几个问题	230
§ 7.3	解题示范	231
§ 7.4	思考练习题	236
§ 7.5	自测试题	237
第八章	直流稳压电源	240
§ 8.1	学习要求	240
§ 8.2	内容提要	240
8.2.1	三种整流电路	240
8.2.2	滤波电路	244
8.2.3	整流滤波电路设计思路	248
8.2.4	稳压二极管与并联稳压电路	249
8.2.5	典型串联稳压电路	251
8.2.6	提高稳压电源性能的几种办法	254
8.2.7	简单直流稳压电源设计思路	258
§ 8.3	解题示例	262
§ 8.4	复习思考题	267
§ 8.5	自测试题	269

下篇 高频部分

第一章	高频放大器的特殊问题	273
§ 1.1	学习要求	273
1.2.1	三极管混合 π 型等效电路	273
1.2.2	简化混合 π 型等效电路参数确定	274

1.2.3	三极管的频率参数	275
1.2.4	晶体管的网络参数	276
§ 1.3	解题示范	276
§ 1.4	复习思考题	278
§ 1.5	自测试题	279
第二章	宽频带放大器	281
§ 2.1	学习要求	281
§ 2.2	内容提要	281
2.2.1	高频阻容耦合放大器与声频阻容耦合放大器的比较	281
2.2.2	展宽频带的措施	283
§ 2.3	解题示范	285
§ 2.4	复习思考题	286
第三章	小信号调谐放大器	289
§ 3.1	学习要求	289
§ 3.2	内容提要	290
3.2.1	单调谐回路放大器	290
3.2.2	多级单调谐放大器	293
3.2.3	双调谐回路放大器	293
3.2.4	调谐放大器的稳定性	295
3.2.5	单向化	297
3.2.6	调谐放大器的调整和测试	297
§ 3.3	解题示范	297
§ 3.4	复习思考题	301
§ 3.5	自测试题	303
第四章	自激正弦振荡器	305
§ 4.1	学习要求	305
§ 4.2	内容提要	305
4.2.1	反馈式振荡器的工作原理	306
4.2.2	互感反馈振荡电路	307
4.2.3	LC 三点式振荡电路	308
4.2.4	改进型电容反馈三点电路	310
4.2.5	振荡器的频率稳定性	312
4.2.6	石英晶体振荡器	313
4.2.7	RC 振荡器	314
4.2.8	自激振荡器的调整与测试	315

§ 4.3	解题示范	316
§ 4.4	复习思考题	321
§ 4.5	自测试题	324
第五章	调幅与检波	328
§ 5.1	学习要求	328
§ 5.2	内容提要	328
5.2.1	几个基本概念	328
5.2.2	调幅信号的性质	329
5.2.3	调幅的几种方式	332
5.2.4	调幅电路	332
5.2.5	检波器概述	336
5.2.7	大信号包络检波器	339
5.2.8	同步检波	341
§ 5.3	解题示范	343
§ 5.4	复习思考题	348
§ 5.5	自测试题	350
第六章	调频与鉴频	352
§ 6.1	学习要求	352
§ 6.2	内容提要	352
6.2.1	调频信号的性质	352
6.2.2	调频电路	355
6.2.3	调频信号的解调	359
6.2.4	鉴频电路	360
§ 6.3	解题示范	364
§ 6.4	复习思考题	366
§ 6.5	自测试题	369
第七章	混频与倍频	371
§ 7.1	学习要求	371
§ 7.2	内容提要	371
7.2.1	概述	371
7.2.2	混频器的组成	372
7.2.3	晶体三极管混频器	373
7.2.4	混频干扰	376
7.2.5	二极管混频器	378
7.2.6	倍频器	378

§ 7.3 解题示范	380
§ 7.4 复习思考题	382
§ 7.5 自测试题	383
第八章 反馈控制电路	384
§ 8.1 学习要求	384
§ 8.2 内容提要	384
8.2.1 锁相环路	384
8.2.2 自动增益控制电路(AGC 电路)	391
8.2.3 自动频率控制	392
§ 8.3 复习思考题	393

上篇 低频部分

- 半导体二极管和三极管
- 小信号电压放大器
- 场效应管放大器
- 直流放大器
- 负反馈放大器
- 集成运算放大器
- 低频功率放大器
- 直流稳压电源

第一章 半导体二极管和三极管

§ 1.1 内容特点与学习指导

本章内容是研究半导体结构、晶体二极管、三极管结构及其工作原理。这些内容是分析晶体管电路必备的基础知识,在今后各章节的学习过程中,将经常与这些内容发生联系,因此,学好本章内容,将为今后本课程的学习打下良好的基础。

本章内容的框架结构是:首先从半导体的物质结构谈起。从本征半导体谈到杂质半导体,分析它们的导电特性。半导体中载流子的两种运动(漂移运动、扩散运动)及其所形成的两种电流(漂移电流和扩散电流)。并指出在半导体中有两种载流子——电子与空穴,由于这两种载流子在半导体中所占的比例明显不同,因而又可分为N型半导体与P型半导体,当这两种半导体结合在一起时,就形成了半导体器件的核心——PN结。本章重点分析了PN结的形成过程及其单向导电性,二极管的伏安特性和主要参数,三极管的结构、各电极电流分配关系、工作原理以及输入、输出特性曲线(重点是共发射极输入、输出特性曲线),以及晶体三极管的主要参数及其在使用过程中的注意事项。

本章内容从整体看比较抽象,无论在分析本征半导体中的激发与复合的动态平衡,还是在分析PN结形成的物理过程;无论在分析空穴载流子的概念还是分析三极管内部电流流通过程,都要求我们在学习过程中多动脑、勤思维,充分发挥我们的想象力。由于这些抽象概念对于初学者来说属于新知识,这就给我们的学习增加了一定难度。新概念多、内容抽象是本章的主要特点。

本章的重点有两个:其一是PN结的单向导电性以及二极管的伏安特性曲线分析,其二是晶体三极管的结构、电流分配关系、输入与输出特性及其工作原理。本章内容的难点主要有三点:一是空穴载流子概念建立,二是PN结形成物理过程,三是PN结结电容,尤其是扩散电容概念分析。

根据以上对本章内容特点、重点、难点分析,我们在学习时应注意两个方面:一方面在学习过程中加强对概念的理解,在理解的基础上加强记忆,要记住一些必要数据;另一方面,在学习过程中,不能将每个概念、每部分内容孤立起来,而应该将它们有机地结合起来,进行综合分析,从中找出它们之间的内在联系。这样做有两个好处:一方面使我们容易加深对问题的理解;另一方面也利于我们的记忆。

§ 1.2 内容提要

1.2.1 半导体的基本知识

一、半导体定义

导电性能介于导体与绝缘体之间的一类材料,称为半导体。

二、半导体的导电特性

半导体的导电性能在许多方面与导体和绝缘体都不同,归纳起来有三点:

①热敏特性:半导体受热温度升高后,其导电性能急剧增强。例如硅半导体,温度每升高 8°C 时,锗半导体温度每升高 12°C 时, ρ (ρ 为电阻率)下降一倍。即温度与 ρ 大体呈指数关系。

对于金属导体来说,温度 T 对其电阻率 ρ 的影响与半导体正好相反: $T \uparrow \rightarrow \rho \uparrow$ 。原因是: $T \uparrow \rightarrow$ 金属导体中分子热运动加强 $\rightarrow$ 自由电子在运动过程中所遇到的阻力加大 $\rightarrow \rho \uparrow$ 。

②光敏特性:光敏特性包括两层含意:其一是半导体受光照后,其导电性能急剧增强;其二是半导体受光照以后,产生电动势。

对于金属导体,光照与否,对其电阻率的影响几乎为零,也不会产生电动势。

③掺杂特性:在纯净的半导体中,掺入微量的有用杂质元素,其导电性能急剧增强。

例如在纯净的硅或锗半导体中,掺入百万分之一的磷或硼,其电阻率将下降几十至几百万倍;而金属导体或绝缘体,掺杂与否对其导电性能几乎无影响。

三、半导体具有以上三点导电特性的原因

半导体为什么会具有以上三种导电特性呢?这要从半导体的内部物质结构谈起。半导体尽管种类很多,但所有半导体在物质结构方面都有一个共同的特点:半导体原子结构中外层价电子均为4个。从原子结构理论分析来看,所有物质只有当外层电子达到8个以后才能稳定,而半导体只有4个,这4个价电子受本身原子核的束缚力比导体要大,比绝缘体要小,因此,其导电能力介于导体与绝缘体之间。对于半导体的分子结构来说,所有半导体的分子结构均为共价键结构。由于半导体的物质结构具有以上两个共同点,所以它们才具有特殊的导电特性。

四、本征半导体的结构和本征激发

本征半导体定义:纯净的且晶格结构单纯、完整的半导体称为本征半导体。

(1)本征半导体的原子结构和分子结构(以硅单质半导体为例)

①原子结构如图1-1所示。

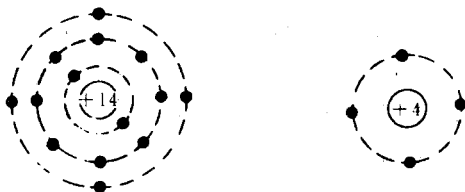


图 1-1

简要说明:由于内层电子受原子核的束缚力很强,同时又由于内层电子受外层电子的屏蔽作用,所以内层电子相对来说很稳定,这样我们就可以将内层电子与原子核看作为较为稳定的整体。

②分子结构如图1-2所示。

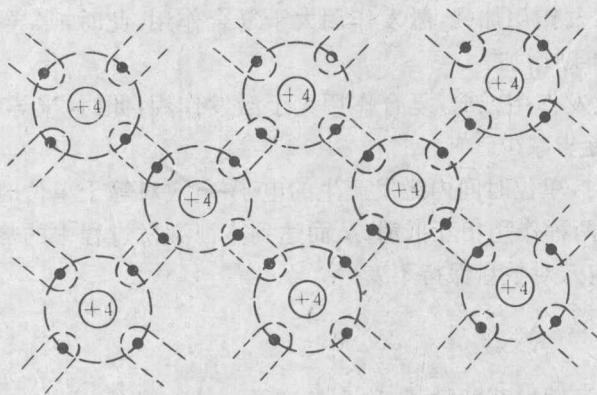


图 1-2

硅原子为什么能够结合成硅分子? 由原子结构理论可知, 外层电子达到8个以后才能稳定, 而硅原子外层电子只有4个, 因此, 在组成单晶硅时, 每个原子都要从四周相邻的原子中取得4个价电子才能形成稳定状态。这样, 每相邻的两个原子都共用一对价电子, 从而形成共价电子对——共价键, 硅原子就是靠这种共价键结合成硅分子的。

(2) 本征半导体是如何导电的

从单晶硅的分子结构看, 分子结构中没有自由电子, 因而是不能导电的。但实际上本征半导体能够导电, 为什么呢? 它是靠本征激发产生电子-空穴对而导电的。

本征激发定义: 由于价电子受热作用(或受光照、电场作用)使价电子得到一定能量, 摆脱共价键的束缚, 形成自由电子, 这个过程称为本征激发。

本征激发的过程: 当环境温度为绝对零度时, 本征半导体中所有价电子都处于共价键中, 整个半导体内无自由电子, 此时半导体处于绝缘状态。随着温度升高, 价电子的热运动加强, 使部分价电子获得足够大的动能, 这部分价电子就可以脱离本身原子核的束缚形成自由电子, 所以此时半导体开始具备导电能力。且温度越高, 价电子获取的能量越大, 脱离原子核束缚形成自由电子的数目就越多, 因此, 半导体的导电性能越强。这也是半导体具有热敏特性的原因。

本征激发过程中的两大特点:

① 本征激发产生电子-空穴对

不难理解, 在本征半导体中, 每激发出一个自由电子, 就在原共价键中留下一个空位, 这个空位我们称之为空穴。显然, 激发出的自由电子数目与空穴数目总是相等, 即“电子”与“空穴”总是成对出现的, 因此, 我们说本征激发产生电子-空穴对。

② 本征激发过程中, 激发与复合两种作用是并存的。

本征激发过程中复合的定义: 本征激发过程中, 产生电子-空穴对, 这两种导电类型相异的载流子(关于载流子问题下面即将阐述)在运动过程中会重新相遇而结合(一旦结合, 电子-空穴对即消失)。这种结合过程称为复合。

激发使半导体内产生电子-空穴对, 在同一半导体内只要电子、空穴同时存在, 它们就有

相遇而结合的机会,所以激发与复合是并存的,它将存在于本征激发的全过程,形成本征激发过程中的一对矛盾。

温度升高,本征激发作用加强,激发作用大于复合作用,此时,半导体中电子-空穴对的数目随着温度升高而不断增加。

温度降低,本征激发作用减弱,复合作用大于激发作用,此时,半导体中电子-空穴对数量随着温度的下降而逐步减少。

当环境温度一定时,单位时间内激发产生的电子-空穴对等于单位时间内复合所消失的电子-空穴对。即此时两种作用相互抵消,从而达到本征激发过程中的热平衡状态。热平衡后,半导体中的电子-空穴对数量保持不变。

五、关于载流子问题

1. 载流子

载流子定义:能够运载电荷的粒子,称为载流子。

根据载流子的定义,要求载流子必须具备两个条件:

①粒子本身带电荷(正电荷或负电荷)。

②粒子能够在半导体内自由运动。

半导体内有两种载流子——电子载流子和空穴载流子。自由电子作为载流子是显而易见的,空穴为什么也是载流子呢?

空穴载流子的本质是:价电子摆脱共价键束缚后在原共价键中所留下的空位。

空穴具备载流子的两个条件:

带电:本征激发之前,所有共价键均十分完好,这时原子呈电中性。本征激发后,共价键中失去一个电子,即减去一个单位负电荷,这时,空穴所在的原子就由原来的中性原子转变为带一个单位正电荷的正离子,这正离子所带的正电荷,我们可以把它看作为空穴所带的正电荷。一个空穴带一个单位的正电荷。

能够在半导体内自由运动:当某个共价键上出现一个空穴后,附近的价电子就会在空穴的吸引下对空穴进行填补(因为空穴与电子分别带正负电荷,之间存在引力)。空穴经过价电子填补后,便恢复了原来的电中性,但在来填补的价电子位置上又出现了新的空穴。例如: x_0 处出现空穴, x_1 处来一个价电子对 x_0 处空穴进行填补,则 x_0 处空穴消失, x_1 处出现了空穴,这样,就相当于空穴由 x_0 处移到了 x_1 处。同样,如果从 x_2 处又来一个价电子对 x_1 处空穴进行填补,再从 x_3 处来一个价电子对 x_2 处空穴进行填补……,那么空穴就从 x_1 到 x_2 ,再到 x_3 ……。这说明空穴可以在半导体内自由运动,如图1-3所示。

在这里还必须强调一点:以上所谈的空穴在半导体内运动,从本质上来说,是价电子的填补运动。同时,价电子的这种填补运动与自由电子的无规则运动有着本质的不同。价电子的填补运动是价电子由一个键转移到另一个键(始终摆脱不了共价键的束缚)。它是从一个束缚状态转移到另一个束缚状态。

为了便于理解,这里打个比方:我们在剧场看节目,当第一排位置的一位同学中途离开时,第二排的一位同学就到第一排空位坐下,第三排的一位同学就到第二排空位坐下,如此等等。从形式上看,剧场中的空位置由第一排到第二排,再到第三排……,而实际上,是观众从后排向前排移动。观众由后排向前排移动就类似于前面所讲的价电子的填补运动。观众

的这种移动,只是从后排移动到前排,移动过程中,他们始终有位置坐;而自由电子运动是无规则运动(无电场作用下),它类似于一位同学无票入场,入场后无座位,他只能在剧场里随意走动。

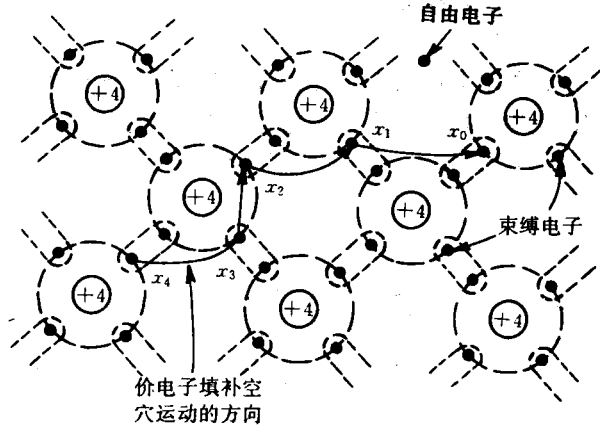


图 1-3

2. 载流子浓度

我们前面在介绍本征激发时谈到:当温度一定时,激发与复合处于热平衡状态。此时,半导体中的载流子数量是稳定的,我们将这种情况下每立方厘米所荷载流子数目称为载流子浓度。

空穴浓度与电子浓度分别用 p_i 和 n_i 表示。

室温下: Si: $p_i = n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$

Ge: $p_i = n_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$

这里要强调一点:载流子浓度 p_i (或 n_i)与温度 T 有着密切关系,即 $T \uparrow \rightarrow p_i \uparrow$ ($n_i \uparrow$)。

对于硅半导体, T 每升高 8°C , p_i (或 n_i)增加一倍。

对于锗半导体, T 每升高 12°C , p_i (或 n_i)增加一倍。

从上述的载流子浓度表达式中,我们还应搞清如下两个问题。

①为什么本征半导体中空穴浓度与电子浓度相等?

原因:本征半导体中载流子是通过本征激发产生的,而本征激发所产生的电子与空穴是成对出现的,所以半导体中的电子载流子数量与空穴载流子数量始终相等。即 $p_i = n_i$ 。

②室温下,锗半导体的载流子浓度为什么远大于硅半导体的载流子浓度?

原因:锗的原子量为32,电子分四层绕原子核旋转。而硅的原子量为14,电子分三层绕原子核旋转。这样,锗的价电子到原子核的距离远大于硅的价电子到原子核的距离。因此,锗的价电子受本身原子核的束缚小于硅。所以,在同样温度下,锗价电子易脱离共价键束缚形成电子载流子,因而在相同温度下,锗半导体内的载流子浓度大。

六、杂质半导体

定义:本征半导体经过掺杂后所形成的半导体,称为杂质半导体。杂质半导体分为两大