

工业电子学

沈尚贤 主编

西安交通大学

一九八二年二月

内 容 简 介

本书依据 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)编写的。本书是模拟电子电路上册内容有: 半导体二极管和三管极、基本放大电路、阻容耦合放大电路、负反馈放大电路和振荡电路、场效应管及其电路输入、直偶放大电路、集成运算放大器及其应用和稳压电源等。每章均附有一定的问题和习题。

本书可作为工科院校电机、电力和电子工程类等专业的教材或作参考书。

本书第三版序言

本书是我们教研室编写的《电子技术基础》（模拟电路部分）的第三版。由于本书适用于工科院校，而且用电子技术基础作书名的教材已较多，因此改名为《工业电子学》。

编写此书的目的，始终在于力求贯彻“少而精”，加强基础。电子技术发展很快，涉及的面也很广，我们总感到，要作为一本教材，应该在内容选择和教学法上，多作改进。这是我们自编此书的意图。现经试用了几年，在总结教学实践的基础上，经过教研室教师们的讨论，再次修订，以期前进一步。

1980年6月，教育部在成都召开了高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议，会中经参加电子技术小组的同志们反复讨论，审订了《高等工业学校电子技术基础教学大纲（草案）》，经教育部批准于同年8月印发。这样，我们的修订工作，也有了一定的依据。

多年来的实践，大家都感到在本课程的教学，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”。集成组件的应用，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，作了若干删节。

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，第五章场效应管及其电路和第九章直流稳压电源，大体上与教学大纲（草案）中的（一）、（二）、（三）、（四）、（九）相一致。书中将反馈与振荡合并起来，作为第四章；对振荡电路，仅以文氏电桥振荡器作为例子，来说明原理。第六章直接耦合放大电路，是为讲集成运算放大器组件作准备。在第七章集成运算放大器和第八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。集成组件实际上也可看作是一种器件，因此按“管为路用”的原则，第七章中关于它们的内部电路结构，教学中是有删节的余地的。第九章内，企图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，因此书中列于第八章中讨论。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。

本版的初稿于 80 年本校电子工程、电机工程类专业及一些兄弟院校试用后，对于主要章节作了重写或重大修改，又于 81 年本校试用，进一步修订而成。

本修订版的第一、九章，是叶治政同志写的，第二、三章是王志宏同志写的，第四章是翟钰同志写的，第五章是沈尚贤同志写的，第六、七、八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、陆棠、蔡祖端等同志。樊志容、张志清同志也参加了与本书配合的《教师手册》的编写工作。申忠如等同志也参加了本书的修订和校阅工作。

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

1982年2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 参杂半导体	3
1.1.3 PN 结	5
1.1.4 PN 结的单向导电性	6
1.1.5 半导体二极管的构造	7
1.1.6 半导体二极管的伏安特性	8
1.1.7 二极管的主要电参数	12
1.1.8 硅稳压管	14
1.2 半导体三极管	17
1.2.1 三极管的直流偏置和直流电流分配	17
1.2.2 三极管的特性曲线	19
1.2.3 三极管的电参数	21
1.2.4 温度对三极管参数的影响	25
附录 1.1 半导体管型号命名方法	27
附录 1.2 晶体二极管、三极管简易测试方法	27

第二章 放大电路基础

2.1 放大电路的工作原理及组成	31
2.1.1 直流偏置	32
2.1.2 信号的输入和输出	33
2.2 放大电路的基本分析方法(一)——图解法	35
2.2.1 静态值的计算	35
2.2.2 动态情况及其计算	37
2.2.3 静态工作点的选择	47
2.2.4 电路参数对静态工作点的影响	48
2.3 放大电路的基本分析方法(二)——微变等效电路法	49
2.3.1 晶体管的微变等效电路	49
2.3.2 r_{be} 的估算	53
2.3.3 微变等效电路法	54

2.3.4	电路参数对放大倍数的影响	56
2.3.5	输入电阻和输出电阻	57
2.4	静态工作点的稳定	63
2.4.1	环境温度 T_e 对静态工作点的影响	63
2.4.1	稳定静态工作点的典型电路	64
2.5	基本放大电路的三种接法及其性能比较	69
2.5.1	共集电极基本放大电路	69
2.5.2	共基极基本放大电路	73
2.5.3	三种接法的比较	75

第三章 阻容耦合放大器

3.1	耦合方式——阻容耦合	77
3.2	多级放大器的组成	78
3.3	多级放大器的计算	80
3.3.1	多级放大器的电压放大倍数	80
3.3.2	多级放大器的输入、输出电阻和输出动态范围	81
3.4	单级共射放大电路的频率特性	82
3.4.1	频率响应、频率失真	83
3.4.2	频率特性的分析方法	84
3.4.3	中频区的频率特性	86
3.4.4	低频区的频率特性和下限频率	87
3.4.5	高频区的频率特性和上限频率	90
3.4.6	对数频率特性——波特图	97
3.5	单级共基放大电路的频率特性	100
3.5.1	晶体管共基接法的频率参数——共基极截止频率 f_β	100
3.5.2	共基放大电路的频率特性	101
3.6	多级放大器的频率特性	101
3.6.1	多级放大器的波特图	101
3.6.2	多级放大器的上限频率 f_H 和下限频率 f_L 的估算	103
3.7	基本放大电路的阶跃响应	104
3.8	放大电路的主要性能指标	108

第四章 反馈与振荡

4.1	反馈的概述	109
4.1.1	什么叫反馈	109
4.1.2	反馈的分类	111
4.1.3	负反馈电路举例	113
4.1.4	负反馈放大电路的一般表达式	116
4.2	负反馈对放大电路性能的影响	118

4.2.1	提高放大倍数的恒定性	118
4.2.2	扩展通频带	119
4.2.3	减小非线性失真	121
4.2.4	抑制放大电路内部的干扰和噪声	121
4.2.5	对输入电阻和输出电阻的影响	122
4.3	负反馈放大电路的计算	125
4.3.1	单级反馈放大电路的计算	125
4.3.2	多级反馈的近似计算	127
*4.3.3	利用方框图的计算法	129
4.4	放大电路的自激振荡及消除	132
4.4.1	产生自激振荡的条件	132
4.4.2	附加相移引起的振荡及消除方法	133
4.4.3	电源内阻引起的寄生振荡	134
4.5	正弦波振荡器	135
4.5.1	振荡器的组成	136
4.5.2	文氏电桥振荡器	136
4.5.3	RC 移相式振荡器	140

第五章 场效应管及其电路

5.1	结型场效应管	141
5.1.1	结型场效应管的结构和工作原理	141
5.1.2	结型场效应管的特性曲线	144
5.1.3	结型场效应管的主要电参数	147
5.2	绝缘栅场效应管	148
5.2.1	绝缘栅场效应管的结构和工作原理	148
5.2.2	MOS 管的特性和主要参数	150
5.3	场效应管的基本放大电路	152
5.3.1	静态的估算	152
5.3.2	动态的估算	153
5.4	场效应管电路应用举例	154
5.4.1	恒流二极管	154
5.4.2	源极输出器	155
5.4.3	压控电阻	156
5.5	场效应管与双极型管的比较	157

第六章 直接偶合放大器

6.1	直偶放大器的需要性和特殊性	160
6.2	直偶放大器的偶合方式	161
6.2.1	提高发射极电位的直偶电路	161

6.2.2	采用 NPN—PNP 管混合式直偶电路	162
6.2.3	采用复合管的电路	163
6.2.4	静态输出为零电路	164
6.3	零点漂移	164
6.3.1	零点漂移现象	164
6.3.2	产生零漂的主要因素	165
6.3.3	抑制零漂的办法	165
6.4	差动放大器	166
6.4.1	差动放大器的基本电路	167
6.4.2	差动放大器的典型电路	169
6.4.3	单端输入、单端输出差动放大电路	172
6.4.4	带恒流源的差动放大电路	173
6.4.5	差动放大电路四种形式的比较	174
6.5	互补对称功率输出级电路	176

第七章 线性集成运算放大器

7.1	线性集成电路概述	182
7.2	线性集成电路分析	183
7.2.1	F001 型电路分析	183
7.2.2	5G24 型集成电路分析	185
7.2.3	5G24 型集成电路计算	193
7.3	基本运算放大器	196
7.3.1	反相输入比例放大器	196
7.3.2	同相输入比例放大器	199
7.3.3	差动输入运算放大器	201
7.4	集成运算放大器的主要技术指标及测试方法	205
7.4.1	主要技术指标	205
7.4.2	集成运算放大器参数的简易测量方法	209

第八章 运算放大器的应用

8.1	运算电路	215
8.1.1	加法器和减法器	215
8.1.2	积分器和微分器	217
8.1.3	对数和反对数运算放大器	219
8.1.4	乘法器	221
8.2	信号发生电路	222
8.2.1	正弦波发生器	222
8.2.2	比较器	223
8.2.3	方波发生器	225

8.2.4	三角波发生器	227
8.3	运算放大器在实际应用中的一些问题	229
8.3.1	运算放大器性能的扩展	229
8.3.2	调零和保护措施	231
第九章 直流稳压电源		
9.1	直流稳压电源的方框图	234
9.2	单相桥式整流电路	235
9.3	滤波电路	238
9.3.1	电容滤波电路	238
9.3.2	π 型滤波电路	242
*9.4	倍压整流电路	244
9.5	直流稳压电路	244
9.5.1	硅稳压管稳压电路	245
9.5.2	串联型稳压电路	248
9.6	集成稳压电路	251
9.6.1	WA7 型集成稳压组件电路介绍	251
9.6.2	集成稳压组件的主要电参数	255
9.6.3	扩大集成稳压组件输出电流与输出电压的电路	256
各章问题		257
各章习题		266
参考书目		291

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、主要参数和定额，为今后选择二极管和分析二极管电路打基础。

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

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、定额，为分析和应用三极管电路打基础。

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。 B 为两节 1.5 伏的干电池，二极管为 2CP33 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 B 的正端，二极管的负极接到 B 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

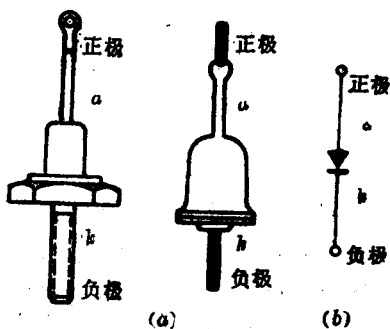


图 1.1.1 小功率半导体二极管的外形及符号
(a) 外形图 (b) 符号

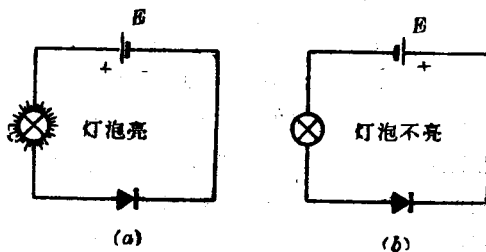


图 1.1.2 半导体二极管电路

一个阻值较小的电阻，称为导通状态。

图(b)中，二极管的正极通过灯泡接到 B 的负端，二极管的负极接到 B 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，称为截止状态。

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 $1.75 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ ，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 $10^{12} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ，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14 q 的负电荷围绕原子核旋转，而原子核本身带有14 q 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。

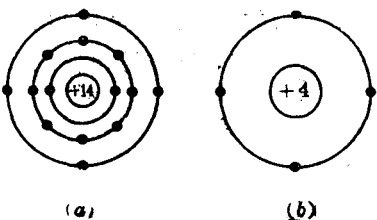


图 1.1.3 硅原子结构示意图

(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

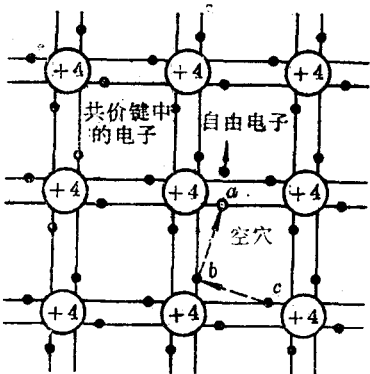


图 1.1.4 硅晶体结构平面示意图

(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,这样就相当于空穴从 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。

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。

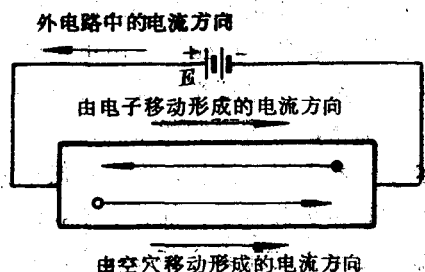


图 1.1.5 半导体中电子和空穴在外电场作用下的移动方向及其形成的电流方向

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,还可利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

* 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。

*** 有关光激发器件方面知识,可参看上海无线电十七厂译《专用半导体器件》一书,第一章 §1-7 节。科学出版社 1972 年出版。

有很大的改变。掺进的元素称为杂质，这个过程称为掺杂，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所示。磷原子的5个价电子中只有4个能够和相邻的4个硅原子分别组成共价键，结果多出一个价电子没有被组织进共价键，所以受磷原子核吸引力很弱。在室温条件下，这个价电子就容易受热能激发而脱离磷原子，成为自由电子。这个磷原子因失去一个电子，就变为带正电荷的正离子。正离子是由原子核及绕核旋转的电子所组成，不能自由移动，因此正离子不是载流子。此外，掺入磷原子后，在室温下，每个磷原子产生一个自由电子，而不同时产生一个空穴，这是与本征半导体的情况不同的。显然，掺入的磷原子越多，产生的自由电子就越多，电阻率也越低。

当然，与本征半导体一样，在其余的硅原子中，由于热激发也会产生少量的电子空穴对。

通常，掺入磷的数量总是使得：磷原子产生的自由电子大大超过本征半导体热激发产生的电子空穴对。这样，在上述的掺杂半导体中，自由电子占优势，是多数载流子，简称多子；空穴是少数载流子，简称少子。这种掺杂半导体叫N型或电子型半导体。象磷、砷这一类能够给出电子的元素，称为施主杂质。

二、P型半导体

在4价的硅中，掺入3价的硼(B)或铟(In)，则晶体排列如图1.1.7所示。因为硼原子只有3个价电子，只能与相邻的三个硅原子组成三个完整的共价键，而另一个共价键中留着一个空位。在常温下，这个空位容易被邻近硅原子中的价电子所填充，例如在图1.1.7中b处的价电子脱离它原来的共价键，去递补a处的空位，这样，在b处就产生一个空穴，同时三价的硼原子因为得到一个电子来补充其空位，而变成带负电荷的负离子。与正离子一样，负离子也不是载流子。此外，掺入硼原子后，在室温下，每个硼原子能产生一个空穴，而不同时产生自由电子，这也是与本征半导体中的情况不同的。显然，掺入的硼原子越多，产生的空穴就越多，电阻率也越低。象硼、铟这样的元素，能够接受电子，所以称为受主杂质。

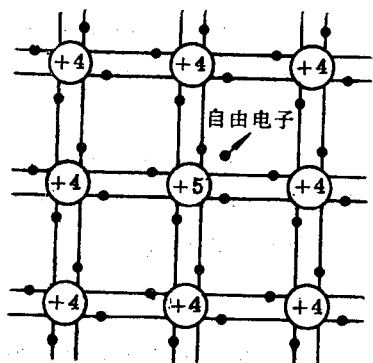


图 1.1.6 掺施主杂质的N型半导体示意图

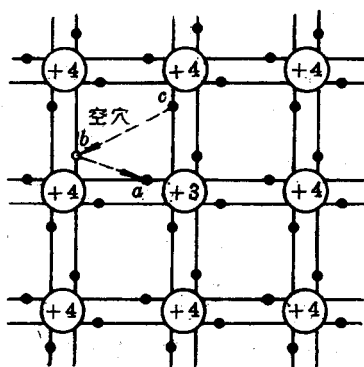


图 1.1.7 掺受主杂质的P型半导体示意图

与前述的掺施主杂质的半导体相同，在掺受主杂质的半导体中，也还有少量的、由本征半导体受热激发所产生的电子空穴对。

显然，掺入硼、铟一类的3价杂质元素后，空穴是多数载流子，自由电子（以下简称电子）是少数载流子。这种掺杂半导体称为P型或空穴型半导体。

在一块N型半导体内，再掺入3价的受主杂质，能不能把一部分N型半导体转化为P型半导体呢？完全可能的。半导体中如果既含施主杂质（5价），又含受主杂质（3价），则杂质浓度大的决定其导电类型。

在半导体中，如果一个自由电子跑去填补了一个空穴，则同时消失了一个自由电子和一个空穴，这种现象叫复合。所以，复合的过程就是载流子消失的过程。这样，半导体中的空穴会不会因为复合而减少呢？只要温度一定，本征热激发产生的电子空穴对就基本一定，一方面电子空穴在不断地复合，另一方面因热激发又在不断地产生新的电子空穴对，二者处于动态平衡状态。所以，半导体中的空穴和电子的浓度在一定的外部条件（如温度）下是恒定的。

在N型半导体中，尽管带负电的自由电子多于带正电的空穴，但由于同时存在许多对应的正离子，所以，从整体看，它是中性的。同理，从整体看，P型半导体在电性能上，也是中性的。

由此可得出结论：

一、本征硅（或锗）半导体中，掺入5价的杂质元素（施主杂质）后变成N型半导体，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。此外还有不参加导电的正离子。

二、本征硅（或锗）半导体中，掺入3价的杂质元素（受主杂质）后变成P型半导体，多子是空穴，少子是电子。此外还有不参加导电的负离子。

三、掺杂半导体中，多子的数目决定于掺杂的多少，掺入的杂质多，多子就多；少子的数目则与温度有关，温度越高，少子的数目就越多。

1.1.3 PN结

若采取一定措施*使一块半导体一边形成N型半导体，另一边形成P型半导体，那么就会在这两种半导体的交界处，形成一层很薄的PN结，如图1.1.8所示。因交界面的左边为P型半导体，右边为N型半导体，所以左边的空穴浓度大于右边，右边的电子浓度大于左边。由于交界面两边的空穴存在着浓度差，所以，P型这边的空穴就向N型一边扩散，这样一来，P型一边原来保持电中性的P型半导体，因失去空穴而变为带负电。换句话说，交界面左边因为失去了空穴，所以留下了与空穴对应的负离子。

同理，右边的电子将越过交界面扩散到左边，右边便留下了与自由电子对应的正离子。结果是：交界面左侧留下了负离子的薄层，右侧留下正离子的薄层，如图1.1.8(a)所示。

正离子层因带正电，所以它的电位较高，负离子层因带负电，所以它的电位较低。于是，N型一边的电位高于P型一边，如图1.1.8(b)所示。这样，在交界面两侧就产生了电场。因为

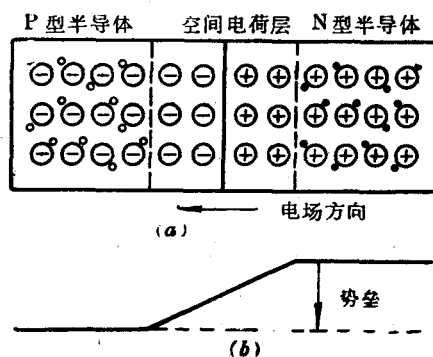


图 1.1.8 PN结的示意图
(a)平衡状态下的PN结 (b)结电位分布
图中：⊖表示负离子 ⊕表示正离子

* 有关半导体二极管中PN结制造工艺，见1.1.5节。

这个电场是载流子扩散后自己建立起来的，故称自建场，其方向如图中箭头所示。因为自建场的方向是从右边指向左边，即右边的电位高，左边的电位低，所以这个电场就阻碍左边的空穴向右边扩散，同样也阻碍右边的电子向左边扩散。当自建场达到足够强时，多数载流子就很难再继续扩散， PN 结两边的电位分布达到稳定状态。这时， PN 结就象一个壁垒，阻挡了载流子的继续扩散，所以稳定后的自建场又称为势垒或位垒，离交界面较远的半导体中，仍然保持电中性状态，故不产生电位差。

因为交界面附近只留下不能移动的正、负离子，故这个区域称为空间电荷层。在动态平衡时，空间电荷层内缺少载流子，故也称耗尽层。这一层是很薄的，约为数微米。又因自建场起着阻碍一种杂质半导体的多子向另一种杂质半导体扩散的作用，所以又称阻挡层。所谓 PN 结，就是指阻挡层。

以上只讨论了多子的扩散情况。但在掺杂半导体中，还有少量的少子。例如，左边的少子是电子，在自建场的作用下，就容易从左边漂流到右边；右边的少子是空穴，在自建场的推动下，也容易从右边漂流到左边。这样的载流子运动，称为漂移。

当自建场达到稳定后，多子因扩散而产生的扩散电流，应该与少子因自建场电场力作用而产生的漂移电流保持在动态平衡状态，二者大小相等，方向相反，即经过交界面的电流为零。

可见，载流子的运动有二种形式：一是扩散，二是漂移。 PN 结中的势垒，就是载流子运动的结果。首先因为两边的多子存在浓度差，故产生多子的扩散运动；随着多子的扩散，逐渐形成自建场，反过来又阻止多子的继续扩散。自建场的方向是有利于少子向对方运动的，于是在自建场电场力的推动下产生了少子的漂移运动。当自建场达到稳定后，多子的扩散将与少子的漂移保持动态平衡。

1.1.4 PN 结的单向导电性

图 1.1.9 表示 PN 结在外加正向电压时的情况(亦称正向偏置，简称正偏)。当未加正向电压时， PN 结的电位分布如图 1.1.9(b) 中的虚线所示。当加了正向电压后，在外加电场的作用下， N 型半导体中性区内的多数载流子(电子)要向左移动，与原来空间电荷层内的正离子中和，使空间电荷层宽度和空间电荷量都减小。在 N 区中电子向左移动的同时，电源负端也不断地向 N 区中补充电子，维持它在电性能上保持中性。同理， P 型半导体中性区内的多数载流子(空穴)要向右移动，亦要使空间电荷层的宽度和空间电荷量减小。于是，空间电荷层变窄了， PN 结的势垒降低了，如图 1.1.9(b) 中实线所示。因为 PN 结的势垒降低了，所以 P 型半导体中的空穴(多子)就容易扩散到 N 型一边， N 型一边的电子(也是多子)也容易扩散到 P 型一边，也就是说，多子产生的扩散电流大大增加了。

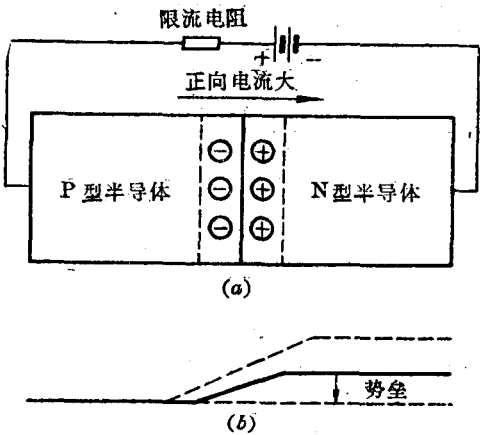


图 1.1.9 PN 结在外加正向电压时的情况
(a) PN 结外加正向电压，空间电荷层变窄(b)电位分布

从而导致外电路中出现较大的电流。扩散电流的方向是从电源正端出发，经过限流电阻，再从P型半导体流向N型半导体，回到电源的负端。电源的这种接法称为正向接法。

由于PN结两边的少数数量都很少，所以在正向偏置下漂移电流与扩散电流相比是很小的，可以忽略。

可见，加正向电压时，空间电荷层变薄，势垒降低，由多子扩散运动形成的正向电流（从P到N）增加，PN结表现为低电阻，即导通状态。

图1.1.10表示PN结在外加反向电压的情况（也称反向偏置，简称反偏）。此时多数载流子将背离耗尽层，空间电荷量和耗尽层厚度都将增加，势垒高度也将增加，使多子的扩散电流大为减弱，而漂移电流将占优势，于是这时通过PN结的电流将主要由漂移电流决定。它是由少数子组成的，少子的浓度很小，因此得到的电流远小于正向电流。电源的这种接法称为反向接法，产生的电流称为反向电流，它又称反向饱和电流。因为在温度不变时，少数载流子浓度不变，因此，反向电流几乎不随外加电压而变化*。

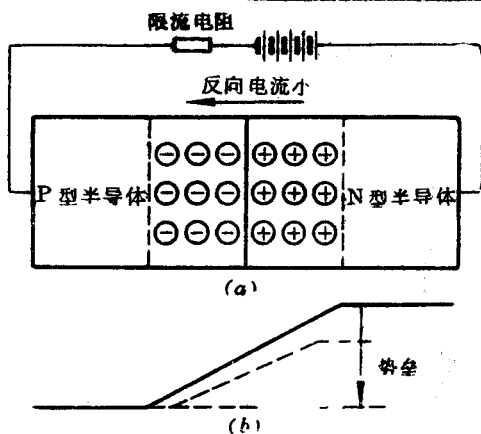


图1.1.10 PN结在外加反向电压时的情况
(a)PN结外加反向电压，空间电荷层变宽(b)电位分布

可见，PN结外加反向电压时，阻挡层变宽，势垒提高，反向电流很小，PN结表现为高电阻，即截止状态。

因此，PN结在正向电压作用下，表现为低电阻，在反向电压作用下，表现为高电阻，这就是PN结的单向导电性。

1.1.5 半导体二极管的构造

半导体二极管就是由一个PN结，再加上接触电极、引线，最后加以封装而成。按照它们的结构形式，可分为点接触型和面接触型两类。

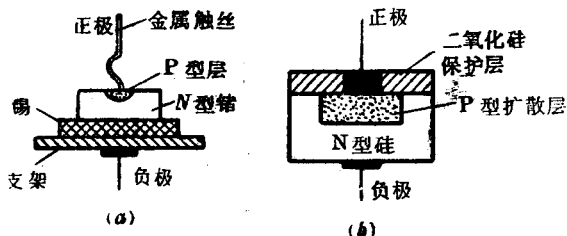


图1.1.11 半导体二极管的结构示意图
(a)点接触型 (b)平面型

和晶片的锡底座连接的引出线为负极。它的特点是结的面积小，结电容小**。适用于高频（几百兆赫）工作，但不能通过很大电流。常用作检波二极管。

一、点接触型二极管。管芯结构如图1.1.11(a)所示。它是用一块N型锗或硅晶片，在晶片上有一根金属丝靠弹性与它接触。制造时采用“电形成”工艺（在短暂时间内通过较大的电流），使触丝上的一部分金属原子转移到N型晶体片中去，从而在接触处形成一个P型区域，构成一个PN结。和触丝连接的引出线为正极，

* 这里是指外加反向电压小于PN结反向击穿电压而言。若外加反向电压等于或大于PN结反向击穿电压，则反向电流随外加反向电压的增加而急剧增大。详见1.1.7节。

** 有关结电容概念，见1.1.7节。

二、平面型二极管。管芯结构如图 1.1.11(b) 所示。它是在一块 N 型硅片上经氧化生成一层二氧化硅(SiO_2)，然后在需要形成 P 型硅的地方把二氧化硅腐蚀掉，将二氧化硅层开了一个“窗口”，以后就进行受主杂质的气态扩散，把“窗口”处的部分 N 型硅转变为 P 型硅，从而形成一个 PN 结。最后再在 P 型硅上加金属接触层作为正极。这种结构属于面接触型。

它的特点是结面积大，允许通过的正向电流可比点接触型大得多。常被用作整流管。半导体管的型号命名法，参看附录 1.1。

1.1.6 半导体二极管的伏安特性

半导体二极管本质上既然是一个 PN 结，因此，它在正向偏置下容易导电(导通状态)，在反向偏置时基本上不导电(截止状态)，这一单向导电性可用伏安特性表达出来。所谓伏安特性就是管子二极管所加的电压与流过它的电流之间的关系曲线。电压的单位为伏，电流的单位为安(或毫安、微安等)。

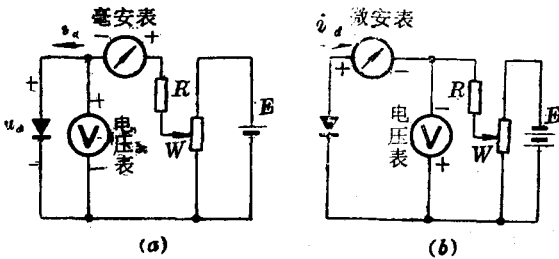


图 1.1.12 测试二极管伏安特性的电路图
(a) 测正向伏安特性 (b) 测反向伏安特性

图 1.1.12(a) 为测试正向伏安特性的电路，图中 W 是调节电压的电位器， R 是限流电阻，它防止在测正向特性时，正向电流可能过大而使管子烧坏。电压和电流分别用直流电压表和直流毫安表(或安培表)读出。图 1.1.12(b) 是测试反向伏安特性时所用的电路图。由于这时电流较小，通常改用微安表(或毫安表)来测量反向电流。

测反向特性时所用的电源电压 E ，往往要比测正向时高得多，所用的限流电阻也要比测正向时大得多，以防止当反向电压过高使管子击穿，引起反向电流过大而烧坏管子，同时也保护微安表不致损坏。

图 1.1.13 和 1.1.14 分别表示 2AP7 和 2CP33B 型二极管的伏安特性。它们可以从半导体手册 * 或制造厂的产品目录中查得。需要特

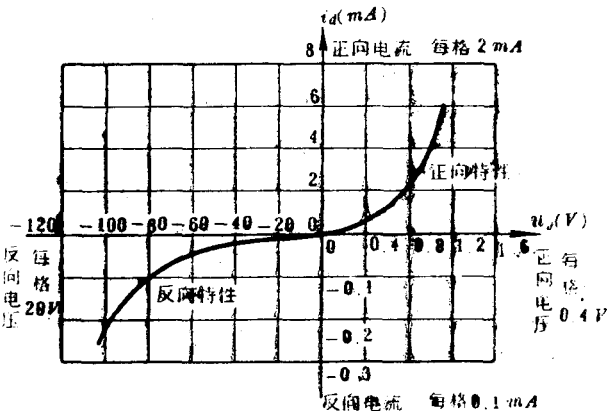


图 1.1.13 2AP7 型锗二极管的伏安特性

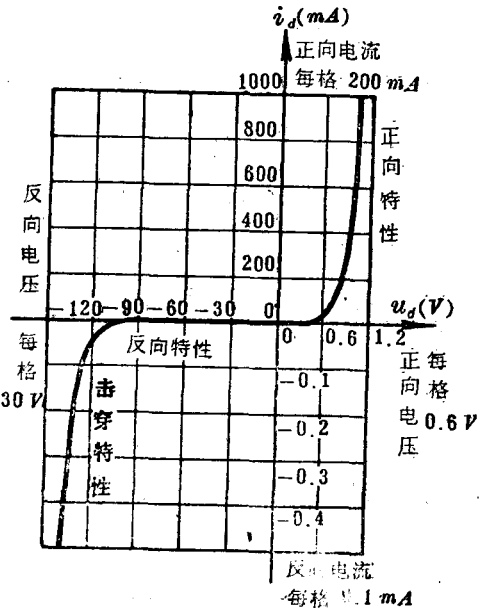


图 1.1.14 2CP33B 型硅二极管的典型伏安特性