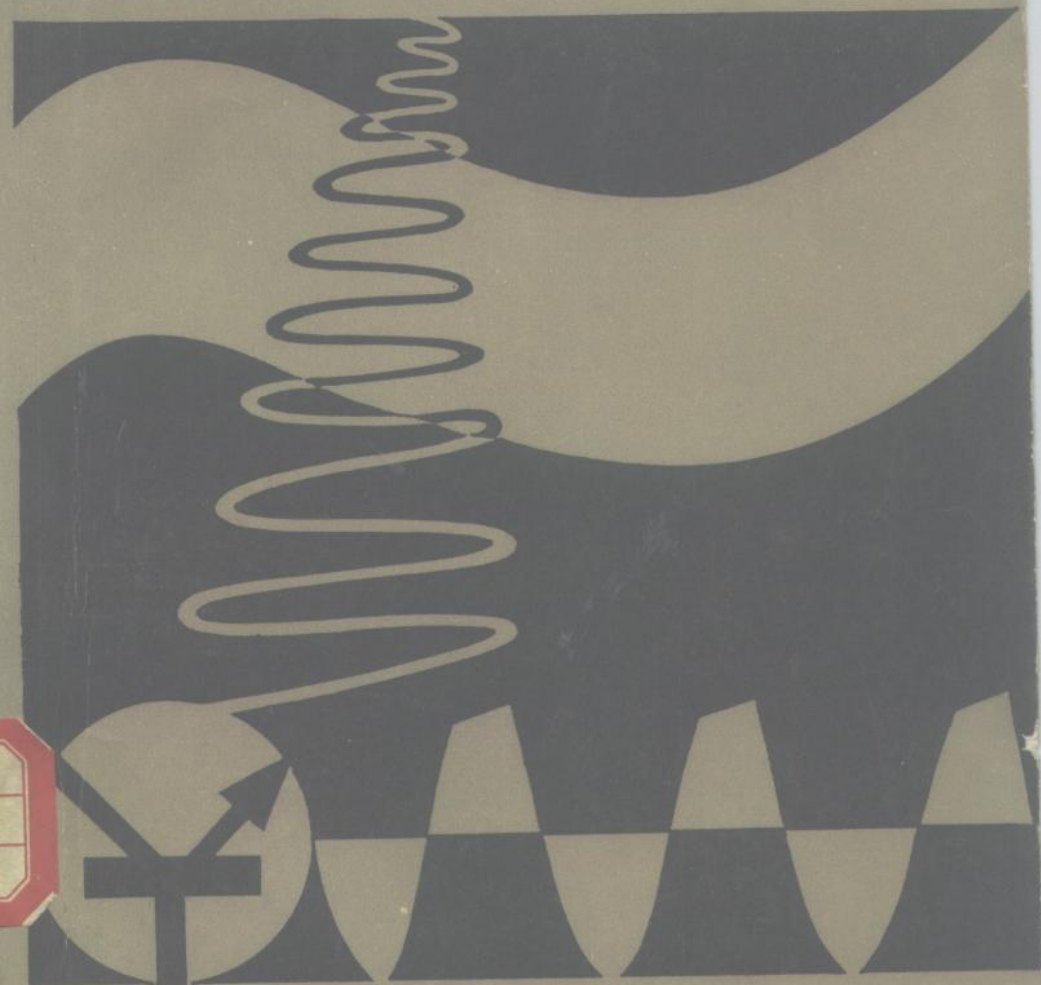


模拟电子学

沈尚贤 主编



人民邮电出版社

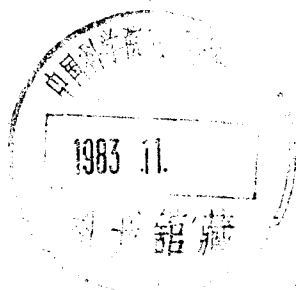
73.769

115

112

模 拟 电 子 学

沈 尚 贤 主 编



人 民 邮 电 出 版 社

1110329

内 容 简 介

本书是根据1980年6月召开的高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议审定、经教育部批准的《高等工业学校电子技术基础教学大纲》(草案)修订的。本书内容有:半导体二极管和三极管、基本放大电路、阻容耦合放大电路、振荡电路、场效应管及其电路、直耦放大电路、集成运算放大器及其应用和稳压电源等。每章均附有一定数量的复习思考题和习题。

本书在处理电子器件与电路的关系时,把重点放在基本电路的分析和应用上;在处理分立与集成电路的关系时,则以“分立为集成服务”的思想,选择分立电路的内容。同时考虑到便于学生自学,在文字叙述上力求通俗易懂、讲清物理概念,避免繁琐的数学推导。

本书可做工科院校电机、电力、电子和自动化工程等专业的教材,也可供其他院校的学生、工程技术人员及业余自学者作为学习电子技术的参考书。

模 拟 电 子 学

沈 尚 贤 主 编

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北 京 东 长 安 街 27 号

天 津 新 华 印 刷 一 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开 本: 850×1168 1/32 1983 年 7 月 第 一 版

印 张: 14 24/32 页 数: 236 1983 年 7 月 天 津 第 一 次 印 刷

字 数: 389 千 字 印 数: 1—19,000 册

统 一 书 号: 15045·总 2739—有 5305

定 价: 2.15 元

序 言

本书是我们教研室编写的《电子技术基础》（模拟电路部分）的第四次修订本。这次修订、正式出版，定名为《模拟电子学》。

在编写此书的过程中，始终遵循加强基础和少而精的原则，并按教材的要求，注意了内容的选择和教学法上的改进。

本书初稿写成后，曾在本校电子工程、自动化工程、电气工程等方面的专业以及一些兄弟院校试用了将近九年。1981年，我们根据高等学校工科电工教材编审委员会1980年6月成都会议审定、教育部1980年8月批准与印发的《高等工业学校电子技术基础教学大纲（草案）》，在广泛听取本校师生和兄弟院校教师意见的基础上，进行了第三次修订，并改称为《工业电子学》，在校内印刷继续试用。

多年来的实践，大家都感到在本课程的教学过程中，一个突出的矛盾是学时有限，而内容很多，学生学习负担往往过重。上述教学大纲中规定了本门课是“电子技术方面入门性质的技术基础课”，因此“重点在于基本电路的分析和应用”。讲电子器件时，则要“管为路用”，适可而止，主要了解它们的外部性能，使“能合理选择和正确使用”。由于集成电路的发展，教学大纲中规定，“教材内容应以集成电路为主，但分立元件电路仍须占一定的比重”。集成电路的应用，日益广泛，因此，我们在讲分立电路时，往往以“分立为集成服务”的思想，来选择分立电路的内容。

本书第一章半导体二极管和三极管，第二章基本放大电路、第三章阻容耦合放大电路的频率特性、第四章反馈放大电路、第五章正弦波振荡电路、第六章场效应管及其电路和第十章直流稳压电源，

大体上与教学大纲(草案)中的(一)、(二)、(三)、(五)、(六)、(四)、(九)相一致。第七章直接耦合放大电路,是为讲集成运算放大器组件做准备。在第八章线性集成运算放大器和第九章集成运算放大器的应用两章中,则加强了集成运放组件的内容。第十章是把分立和集成的稳压电路结合起来讲述。关于功率放大器部分,由于在小功率低频电路中,无变压器电路的应用日增,因此书中列于第七章中讨论。晶闸管电路在书中未列入,这是由于学时有限,且有些专业,另有这方面的课程的缘故。我们认为,学过本课后,如果遇到有关晶闸管问题,有了现在的基础,是可以自学一些有关书籍来掌握的。

本书除适合工科院校电气、电力、自动化和电子工程类各专业做教材外,也可供其他院校的学生、以及工程技术人员和业余自学者作为学习电子技术的参考书。

本书的第一、十章,是叶治政同志写的,第二、三章是王志宏同志写的,第四、五章是翟钰同志写的,第六章是沈尚贤同志写的,第七、八、九章是唐泽荷同志写的。编写过程中经常参加讨论的还有叶德璇、樊志容、张志清、陆荣、蔡祖端、申忠如等同志。

电子技术日新月异,本课程的教学,尚须不断改革。由于我们学识有限,书中错误和不妥之处,在所难免,请读者多加指正。

西安交通大学工业电子学教研室 沈尚贤

1983年1月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管

1.1 半导体二极管	1
1.1.1 本征半导体	2
1.1.2 掺杂半导体	5
1.1.3 PN结	8
1.1.4 PN结的单向导电性	10
1.1.5 半导体二极管的构造	12
1.1.6 半导体二极管的伏安特性	13
1.1.7 二极管的主要电参数	20
1.1.8 硅稳压管	23
1.2 半导体三极管	27
1.2.1 三极管的直流偏置和直流电流分配	29
1.2.2 三极管的特性曲线	31
1.2.3 三极管的电参数	35
1.2.4 温度对三极管参数的影响	40
附录 1.1 半导体管型号命名方法	43
附录 1.2 晶体二极管、三极管简易测试方法	44

第二章 放大电路基础

2.1 放大电路的工作原理及组成	51
2.1.1 直流偏置	51
2.1.2 信号的输入和输出	53
2.2 放大电路的基本分析方法（一）——图解法	56
2.2.1 静态值的计算	56
2.2.2 动态情况及其计算	60
2.2.3 静态工作点的选择	74

2.2.4 电路参数对静态工作点的影响	75
2.3 放大电路的基本分析方法 (二)	
——微变等效电路法	77
2.3.1 晶体管的微变等效电路	78
2.3.2 r_{be} 的估算	83
2.3.3 微变等效电路法	86
2.3.4 电路参数对放大倍数的影响	88
2.3.5 输入电阻和输出电阻	91
2.4 静态工作点的稳定	100
2.4.1 环境温度 T_a 对静态工作点的影响	101
2.4.2 稳定静态工作点的典型电路	102
2.5 基本放大电路的三种接法及其性能比较	110
2.5.1 共集电极基本放大电路	110
2.5.2 共基极基本放大电路	116
2.5.3 三种接法的比较	120

第三章 阻容耦合放大电路

3.1 耦合方式——阻容耦合	122
3.2 多级放大电路的组成	125
3.3 多级放大电路的计算	126
3.3.1 多级放大电路的电压放大倍数	126
3.3.2 多级放大电路的输入电阻、输出电阻 和输出动态范围	128
3.4 单级共射放大电路的频率特性	131
3.4.1 频率响应、频率失真	131
3.4.2 频率特性的分析方法	134
3.4.3 中频区的频率特性	137
3.4.4 低频区的频率特性和下限频率	137
3.4.5 高频区的频率特性和上限频率	142
3.4.6 对数频率特性——波特图	154
3.5 单级共基放大电路的频率特性	159

3.5.1	晶体管共基接法的频率参数——共基极截止频率 f_a (α 的截止频率)	159
3.5.2	共基放大电路的频率特性	161
3.6	多级放大电路的频率特性	162
3.6.1	多级放大电路的波特图	162
3.6.2	多级放大电路的上限频率 f_H 和下限频率 f_L 的估算	163
3.7	基本放大电路的瞬态响应	165
3.8	放大电路的主要性能指标	169

第四章 反馈放大电路

4.1	概述	172
4.1.1	什么叫负反馈	173
4.1.2	反馈的分类	175
4.1.3	负反馈电路举例	178
4.1.4	负反馈放大电路的一般表达式	184
4.2	负反馈对放大电路性能的影响	187
4.2.1	提高放大倍数的恒定性	187
4.2.2	扩展通频带	188
4.2.3	减小非线性失真	191
4.2.4	抑制放大电路内部的干扰和噪声	192
4.2.5	对输入电阻和输出电阻的影响	193
4.3	负反馈放大电路的计算	198
4.3.1	单级负反馈放大电路的计算	198
4.3.2	多级负反馈放大电路的近似估算	201
4.3.3	利用方框图的算法	205
4.4	放大电路的自激振荡及消除	209
4.4.1	自激振荡的产生	209
4.4.2	附加相移引起的振荡及消除方法	210
4.4.3	电源内阻引起的寄生振荡	211

第五章 正弦波振荡电路

5.1 概述	214
5.1.1 产生振荡的条件	214
5.1.2 振荡电路的组成	216
5.2 RC正弦波振荡电路	217
5.2.1 文氏电桥振荡电路	217
5.2.2 RC移相式振荡电路	222
5.3 LC振荡电路	223
5.3.1 LC并联选频网络	223
5.3.2 变压器反馈式振荡电路	225
5.3.4 电感反馈式振荡电路	226
5.3.5 电容反馈式振荡电路	228

第六章 场效应管及其电路

6.1 结型场效应管	231
6.1.1 结型场效应管的结构和工作原理	231
6.1.2 结型场效应管的特性曲线	236
6.1.3 结型场效应管的主要电参数	240
6.2 绝缘栅场效应管	242
6.2.1 绝缘栅场效应管的结构和工作原理	242
6.2.2 MOS管的特性和主要参数	246
6.3 场效应管的基本放大电路	248
6.3.1 静态的估算	248
6.3.2 动态的估算	250
6.4 场效应管电路应用举例	252
6.4.1 恒流二极管	252
6.4.2 源极输出器	253
6.4.3 压控电阻	255
6.5 场效应管与双极型管的比较	256

第七章 直接耦合放大电路

7.1 直耦放大电路的必要性和特殊性	260
7.2 直耦放大电路的耦合方式	262
7.2.1 提高发射极电位的直耦电路	262
7.2.2 采用NPN——PNP管混合式直耦电路	264
7.2.3 采用复合管的电路	265
7.2.4 静态输出为零电路	267
7.3 零点漂移	267
7.3.1 零点漂移现象	267
7.3.2 产生零漂的主要因素	269
7.3.3 抑制零漂的办法	269
7.4 差动放大电路	271
7.4.1 差动放大电路的基本电路	272
7.4.2 差动放大电路的典型电路	276
7.4.3 单端输入、单端出差动放大电路	281
7.4.4 带恒流源的差动放大电路	283
7.4.5 差动放大电路四种形式的比较	284
7.5 功率输出级电路	287
7.5.1 功率放大电路概述	287
7.5.2 单管甲类功率放大电路	288
7.5.3 互补对称式乙类功率放大电路	290
7.5.4 互补对称式甲乙类功率放大电路	291

第八章 线性集成运算放大器

8.1 概述	294
8.2 线性集成电路分析	296
8.2.1 F007型线性集成电路的组成形式	296
8.2.2 F007型线性集成电路分析	298
8.3 基本运算放大器	309
8.3.1 反相输入比例放大器	309

8.3.2	同相输入比例放大器	312
8.3.3	差动输入运算放大器	315
8.4	集成运算放大器的主要技术指标及测试方法	321
8.4.1	主要技术指标	321
8.4.2	集成运算放大器参数的简易测量方法	324

第九章 运算放大器的应用

9.1	运算电路	335
9.1.1	加法器和减法器	336
9.1.2	积分器和微分器	338
9.1.3	对数和反对数运算放大器	342
9.1.4	模拟乘法器及其应用	344
9.2	信号发生电路	349
9.2.1	正弦波发生器	349
9.2.2	比较器	350
9.2.3	方波发生器	353
9.2.4	三角波发生器	356
9.3	运算放大器在实际应用中的一些问题	358
9.3.1	运算放大器性能的扩展	359
9.3.2	调零和保护措施	361

第十章 直流稳压电源

10.1	直流稳压电源的方框图	365
10.2	单相桥式整流电路	366
10.3	滤波电路	370
10.3.1	电容滤波电路	370
10.3.2	π 型滤波电路	377
10.4	倍压整流电路	380
10.5	直流稳压电路	381
10.5.1	硅稳压管稳压电路	382

10·5·2 串联型稳压电路	387
10·6 集成稳压电路	392
10·6·1 WA7型集成稳压组件电路介绍	392
10·6·2 集成稳压组件的主要电参数	398
10·6·3 扩大集成稳压组件输出电流与输出 电压的电路	399
各章问题 (复习思考题)	402
各章习题	417
本书符号说明	456
参考书目	460

第一章 半导体二极管和三极管

本章任务

学完本章后，将具有下列知识和能力：

一、掌握半导体二极管的单向导电性、主要参数，为今后选择二极管和分析二极管电路打下基础。

二、掌握稳压管的稳压特性、主要参数，为今后选择稳压管和分析稳压管电路打下基础。

三、掌握三极管的电流分配、放大作用、输入和输出特性曲线及主要参数、为分析和应用三极管电路打下基础。

四、了解温度对二极管、三极管的特性以及参数的影响。

五、能够解释下列术语：

本征半导体、掺杂半导体、空间电荷层、基区调宽效应、电流放大系数。

1.1 半导体二极管

常见的小功率半导体二极管的外形和符号如图 1.1.1 (a) 和 (b) 所示。它有两个电极，一个叫正极（也称阳极），常用符号 a 表示；另一个叫负极（也称阴极），常用符号 k 表示。

把二极管接成图 1.1.2 的电路，作一个简单实验。 E 为两节 1.5 伏的干电池，二极管为 2CP33

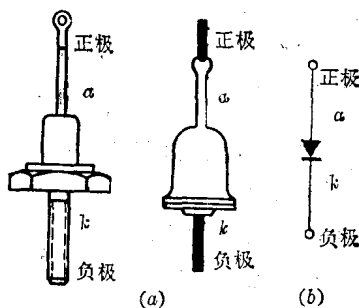


图 1.1.1 小功率半导体二极管的外形及符号

(a) 外形图 (b) 符号

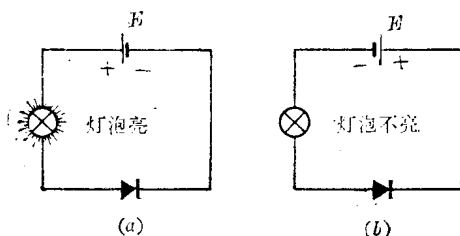


图 1·1·2 半导体二极管电路

图 (a) 中，二极管的正极通过灯泡接到 E 的正端，二极管的负极接到 E 的负端，这种接法称为二极管加了正向电压。这时二极管的正极电位高于负极电位，它的导电性能好，相当于一个阻值较小的电阻，二极管处于导通状态。

图 (b) 中，二极管的正极通过灯泡接到 E 的负端，二极管的负极接到 E 的正端，这种接法称为二极管加了反向电压。这时二极管的负极电位高于正极电位，它的导电性能差，相当于一个阻值很大的电阻，二极管处于截止状态。

这就是二极管的单向导电性。

二极管为什么具有单向导电的特性呢？要回答这一问题，就必需了解二极管导电的内部物理过程。为了讲清这一问题，我们先介绍一下本征半导体和掺杂半导体，在此基础上引出 PN 结来说明半导体二极管导电的内部物理过程。

1.1.1 本征半导体

大家知道，铜是很好的导电材料，它的电阻率很小，约为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ ，故称为导体；而玻璃是很好的绝缘材料，它的电阻率很大，约为 $10^{12} \sim 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ ，故称为绝缘体；另一类物质，例如锗、硅，它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，这就是半导体。

高度提纯后，几乎不含杂质的半导体称为本征半导体。

本征硅也和其他材料一样，都是由原子构成的。由化学课中我

或者其他适当的类型，灯泡为手电筒用的 2.5 伏小电珠。若电路如图 1·1·2 (a) 所示，则灯泡发亮；若电路如图 1·1·2 (b) 所示，则灯泡不亮。

图 (a) 中，二极管的正极通过灯泡接到 E 的正

们知道，硅(Si)的原子序数为14，就是说，有14个电子分三层围绕着原子核旋转，如图1·1·3(a)所示。每个电子都带有相同的负电荷，其电量 q 为 1.60×10^{-19} 库。这样，硅原子共有 $14q$ 的负电荷围绕原子核旋转，而原子核本身带有 $14q$ 的正电荷。因此，在正常情况下，每个原子都是中性的。离原子核较近的两层中的10个电子，受到原子核正电荷的引力较大，不易脱离出来，而最外层的4个电子（称为价电子），受到原子核的引力较小，容易与相邻原子中的价电子构成共价键。因为硅有4个价电子，故硅是四价元素。图1·1·3(b)为只画出4个价电子的原子结构简化图。

硅原子是按一定规律整齐地排列着的，图1·1·4表示硅晶体的平面示意图。四个价电子象手挽手一样与邻近的四个原子中的价电子构成四个共价键，通过共价键，每个硅原子都受邻近四个原子的约束。

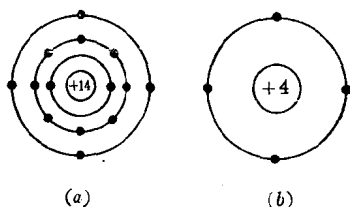


图 1·1·3 硅原子结构示意图
(a) 原子核及其电子的排列
(b) 只画出价电子的原子结构简化图

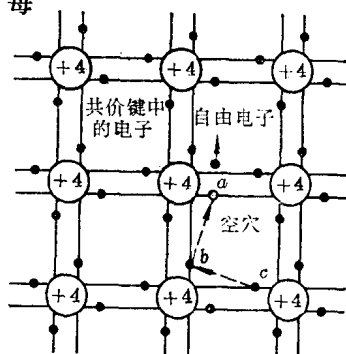


图 1·1·4 硅晶体结构平面示意图
(图中○表示空穴)

在绝对零度 (-273°C) 时，价电子没有能力脱离共价键的束缚，没有电子能够脱离原子结构而跑出来导电，这时的本征硅是良好的绝缘体。但是在室温时，共价键中的电子由于热激发而接受到足够的能量，就有少数的价电子摆脱共价键的束缚而成为自由电子；与此同时，在原来的共价键位置上就留下一个空位，称为空穴，如图1·1·4中的 a 处所示。由此可见：在本征半导体中，有一个自由电子，就一定有一个空穴，电子和空穴是成对地产生的，故称之为电子空

穴对。

空穴是由原子失掉一个价电子而形成的，可视为带正电。设在图1·1·4中a处有一空穴，则邻近共价键b处的电子在热能或外加电场力的作用下，有可能离开原来的共价键跑去填补a处的空穴，加入a处的共价键。这样，a处的空穴消失了，而在b处出现了空穴，这就相当于空穴从a移动到b。同样，如果c处的价电子跑去填补b处的空穴，则又相当于空穴从b移动到c。一般把空穴视为带正电荷的粒子。所以空穴的移动，就相当于正电荷的移动。空穴可以看作是载运电流的粒子，是一种载流子。

同理，自由电子是带负电荷的粒子，自由电子的移动就是负电荷的移动。所以，自由电子是另一种载流子。

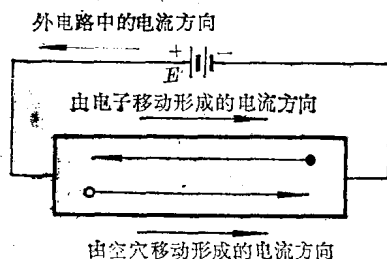


图 1·1·5 半导体中电子和空穴在外电场作用下的移动方向及其形成的电流方向

另一种载流子。

在半导体两端加上电源E，如图1·1·5所示，则自由电子将向电源的正端移动。至于空穴的移动，实际上是共价键中受束缚的价电子在晶格内递补空位而产生的移动*。空穴的运动方向与电子运动的方向是相反的。在外电路中，电子流

和空穴流所形成的电流方向是一致的。

由此可见，本征半导体在室温状态下，已经不再是绝缘体了，只是由于室温不高，热激发产生的电子空穴对还不多，所以导电性能还很差。例如本征硅在300K（即27℃）时的电阻率约为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^{**}$ 。

显然，如果温度增高，则电子空穴对一定会增多，电流也一定

* 关于空穴流与外加电源关系见参[2]第8页及第29~30页。参考书目列于本书末。

** 此数据摘自参[4]第2页，此数据在不同参考文献中略有不同。

会增大。可见，半导体的导电性能与温度是密切相关的。

锗(Ge)也是常用的半导体材料,它也是四价元素。不过,锗的原子序数为32,有32个电子分四层围绕原子核旋转。由于锗的四个价电子离原子核更远些,受热能激发后,更易于脱离共价键,故在相同温度下,锗产生的电子空穴对较硅更多,因此本征锗在27℃时的电阻率约为 $47\Omega\cdot\text{cm}$ ^{*},比本征硅小。

由此可得结论:

一、本征半导体中,每产生一个自由电子,就必有一个空穴产生,电子空穴是成对产生的。

二、电子空穴对的数量与温度有关,温度越高,电子空穴对就越多。在室温时,受热能激发的电子空穴对不多,所以,本征半导体的电阻率较大。

三、自由电子和空穴都是载流子,在电场力的作用下,它们的移动方向是相反的,而它们所形成电流的方向是一致的。所以当接上电源时,外电路中的电流是电子流和空穴流之和。

此外,电子空穴对的产生,除了热激发外,还可用光或其他射线来激发*。

1.1.2 掺杂半导体

如上所述,本征半导体的电阻率是较大的,如果不加以改造,它本身用处不多。但是,如果在本征半导体中掺进适当的其他元素,尽管加入的数量很少,却可以使半导体的电阻率有很大的改变。掺进的元素称为杂质,在本征半导体中掺进其它元素的过程称为掺杂,掺杂后的半导体称为掺杂半导体。

一、N型半导体

在4价的硅中,掺入少量5价的磷(P)或砷(As),那么,5价的磷原子在晶体中便占据了原来硅原子的一个位置,如图1.1.6所

* 有关光激发器件方面知识,可参看上海无线电十七厂译、科学出版社1972年出版的《专用半导体器件》§1—7节。