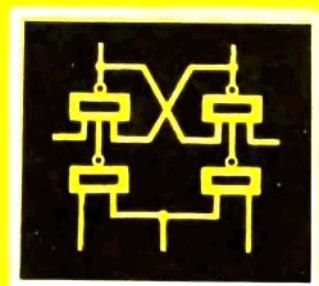


DIAN ZI XIAN LU  
YU SHU ZI LUO JI



裴昌幸 编  
陈继纯

# 电子线路与数字逻辑

西安电子科技大学出版社

## 序 言

本书是计算机应用专业《电子线路与数字逻辑》课程的教材。

为适应不同层次办学的需要，考虑到模拟与数字电子技术的发展，编者积多年的教学实践和教学经验，收集了数届学生的反映，在此基础上编写出这本教材。

《电子线路与数字逻辑》是计算机应用专业重要的技术基础课。通过本课程的学习，应为该专业后续课程的学习打下必要的基础。为节约篇幅、减少不必要的重复，对后续课程所涉及到的内容(如A/D、D/A、微处理器等)书中未曾编入。

本教材注重讨论基本概念、基本原理和基本分析方法，以便增强学生独立分析和解决电子线路与逻辑电路功能的能力。在巩固基本概念和突出分析方法的同时，注意引导学生认识和研究某些实际电路和集成电路的应用，以适应当前电子技术飞速发展的需要。为合理解决不断增长的新技术和有限篇幅之间的矛盾，本书在编排结构及内容取舍上都做了一定的改动，对那些不便在正文中反映的某些具体问题，将以例题或习题的形式出现。

本书内容充实，重点突出，文字简炼，阐述问题深入浅出，通俗易懂，故有利于具有一定电路基础知识及实践经验的学生自学。

全书共分十三章，第一~七章由裴昌幸同志编写，第八~十三章由陈继纯同志编写，与本教材配套使用的《电子线路与数字逻辑》实验指导书由张军同志编写。

本书承西安电子科技大学信息工程系副主任邬国扬副教授和计算机系高级工程师戴翊同志审阅，并提出了许多宝贵意见。此外，陕西省自学考试委员会副主任周振豪同志在本书的编写中给予了指导，在此对他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在缺点和错误，恳切希望读者给予批评和指正。

编 者

于西安电子科技大学

1989年4月

# 目 录

第一章 晶体二、三极管	
§ 1-1 半导体基础知识	1
一、半导体及其特性	1
二、本征半导体	1
三、杂质半导体	3
§ 1-2 晶体二极管	5
一、PN 结及其单向导电性	5
二、晶体二极管的结构、符号及伏安特性	7
三、晶体二极管的分类和命名	9
四、晶体二极管的参数	12
五、晶体二极管的粗略	13
§ 1-3 晶体三极管	14
一、晶体三极管的结构和放大原理	14
二、晶体三极管的特性曲线和参数	19
三、晶体三极管的简易测试	27
本章小结	29
思考题及习题	30
第二章 基本放大器及其分析方法	
§ 2-1 放大器的组成及基本原理	33
一、放大器的组成和各元件作用	33
二、放大器的静态工作点	34
三、放大器的放大原理	34
§ 2-2 放大器的分析方法	36
一、图解法	36
二、等效电路法	43
§ 2-3 工作点稳定电路	51
一、固定偏置电路	51
二、电流负反馈偏置稳定电路	51
三、两管直接耦合负反馈偏置稳定电路	53
四、采用热敏元件补偿的偏置稳定电路	54
§ 2-4 多级放大器	55
一、放大器的级间耦合	55
二、输入电阻和输出电阻	55
三、电压放大倍数	58
§ 2-5 放大器的调整与测试	60
一、静态工作点 $Q$ 的调整	60
二、检查波形是否失真	61
三、放大器指标的测试	62
四、放大器中的噪声、振荡及消除	63
本章小结	65
思考题及习题	65
第三章 放大器频率响应	
§ 3-1 基本概念及表示方法	70
一、什么是频率响应	70
二、频率特性的表示方法	70
三、混合 $\pi$ 型等效电路	74
§ 3-2 单级放大器的频率响应	79
一、低频响应	80
二、高频响应	84
三、单级放大器的总频率响应	85
§ 3-3 多级放大器的频率响应	86
一、多级放大器的上限频率	86
二、多级放大器的下限频率	88
本章小结	89
思考题及习题	90
第四章 负反馈放大器	
§ 4-1 负反馈的基本概念	92
一、什么是反馈	92
二、反馈的分类	93
三、负反馈放大器的方框图及基本关系式	99
§ 4-2 负反馈对放大器性能的影响	103
一、提高了放大倍数的稳定性	103
二、改善了放大器的频率特性	104
三、减小了非线性失真	105
四、负反馈对放大器输入、输出电阻的影响	106

§ 4-3 负反馈放大器的分析方法 .....	107	一、互补对称 OTL 电路 .....	159
一、简单电路的等效电路计算法 .....	107	二、互补对称 OCL 电路 .....	163
二、深反馈放大器增益的估算 .....	109	§ 6-4 集成运放内部单元电路	
三、方框图计算法 .....	111	及参数 .....	164
§ 4-4 负反馈放大器稳定性分析 .....	120	一、恒流源电路 .....	164
一、自激的概念及条件 .....	120	二、双端-单端输出变换电路 .....	168
二、自激的判别方法 .....	121	三、输入级电路 .....	168
三、如何保证负反馈放大器		四、典型运放电路 .....	171
稳定工作 .....	123	五、集成运放参数 .....	173
本章小结 .....	125	§ 6-5 运算放大器的应用 .....	176
思考题及习题 .....	125	一、理想运放条件及三种	
<b>第五章 场效应管及其放大电路</b>		闭环输入组态 .....	176
§ 5-1 结型场效应管 .....	130	二、运算放大器在运算	
一、工作原理 .....	130	电路中的应用 .....	179
二、结型场效应管的特性曲线 .....	131	三、运算放大器在信号	
§ 5-2 绝缘栅场效应管 .....	134	处理中的应用 .....	184
一、增强型绝缘栅场效应管 .....	135	四、运算放大器在波形	
二、耗尽型绝缘栅场效应管 .....	135	产生中的应用 .....	187
§ 5-3 场效应管的主要参数及交流等效		五、非理想运算放大器的闭环特性 .....	189
电路 .....	136	六、集成运放使用中应注意的	
一、直流参数 .....	136	几个问题 .....	192
二、交流参数 .....	137	本章小结 .....	193
三、低频交流等效电路 .....	137	思考题及习题 .....	194
§ 5-4 场效应管基本放大器 .....	138	<b>第七章 直流稳压电路</b>	
一、放大原理 .....	138	§ 7-1 整流电路 .....	199
二、偏置电路 .....	138	一、半波整流电路 .....	199
三、电压放大倍数 .....	140	二、全波整流电路 .....	200
本章小结 .....	140	三、桥式整流电路 .....	200
思考题及习题 .....	142	四、整流电路的基本参数 .....	201
<b>第六章 集成运算放大器</b>		§ 7-2 滤波电路 .....	202
§ 6-1 集成电路概述 .....	143	一、并联电容滤波电路 .....	202
一、发展 .....	143	二、有源滤波电路 .....	203
二、组成框图 .....	144	§ 7-3 稳压电路 .....	204
三、外型及符号 .....	145	一、稳压管稳压电路 .....	204
§ 6-2 差动放大器 .....	146	二、串联型晶体管稳压电路 .....	205
一、直流放大器的特殊问题 .....	146	本章小结 .....	208
二、差动放大器 .....	148	思考题及习题 .....	209
三、差动放大器的改进 .....	154	<b>第八章 数制与代码</b>	
§ 6-3 互补对称输出级电路 .....	159	§ 8-1 数制 .....	210

§ 8-2 数制转换 .....	211	一、电路结构及工作原理 .....	256
一、多项式替代法 .....	211	二、电压传输特性 .....	258
二、基数乘法 .....	212	三、主要性能参数 .....	258
三、数码直接代换法 .....	214	四、改进形式 .....	259
§ 8-3 二进制代码 .....	216	五、TTL 与非门的派生电路 .....	261
一、二-十进制代码 .....	216	§ 10-3 MOS 集成逻辑门 .....	265
二、格雷码 .....	218	一、nMOS 倒相器(非门)的	
三、奇偶校验码 .....	219	工作原理 .....	266
四、字符代码 .....	219	二、性能分析 .....	266
本章小结 .....	219	三、nMOS 逻辑门 .....	267
思考题及习题 .....	219	四、CMOS 倒相器与逻辑门 .....	267
<b>第九章 逻辑代数</b>		五、CMOS 集成逻辑门的性能参数 .....	269
§ 9-1 逻辑代数的基本知识 .....	221	本章小结 .....	269
一、基本概念 .....	221	思考题及习题 .....	270
二、基本逻辑运算 .....	222	<b>第十一章 组合逻辑电路</b>	
三、基本定理 .....	225	§ 11-1 概述 .....	272
四、基本规则 .....	228	§ 11-2 组合逻辑电路的分析 .....	273
§ 9-2 复合逻辑运算 .....	229	§ 11-3 组合逻辑电路的设计 .....	276
一、“与非”运算和“或非”运算 .....	229	一、组合逻辑电路设计步骤 .....	276
二、“与或非”运算 .....	229	二、输入无反变量的组合逻辑电路	
三、“异或”运算和“同或”运算 .....	230	的设计 .....	280
§ 9-3 逻辑函数表达式的表示方法 .....	232	三、多输出组合逻辑电路的设计 .....	281
一、“与-或”和“或-与”表达式 .....	232	§ 11-4 组合逻辑电路的	
二、逻辑函数的标准式 .....	233	竞争和险象 .....	284
三、不完全确定的逻辑函数 .....	238	一、险象的产生与分类 .....	285
§ 9-4 逻辑函数的几何图形表示 .....	239	二、险象的判别 .....	287
一、维恩( Venn )图 .....	239	三、险象的消除 .....	288
二、卡诺( Karnangh )图 .....	240	§ 11-5 常用组合逻辑电路 .....	290
§ 9-5 逻辑函数的化简 .....	244	一、编码器 .....	291
一、代数化简法 .....	244	二、译码器 .....	296
二、卡诺图化简法 .....	246	三、数码比较器 .....	309
本章小结 .....	249	四、加法器 .....	311
思考题及习题 .....	250	五、数据选择器 .....	316
<b>第十章 逻辑门</b>		本章小结 .....	320
§ 10-1 DTL “与非门” .....	252	思考题及习题 .....	321
一、电路结构及工作原理 .....	252	<b>第十二章 同步时序逻辑电路</b>	
二、主要性能参数 .....	253	§ 12-1 时序逻辑电路综述 .....	325
三、HTL 与非门 .....	256	一、时序逻辑电路的基本概念 .....	325
§ 10-2 TTL “与非门” .....	256	二、时序逻辑电路的描述 .....	326

§ 12-2 时序逻辑电路的记忆单元 .....	329	本章小结 .....	372
一、R-S 触发器 .....	329	思考题及习题 .....	372
二、J-K 触发器 .....	332	<b>第十三章 寄存器和计数器</b>	
三、D 触发器 .....	336	§ 13-1 寄存器 .....	376
四、T 触发器 .....	337	一、并行寄存器 .....	376
五、触发器的激励表 .....	338	二、串行寄存器 .....	378
§ 12-3 同步时序逻辑电路 .....	339	三、串并行移位寄存器 .....	380
一、同步时序逻辑电路的分析 .....	339	四、寄存器的应用 .....	381
二、同步时序逻辑电路的		§ 13-2 计数器 .....	383
设计步骤 .....	346	一、异步计数器 .....	384
三、状态指定 .....	347	二、同步计数器 .....	392
四、状态化简 .....	348	三、集成计数器 .....	401
五、状态编码和求函数表达式 .....	356	本章小结 .....	406
六、同步时序电路设计举例 .....	366	思考题及习题 .....	406

# 第一章 晶体二、三极管

晶体二极管和三极管是电子设备中两种极为重要的电子器件，它们与其它电子元器件按一定规律结合，可构成各种电子设备与仪器。因此，掌握它们的特性和原理，对学习、使用、维修电子设备，更好地掌握计算机的接口技术都是十分必要的。

晶体二极管和三极管都是由半导体材料制作而成的，因此，要深刻理解二极管和三极管的特性及工作原理，首先必须了解半导体有关知识。所以在研究二、三极管之前，本章先介绍半导体的一些基本知识，在此基础上进而再讨论晶体二、三极管。

## § 1-1 半导体基础知识

### 一、半导体及其特性

在日常生活及生产实践中，大家都知道银、铜、铝、铁等金属材料是很容易导电的，我们把它们叫做导体。而塑料、陶瓷、橡胶等都很难导电，所以通常称为绝缘体。

有些物体，它们既不象导体那样容易导电，也不象绝缘体那样不容易导电，其导电性能介于导体和绝缘体之间，我们把这类物质叫做半导体。如锗、硅、硒和大多数金属的氧化物等(例如氧化亚铜)都是半导体。

我们知道物质是由分子构成的，分子又由原子构成。从原子的排列形式来看，可以把物质分成两大类：晶体和非晶体。晶体内部的原子按一定的规律整齐地排列着，具有特殊的形状。而非晶体内部的原子排列是杂乱的，没有规律的。

由于绝大多数半导体是晶体，因而往往把半导体材料称为晶体。晶体管的名称就是这样得来的。

半导体既不能做导体，又不能作绝缘体，为什么会引起人们很大的兴趣呢？原因在于半导体具有下述特性：

(1) 半导体的导电能力随着外界条件的变化会有显著的变化。例如，当外界温度升高时，半导体的导电能力增强，温度下降时导电能力降低，也就是说半导体的导电能力与温度有密切的关系，利用这种特性可做成自动控制的热敏元件(如热敏电阻等)。又如，当照射在半导体上的光强改变时，半导体的导电能力也将随着发生显著的变化。利用这种特性可做成各种各样自动控制用的光电器件和元件(如：光电二极管、光电三极管和光敏电阻等)。

(2) 半导体的导电能力很容易人为地加以控制。纯净的半导体导电能力很差，如果在其中加入适当的微量杂质(称为掺杂)，半导体的导电能力就会有上百万倍地增加，这是半导体最为显著的特性。利用半导体的这一特性，可以制造出各种不同性质、不同用途的晶体管器件。

### 二、本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体。在绝对零度时，硅或锗单晶中的大量价键电子都被紧

紧地束缚在共价键中，不能自由移动，即不是自由电子，不能导电。

共价键中的电子虽然处于束缚状态，但是这种束缚不是牢不可破的，只要给予电子足够的能量，它就能冲破束缚，成为能够导电的自由电子。

价键电子冲破束缚所需的能量从哪里来呢？

可以从外界供给的能量中获得。例如在常温下，晶体中的原子并不是静止的，它从外界获得热能就要作热运动。价键电子可以从原子的热运动中得到能量，挣脱束缚状态而激发成自由的状态，成为能导电的自由电子。所以在常温下，就有一定数目的价键电子激发成为能导电的自由电子，使得硅、锗这种共价晶体能够导电。价键电子激发成为自由电子的过程称为本征激发。

但是，以上分析，只说明了本征激发的一个方面，即自由电子的产生。本征激发还有它的另一方面，一个价键电子挣脱束缚成为自由电子后，在价键中就缺少一个价键电子，而留下一个空位，这个空位称为“空穴”。这即是说，由于本征激发，电子和空穴是成对产生的。图 1-1 是本征硅中，由于激发产生电子、空穴的示意图。

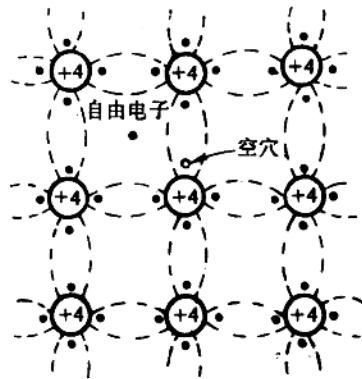


图 1-1 本征激发示意图

由图 1-1 可见，每个硅原子是电中性的，因此整块硅晶体也是电中性的。不仅如此，就是在共价键完整的硅原子附近，也是电中性的。但在空穴所在的地方，由于失去了一个带负电的价键电子，因而破坏了局部电中性，出现了未被抵消的正电荷，我们就把这个正电荷看成是空穴所具有的。一个空穴所带的正电荷量刚好与一个电子的电荷量相等。即自由电子带单位负电荷，空穴带单位正电荷。

其次，空穴可以在晶体内自由移动。图 1-2 表示起初在 A 处有一个空穴，因为有了空位，所以 A 处附近的价键电子就有了活动的余地，可以较容易地过来填补这个空位。例如从 B 处

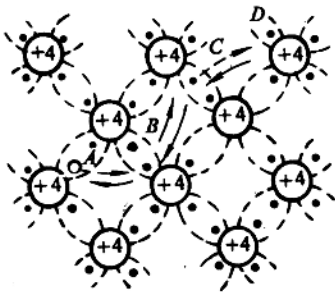


图 1-2 空穴的运动

跑一个价电子到 A 处，使 A 处的价键被填满，但在 B 处却留下一个空位。因此，价键电子从 B 处到 A 处的运动(用实线表示)，就相当于空穴从 A 处向 B 处运动(用虚线箭头表示)。同样，从 C 处跑一个价电子到 B 处，再从 D 处跑一个价电子到 C 处，也就相当于空穴从 B 处跑到 C 处，再跑到 D 处……。

空穴的运动可以看成是电子的反方向运动，不过这种电子不是自由电子，而是共价键当中的价键电子。今后讨论问题时，我们不说价键电子在共价键中作“递补式”运动，而是说带正电荷的空穴在运动。

在没有外电场时，晶体内虽然由于本征激发会成对地产生电子与空穴，电子与空穴都



能在晶体内自由运动，但其运动只是无规则的热运动，不能够形成电流。

在外加电场的作用下，晶体中的电子和空穴除了作不规则的热运动外，还要作有规则的定向运动。由于电子带负电荷，空穴带正电荷，电子或空穴的定向运动就构成了电荷的定向运动，因而形成了电流。因为电子和空穴能够运载电荷作定向运动形成电流，所以电子和空穴都称为载流子。

可见，半导体中除了有电子的导电作用外，还有一种空穴的导电作用，这正是半导体和金属的最大差异。在金属中只有自由电子一种载流子，而在半导体中却有自由电子和空穴两种载流子。

在本征激发过程中，自由电子和空穴成对地产生。但自由电子与空穴相遇时，可以放出多余能量而回到这个空位上。即是说，两者复合而成对消失。因此，本征激发成对地产生电子和空穴，复合却成对地消失电子和空穴。产生与复合这一对矛盾的对立统一，使半导体在一定温度下，维持一定数目的自由电子和空穴，从而达到动态平衡。这时虽然仍不间断地存在着产生与复合，但产生多少，同时也复合多少，所以自由电子和空穴的浓度是不变的。

当温度升高时，热运动加剧，于是热激发的作用增强，产生超过复合，破坏了原来的平衡，因而自由电子和空穴的浓度增加。由于浓度增加，它们相遇而复合的机会随之增加。当浓度增加到某个数值时，复合又同产生相抵消，从而在新的基础上达到新的平衡，所以载流子浓度随温度上升而迅速增加。

在室温(27℃)时，硅的本征载流子浓度为 $1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ，而锗的本征载流子浓度是 $2.3 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ ，后者比前者大1000多倍。对硅来说，温度每升高8℃左右，本征载流子浓度增加一倍；而锗温度每升高12℃左右，本征载流子浓度增加一倍。

### 三、杂质半导体

制作晶体管的材料，大都是在高纯度的单晶硅或锗中掺入少量杂质的半导体，称为杂质半导体。杂质半导体的导电能力，往往不是取决于本征激发所产生的载流子，而是决定于半导体材料中掺杂的多少及杂质的性质。

#### 1. N型半导体

在纯净的锗、硅晶体中掺入少量的五价元素，如磷(P)、砷(As)、锑(Sb)就得到N型半导体。五价元素的共同特点是在原子结构中，最外层的电子(价电子)都是五个。下面以在硅中掺入少量的磷为例来说明。

磷原子掺入硅晶体之后，它要抢占一个原来硅原子所占据的位置，磷原子拿出它的五个价电子中的四个与相邻的四个硅原子组成共价键，但还多出一个价电子，如图1-3(a)所示。这个多余的电子虽然没有被束缚在共价键里，但仍受到磷原子核的正电荷的吸引，不过这种吸引作用比共价键的束缚作用弱得多。在室温下，这个电子便能挣脱这种束缚而转变为自由电子。磷原子由于失去一个价电子而成为带正电荷的磷离子，在图1-3(b)中以 $P^+$ 表示。

五价杂质在硅、锗中能够很容易地施放出电子，所以叫做施主杂质。已施放出一个电子后的施主，叫做施主离子，带正电荷。在室温下，施主杂质差不多全部成为施主离子。

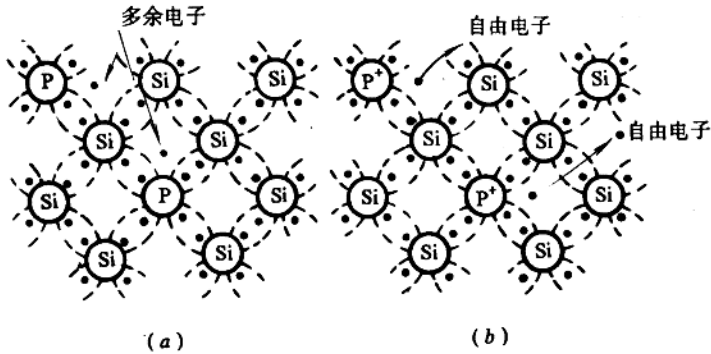


图 1-3 在硅中掺入磷原子

在杂质半导体中，虽然杂质电离和本征激发是同时存在的，但是当杂质浓度超过本征载流子浓度时，杂质电离所产生的载流子就是主要的，由它决定着杂质半导体的导电性能。例如在硅中掺入浓度为 $10^{15}/\text{cm}^3$ 的磷，在室温时，由于杂质几乎全部电离，就会施放出浓度为 $10^{15}/\text{cm}^3$ 的自由电子，它比硅在室温时本征激发所产生的自由电子和空穴的浓度要大好几万倍。所以自由电子基本上来自杂质的电离。

杂质电离与本征激发不同，它不是成对地产生自由电子和空穴。施主杂质电离产生一个自由电子和一个正离子，该正离子只能在原来位置附近作热运动，而不能在整个晶体中自由移动，所以不能参加导电。因而在纯净半导体中掺入施主杂质后，自由电子和空穴的浓度是不相等的，且自由电子的浓度远远超过了空穴的浓度。因此 N 型半导体的导电性能基本上可看成是由自由电子所决定的。

通常把 N 型半导体中的自由电子称为多数载流子，空穴称为少数载流子。反过来说，凡是多数载流子为电子，少数载流子为空穴的半导体，就称为 N 型半导体或电子型半导体。

当温度改变时，多数载流子的浓度基本不变(因为多数载流子浓度由掺杂决定)，而少数载流子浓度却要发生明显的变化(由本征激发产生)。

## 2. P 型半导体

在纯净的锗、硅晶体中掺入少量的三价元素如硼(B)、铝(Al)、镓(Ga)、铟(In)等，就得到 P 型半导体。下面以硅中掺入硼为例讨论。

当硼掺入硅中之后，由于硼只有三个价电子，它同四个相邻的硅原子共价结合时还缺少一个电子，所以要从别处硅原子的共价键中夺取一个电子来填补，如图 1-4(a)所示。这样就在硅中产生一个空穴，硼原子则由于接受一个电子而变成带负电的硼离子，在图 1-4(b)中以 $B^-$ 表示。

三价的杂质在硅、锗中能接受电子而产生空穴，所以叫做受主杂质。接受了一个电子后的受主带负电，叫受主离子。

带负电的硼离子同带正电的空穴之间有吸引力的作用，所以这个空穴暂时还受到一些束缚，只能在硼离子附近活动。但是如果给它一些能量(常温即可)，便能挣脱束缚，那

么这个空穴就能自由运动，参加导电。

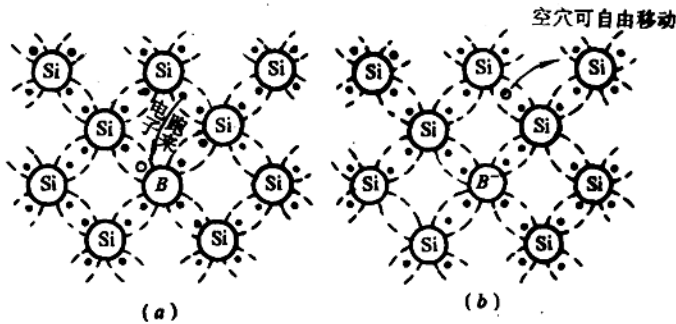


图 1-4 硅中掺硼产生空穴示意图

与 N 型半导体类似，在 P 型半导体中也存在着数量上悬殊很大的两种不同性质的载流子。不过在 P 型半导体中多数载流子是空穴，少数载流子是自由电子。多数载流子是空穴的半导体称为空穴型半导体或 P 型半导体。

在 P 型半导体中，同样是多数载流子浓度主要取决于所掺受主杂质的浓度，而少数载流子电子浓度与温度有关。

## § 1-2 晶体二极管

晶体二极管是电子设备中基本元件之一，其用途十分广泛，在整流、检波、限幅、开关等方面均得到应用。为了在电路中正确地运用晶体二极管，有必要认真地分析一下晶体二极管的结构、原理和特性。

### 一、PN 结及其单向导电性

假设在一块半导体内有一部分是 N 型，有一部分是 P 型。N 型半导体中有能自由运动的多数载流子——电子，少数载流子——空穴及不能自由运动的带正电荷的施主离子。P 型半导体中有能自由运动的多数载流子空穴和少数载流子电子及不能自由运动的带负电荷的受主离子。为分析方便起见，我们暂不考虑本征激发产生的载流子，因为它们的浓度比之杂质电离产生的载流子浓度要少得多，以上讨论情况将形象地用图 1-5 表示。

在 N 型区域里，电子很多；而在 P 型区域里却正好相反，有很多空穴，因而，在 P 型和 N 型两个区域中，存在着电子浓度和空穴浓度的差别。联系到日常生活中的扩散现象，例如在一杯清水中滴入几滴墨汁，墨汁便从滴入处向周围扩散，结果使整杯水变黑。可见，扩散是由浓度差引起的，而且其规律是由浓度大的地方向浓度小的地方扩散。扩散的趋势是使墨汁浓度在整杯水中均匀一致。与此类似，图 1-5 中，电子和空穴也会因浓

度差而向对方扩散。即有一部分电子要从 N 区扩散进入 P 区，相反也有一部分空穴要从 P 区扩散进入 N 区，图中用箭头表示。

扩散时，首先在 P 区和 N 区的交界面附近，N 区电子要与 P 区空穴复合，而在 N 区留下带正电荷的施主离子，P 区留下带负电荷的受主离子，如图 1-6 所示。这些不能移动的正、负离子称为空间电荷。因而，由于扩散就在 P 区和 N 区交界面的两侧出现了一个空间电荷区，空间电荷区不是电中性的，一边带正电荷，另一边带负电荷。因而在空间电荷区存在一个电场，它的方向是由 N 区指向 P 区。在空间电荷区以外的 P 区和 N 区中，由于载流子和杂质离子所带的电荷大小相等，符号相反，所以仍然是电中性的。



图 1-5 P 型与 N 型区多数载流子与杂质离子

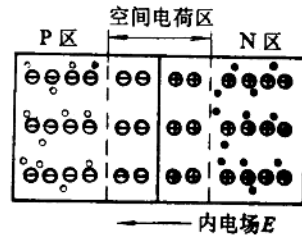


图 1-6 空间电荷区的形成

空间电荷区的电场会对电子和空穴的扩散起阻碍作用。因为电子和空穴进入空间电荷区后要受到电场的作用力，电子带负电，所受作用力方向与电场方向相反，这个电场要将电子拉回到 N 区，空穴带正电，受力方向与电场方向相同，所以空穴也要被推回 P 区。电场力对载流子的这种作用称为漂移作用。漂移作用与扩散作用是互相对立的，扩散作用使电子从 N 区向 P 区移动，空穴从 P 区向 N 区移动，与之相反，漂移作用则使电子回到 N 区，空穴回到 P 区。

随着扩散到对方的电子和空穴的数目增加，空间电荷区也逐渐变宽，电场的漂移作用就逐渐增强。最后漂移与扩散达到动态平衡，P 区和 N 区的载流子浓度不再发生变化。

由此可见，在 P 型和 N 型半导体交界面处，存在着一个特殊的空间电荷区，这个区域就称为 PN 结或耗尽层、阻挡层。

其所以将空间电荷区称为耗尽层，其意在于，在这个区域内电子和空穴的数目都很少，基本上已消耗尽了；其所以称为阻挡层，因为它阻止载流子扩散。

PN 结的主要特性是单向导电性，即在 P 区加正电压，N 区加负电压，从而削弱内电场，耗尽层变窄，扩散大于漂移，便由多子形成较大电流，称 PN 结导通。相反，当 P 区加负电压，N 区加正电压，内电场增强，耗尽层变宽，漂移大于扩散，由少子形成很小的反向电流。

用作二极管或三极管的 PN 结，P 区和 N 区往往所掺杂浓度不同，若 P 区所掺杂浓度高时称  $P^+N$  结， $P^+N$  结正偏导通时，其电流主要由  $P^+$  区的多子空穴形成。反之称  $N^+P$  结，正向导通电流主要由  $N^+$  区的电子形成。

## 二、晶体二极管的结构、符号及伏安特性

### 1. 结构、符号及单向导电性

将一个PN结封装在管壳内，并引出电极引线，就构成晶体二极管。常见的晶体二极管外形如图1-7(a)所示。

晶体二极管常用图1-7(b)所示符号来表示。符号中箭头一端代表P型区域，而短线一端代表N型区域，因正向电流从P型区域流入，故将对应电极称为正极，相应N型区域对应电极称为负极。

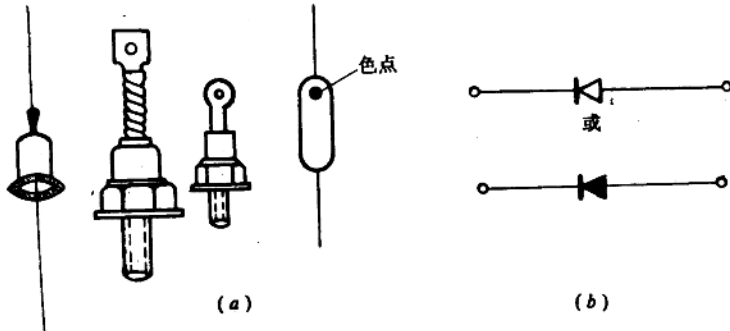


图1-7 二极管外形及符号  
(a) 外形; (b) 符号

现在我们做个简单实验，将二极管的正极接电池正极，二极管的负极经灯泡接电池负极，如图1-8(a)所示，结果灯亮，说明有较大电流流过二极管，这种接法我们称为正向连接。

如果把二极管换一个方向，将其负极接电池正极，二极管的正极经灯泡与电池负极连接，如图1-8(b)所示，结果灯不亮，说明电流不能流过二极管，我们把这种连接方式称为反向连接。

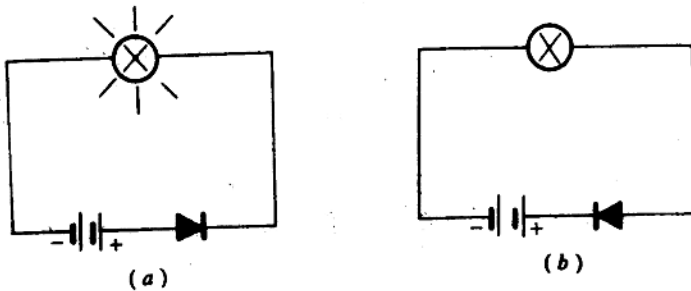


图1-8 实验电路  
(a) 正向连接时灯亮; (b) 反向连接时灯不亮

通过实验可以看出，二极管具有与PN结类似的特性——单向导电性。这即是说，二极管正向运用时导通，此时有较大的正向电流流过二极管，二极管反向运用时截止，几乎没有电流流过二极管。

不仅单向导电性，晶体二极管的一切特性都与PN结特性密切相关。其所以这样，是因为晶体二极管的核心是一个PN结。这里我们要强调指出，PN结的原理及特性，不但构造晶体二极管及研究晶体二极管的基础，也是构造和研究晶体三极管，场效应管和线性集成电路的重要基础，必须切实掌握好。

## 2. 晶体二极管的伏安特性

为了深入了解二极管的导电特性，我们仍从实验着手进行研究。

如果把一只硅二极管，按图1-9(a)所示方式连接，可测其正向特性(即正向电压电

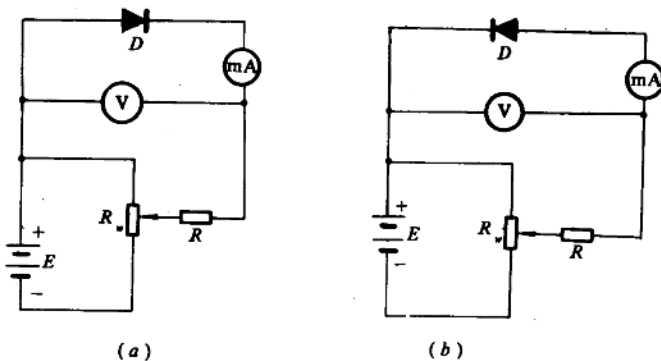


图1-9 二极管特性测试电路  
(a) 测正向特性；(b) 测反向特性

流关系，亦称正向伏安特性)。此时二极管两端加正向电压，调节电位器 $R$ ，改变正向电压的大小，便可得到相应的电流数值。现将测得的数据列于表1-1。

表 1-1

$v_{\text{正}} (V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	/	/
$i (mA)$	0	5	14	35	75	200	/	/
$v_{\text{反}} (V)$	0	10	20	30	40	50	60	/
$i (mA)$	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	5	/

按图1-9(b)所示连接，可以测量反向伏安特性。此时二极管加反向电压，调节 $R$ ，改变反向电压的大小，亦可得到相应的电流数值，这时电流很小，将测得结果也列进表1-1。

将上述实验中，流过二极管的电流与加于其上的电压之间的关系，按表1-1数值逐点画成曲线，如图1-10所示。横坐标表示加于二极管的电压，纵坐标表示流过二极管的

电流。该曲线直观且全面地反映了二极管的电压、电流关系，习惯上称其为伏安特性。

分析图 1-10 所示硅二极管伏安特性曲线，可以得到下面几点结论：

(1) 当二极管所加正向电压较小时电流较小，随着正向电压逐渐升高电流逐渐增加，当电压超过约 0.5 V 时(硅管 0.5 V，锗管约 0.2 V，此电压称为门限电压)正向电流随正向电压的增加变得非常显著。

(2) 当二极管加反向电压时，电流基本上不能通过，即二极管处于“截止”(或阻流)状态。这时流过二极管的电流很小，而且当反向电压增大时，反向电流值几乎不变。此电流常称为“反向饱和电流”用  $I_s$  表示。

(3) 当二极管的反向电压上升到一定值时，二极管的反向电流突然剧增，这种现象称作二极管的“反向击穿”，反向击穿时所对应的电压值称“反向击穿电压”，常用  $BV_D$  表示。本实验中所用二极管的反向击穿电压是 60 V。二极管击穿后，电流猛增，但电压基本不变，此时若对电流限制，则不会损坏二极管，二极管反向击穿特性，可以用来稳压。稳压管正是利用二极管的反向击穿特性制作的专用二极管。

应该指出，对于用不同的半导体材料和不同结构、不同工艺制作的晶体二极管，其伏安特性是有差异的。正向电流随正向电压上升的快慢程度有时差别较大，反向电流和反向击穿电压的大小差别更大，但伏安特性的基本形状是相似的。

另外，晶体二极管的特性还与温度有关。当温度升高时，二极管正向电流和反向电流都会增加。而且随着温度升高，二极管的击穿电压也要发生变化。但在同样温度下，硅二极管要比锗二极管稳定，这是硅管的优点之一。

### 三、晶体二极管的分类和命名

晶体二极管按 PN 结的形式不同可分为点触型和面结型两类。

点触型二极管是由一根金属触丝和一块半导体的表面接触，然后在正方向通过很大的脉冲电流使触丝一端和半导体牢固地熔接在一起，构成 PN 结。如图 1-11 所示。点触型二极管由于金属触丝很细且与半导体接触面很小，所以不能承受很大的正向电流和较高的反向电压。但正因为接触面小，极间电容小，它可用于高频信号的检波、脉冲电路或微小电流的整流。

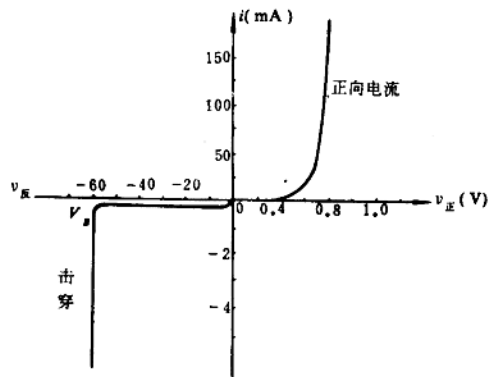


图 1-10 二极管伏安特性

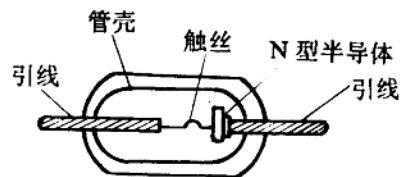


图 1-11 点触型二极管

如 2AP7 是点触型锗二极管，其最大整流电流是 12 mA，最高工作频率是 150 MHz。

面结型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法做成的，结的面积比较大，其结构如图 1-12 所示。面结型二极管由于接触面大，可承受较大的电流，故适用于整流。但正因为接触面积大，极间电容也大，故不适用于高频电路中。如 2CP1 是面结型硅二极管，其最大整流电流为 400 mA，最高工作频率只有 3 kHz。

根据半导体材料的不同，又可分为锗二极管、硅二极管及硒片等；根据用途还可分为整流、检波、开关、稳压和变容二极管等，这里就不一一详述了。

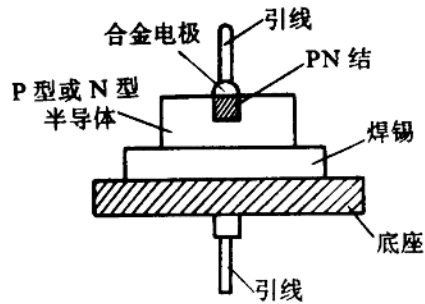
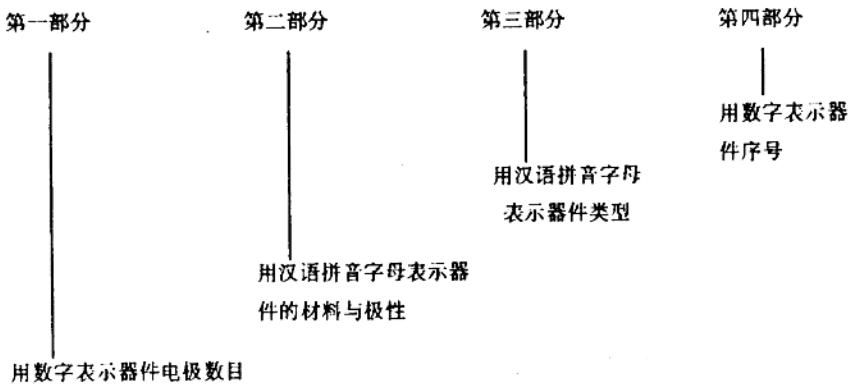


图 1-12 面结型二极管

晶体管的种类繁多，不同的晶体管有不同的表示符号。我国规定晶体管命名方法由四部分组成。



晶体管型号组成部分的符号及其意义，如表 1-2 所示。

例如：硅二极管 2CP10

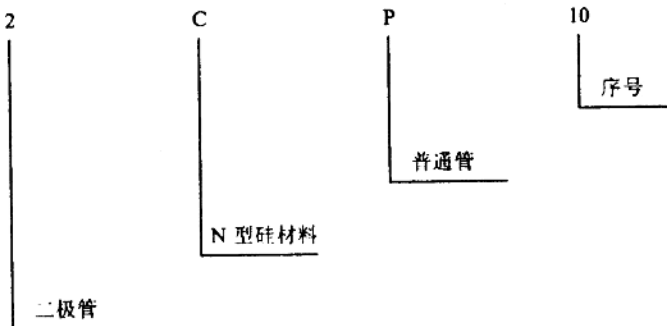




表 1-2

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分
用数字表示 器件电极数		用汉语拼音 字母表示器 件材料和 极性		用汉语拼音 字母表示器 件类型		用数字表示 器件序号
符号	意义	符号	意义	符号	意义	意义
2	二极管		二极管	P	普通管	如果第一、二、三部分符号相同仅第四部分不同，则表示在某些性能参数上有差异。
3	三极管	A	N型锗材料	V	微波管	
		B	P型锗材料	W	稳压管	
		C	N型硅材料	C	参量管	
		D	P型硅材料	Z	整流管	
			三极管	L	整流堆	
		A	PNP型锗材料	S	隧道管	
		B	NPN型锗材料	U	光电管	
		C	PNP型硅材料	K	开关管	
		D	NPN型硅材料	X	低频小功率管	
				G	高频小功率管	
				D	低频大功率管	
				A	高频大功率管	
				T	可控整流器	

又如，晶体三极管 3DG4

