

机电一体化工程专业电工学之二

模拟电子学

赵元康 主编



航空工业出版社

7.1.1.1
1236

机电一体化工程专业电工学之二

模 拟 电 子 学

赵元康 主编

航空工业出版社

1994

(京)新登字161号

2296/27

内 容 提 要

本书系机电一体化工程专业电工学之二,它可作为高等工业院校对电类课程要求较高的非电专业模拟电子技术课程教材,又可作为一般非电专业的教学参考书,还可供电视大学师生、其他业余自学读者及工程技术人员参考。

本书内容包括二极管整流器、基本放大电路分析、阻容耦合多级放大器、放大器中的反馈、正弦振荡器、功率放大器、场效应管放大器、直接耦合放大器、集成运算放大器及其应用以及晶闸管电路。

本书内容丰富,叙述详细,概念阐述清楚,通俗易懂,每章后有小结及较多的思考题及习题,便于自学。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子学 / 赵元康主编. —北京: 航空工业出版社,
1994.5

机电一体化工程专业电工学之二

ISBN 7-80046-782-1

I. 模… II. 赵… III. ①模拟电路-电子技术②电子技术-模拟电路 IV. TN431.1

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第02706号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100092)

煤炭工业出版社印刷厂印刷 全国各地新华书店经售

1994年7月第1版

1994年7月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 18.25 字数: 452千字

印数: 1—5000

定价: 8.70元

前 言

模拟电子学是高等工业院校本科机械工程各专业的一门技术基础课程,本书为原航空航天工业部规划作为该课程的必修教材。

随着电子技术、计算机技术的广泛应用,机械制造自动化、机电一体化迅速发展,机械工程各专业学生不仅应具备较扎实的机械基础知识和应用技能,同时也应具备较全面的电子技术基础知识和应用技能。

本书按照航空专业教材第三委员会1989年10月拟定的该课程基本要求编写,同时也覆盖了国家教委电工学课程指导小组提出的非电专业电子技术课程(模拟部分)的教学基本要求,并略有加深和拓宽,因此也可作为对电类课程要求较高的各非电专业的教材或参考书。

本书采用“管、路结合,管为路用”的原则,将各元、器件分散到各章,结合其电路编写。关于分立器件和集成电路的关系问题,我们认为各种分立器件单元电路都是集成电路的基本组成部分,可以说是它的“细胞”,要正确理解和掌握集成电路的各种应用(不是设计和制造),就必须正确理解和熟练掌握前者,两者不是对立的。基于这种认识,本书对集成电路的理论和应用部分作适当加强,但并不过多削弱分立器件基本单元电路的讲述,以期在集成电路不断翻新、形式层出不穷的情况下,使学生能真正适应形势发展的需要。

本书共十章,北京航空航天大学李郁分、赵元康编写第一章,赵元康编写第二、三、四、六章,郑州航空工业管理学院嵇立成编写第五、七、十章,南京航空航天大学杨文华编写第八、九章,全书由赵元康担任主编。

全书经主审单位北京理工大学刘蕴陶教授和庄效恒副教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见,编者在此谨致以衷心的感谢。

限于编者的水平,书中不妥和错误之处恐在所难免,敬请使用本教材的教师和学生批评指正。

编 者

1994年2月

目 次

第一章 半导体二极管整流电路

1.1 半导体的导电特性	(1)
一、本征半导体的导电机构	(1)
二、N型和P型半导体	(2)
1.2 PN结及其单向导电性	(4)
一、PN结的形成	(4)
二、PN结的单向导电性	(5)
1.3 半导体二极管	(6)
一、二极管的结构	(6)
二、二极管的伏安特性	(7)
三、二极管的主要参数	(8)
1.4 整流电路	(10)
一、单相半波整流电路	(10)
二、单相桥式整流电路	(12)
1.5 滤波器	(15)
一、电容滤波器	(16)
二、CRC滤波器	(19)
三、电感滤波器和LC滤波器	(20)
*1.6 倍压整流电路	(22)
一、二倍压整流电路	(23)
二、多倍压整流电路	(23)
1.7 稳压管及其稳压电路	(24)
一、硅稳压管	(24)
二、硅稳压管稳压电路	(25)
本章小结	(27)
习题及思考题	(28)

第二章 放大电路基础

2.1 晶体三极管	(33)
一、三极管的结构	(33)
二、三极管的放大作用原理	(34)
三、三极管的特性曲线	(37)
四、三极管的主要参数	(40)
2.2 基本交流放大电路	(42)
一、电路结构及各元件作用	(43)

二、放大作用原理及过程	(44)
2.3 放大电路图解分析法	(45)
一、放大电路基本分析方法概述	(45)
二、用近似估算法求静态工作点	(45)
三、图解法	(47)
四、静态工作点的位置与波形非线性失真	(54)
五、图解法小结	(56)
2.4 放大电路微变等效电路分析法	(57)
一、三极管的 h 参数微变等效电路	(57)
二、利用微变等效电路求电压放大数倍	(60)
三、放大电路的输入电阻和输出电阻	(63)
四、微变等效电路法应用举例	(65)
五、微变等效电路法与图解法的比较	(67)
2.5 放大电路静态工作点稳定问题	(67)
一、温度对三极管参数及静态工作点的影响	(68)
二、分压式电流负反馈偏置电路	(69)
2.6 共集电极放大电路——射极输出器	(73)
一、电路构成及静态计算	(73)
二、动态分析	(74)
三、射极输出器的特点和用途	(76)
*2.7 共基极放大电路简介	(77)
本章小结	(78)
习题及思考题	(79)
第三章 频率特性及阻容耦合多级放大电路	
3.1 多级放大电路的组成及级间耦合方式	(85)
一、多级放大电路的组成	(85)
二、级间耦合方式	(85)
3.2 阻容耦合多级放大器分析	(87)
一、静态分析	(87)
二、放大倍数	(88)
三、输入电阻和输出电阻	(89)
3.3 阻容耦合放大器的频率特性	(91)
一、频率特性的一般概念	(91)
二、频率特性分析	(92)
*三、多级放大器的频率特性	(94)
本章小结	(95)
习题及思考题	(96)
第四章 放大电路中的反馈	
4.1 反馈的基本概念	(98)

4.2	反馈放大倍数的一般表达式	(99)
4.3	反馈的分类及判别方法	(100)
	一、正反馈和负反馈	(100)
	二、直流反馈和交流反馈	(102)
	三、电压反馈和电流反馈	(102)
	四、串联反馈和并联反馈	(103)
4.4	反馈的四种组态分析	(105)
	一、电压串联负反馈	(105)
	二、电流串联负反馈	(107)
	三、电压并联负反馈	(108)
	四、电流并联负反馈	(109)
4.5	负反馈对放大器性能的影响	(111)
	一、提高放大倍数的稳定性	(111)
	二、扩展通频带	(112)
	三、减小非线性失真和抑制干扰	(113)
	四、改变输入电阻和输出电阻	(114)
4.6	深负反馈时放大倍数的估算	(117)
*4.7	放大电路中的自激振荡	(121)
	一、附加相移引起的自激振荡	(122)
	二、直流电源内阻引起的自激振荡	(123)
	三、分布电容引起的自激振荡	(124)
	本章小结	(124)
	习题及思考题	(125)
第五章 正弦波振荡电路		
5.1	自激振荡	(129)
	一、自激振荡的条件	(129)
	二、振荡的建立和稳定	(130)
5.2	LC正弦波振荡电路	(131)
	一、变压器反馈式LC振荡器	(131)
	二、三点式振荡器	(132)
	*三、LC振荡器应用举例	(134)
*5.3	石英晶体振荡器	(135)
	一、石英晶体的特性及等效电路	(136)
	二、石英晶体振荡器	(137)
5.4	RC正弦波振荡器	(138)
	本章小结	(141)
	习题及思考题	(142)
第六章 功率放大电路		
6.1	功率放大电路的一般问题	(145)

一、对功率放大器的要求·····	(145)
二、放大电路工作状态的类别·····	(146)
6.2 互补对称功率放大电路·····	(147)
一、OTL互补对称功率放大电路原理·····	(147)
二、OCL互补对称功率放大电路原理·····	(148)
三、最大输出功率和效率计算·····	(148)
四、功放管的选择·····	(150)
五、交越失真的消除·····	(151)
六、采用复合管的功放电路·····	(152)
七、互补对称功放实际电路·····	(154)
6.3 集成功率放大器·····	(155)
*6.4 变压器耦合推挽功率放大电路·····	(156)
本章小结·····	(159)
习题及思考题·····	(160)
第七章 场效应管放大电路	
7.1 绝缘栅场效应管·····	(161)
一、结构和基本工作原理·····	(161)
二、特性曲线和主要参数·····	(162)
三、MOS场效应管的四种基本类型·····	(165)
*7.2 结型场效应管·····	(166)
一、结型场效应管·····	(166)
二、各种场效应管特性比较·····	(169)
7.3 场效应管放大电路·····	(170)
一、共源放大电路·····	(170)
二、其它场效应管放大电路·····	(174)
本章小结·····	(176)
习题及思考题·····	(176)
第八章 直接耦合放大电路	
8.1 直接耦合放大电路的一般问题·····	(178)
一、级间耦合·····	(178)
二、零点漂移·····	(179)
8.2 典型差动放大电路·····	(181)
一、电路工作原理及静态分析·····	(181)
二、放大作用及动态分析·····	(182)
8.3 带恒流源的差动放大电路·····	(189)
一、恒流源差放电路·····	(189)
二、差动放大电路的四种输入输出方式·····	(192)
8.4 晶体管直流稳压电源·····	(195)
一、串联型稳压电源的原理和基本电路·····	(195)

二、串联型稳压电源的典型电路·····	(196)
*三、开关式稳压电源·····	(197)
8.5 集成稳压电源·····	(198)
本章小结·····	(200)
习题及思考题·····	(201)
第九章 集成运算放大器	
9.1 集成运放的结构、电路及参数·····	(205)
一、集成运放的结构及特点·····	(205)
二、集成运放的内部电路·····	(206)
三、集成运放的主要技术指标·····	(207)
9.2 理想集成运放及其分析要领·····	(208)
一、集成运放的理想化及传输特性·····	(208)
二、运放电路的分析要领·····	(209)
9.3 运放的三种基本运算放大电路·····	(210)
一、反相输入放大电路·····	(210)
二、同相输入放大电路·····	(211)
三、差动输入放大电路·····	(212)
9.4 集成运放在运算方面的应用·····	(214)
一、比例运算·····	(214)
二、求和运算·····	(214)
三、积分和微分运算·····	(215)
四、对数和反对数运算·····	(217)
五、乘法和除法运算——集成模拟乘法器·····	(218)
*六、电子模拟计算机原理·····	(221)
9.5 集成运放在信号处理方面的应用·····	(222)
*一、采样保持器·····	(222)
二、有源滤波器·····	(223)
三、电压比较器·····	(225)
*9.6 集成运放在信号产生方面的应用·····	(228)
一、方波发生器·····	(228)
二、三角波发生器·····	(229)
三、锯齿波发生器·····	(231)
9.7 集成运放在测量方面的应用·····	(231)
一、电压、电流及电阻的测量·····	(231)
*二、数据放大器·····	(233)
*三、温度的测量·····	(234)
本章小结·····	(235)
习题及思考题·····	(235)

第十章 晶闸管及其应用

10.1 晶闸管的工作原理和特性	(242)
一、结构和工作原理	(242)
二、伏安特性和主要参数	(244)
*三、特殊晶闸管	(247)
10.2 可控整流电路	(248)
一、单相半波可控整流电路	(248)
二、单相桥式可控整流电路	(254)
三、晶闸管的保护	(257)
10.3 触发电路	(259)
一、单结晶体管的工作原理与特性	(259)
二、单结晶体管触发电路	(260)
10.4 晶闸管电路的应用	(264)
一、晶闸管无触点开关	(264)
*二、晶闸管逆变器	(264)
三、晶闸管交流调压器	(266)
本章小结	(267)
习题及思考题	(267)

附 录

一、半导体器件型号命名法	(269)
二、几种半导体二极管的参数	(270)
三、几种稳压二极管的参数	(270)
四、几种晶体管的部分参数	(271)
五、几种场效应管参数	(273)
六、集成运放命名法及主要参数	(274)
七、几种晶闸管的参数	(277)
八、单结晶体管参数	(279)
九、CW7800系列三端稳压器主要参数	(279)
十、新旧图形符号及文字代号对照表	(281)

参考文献	(281)
------	-------

注：凡注有*的章节为加深加宽的内容。

第一章 半导体二极管整流电路

在各种电子设备中都需要直流电源供电，除少数为了便于携带采用化学电池作为直流电源外，大多数是采用直流稳压电源将交流电转变为直流电。把交流电变为直流电称为整流。直流稳压电源一般由整流电路、滤波电路及稳压电路等部分组成。

实现整流的关键是单向导电元件，即整流元件。早期整流元件大多用电子管和离子管，现在则广泛使用半导体二极管。本章首先介绍半导体的导电特性和PN结的单向导电原理，这是了解半导体二极管、三极管及其它半导体器件的基础；然后介绍半导体二极管、整流电路、滤波电路、硅稳压管及其稳压电路。

1.1 半导体的导电特性

半导体是一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物体。如硅、锗、硒以及许多种金属氧化物和硫化物等都是半导体。

半导体之所以获得广泛的应用，是由于它的导电性能可以在各种外部条件的影响下发生很大的变化，例如温度、辐射（包括光照）、掺杂等因素都能极大地改变半导体的电阻，人们正是利用这些特性制造出各种不同用途的半导体器件。

利用有些半导体的导电能力随温度升高而大大加强的特性可制成热敏元件；有些半导体受到光照射时，导电能力明显增强、据此制成了光电元件。更为重要的是，如果在纯净的半导体中掺入微量的杂质（与半导体本身元素不同的某种元素）、其导电能力可增加数十万倍，例如纯硅中掺入百分之一的硼元素后，硅的电阻率就从大约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 减小到约为 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 左右，即下降约50万倍。利用这种特性制成了二极管、三极管、晶闸管等不同的半导体器件。

半导体的导电特性是由其内部原子结构、原子与原子之间的结合方式决定的。下面以常用的半导体硅及锗为例来说明半导体的导电原理和特性。

一、本征半导体的导电机构

常用的半导体如硅（Si）和锗（Ge），属于四价元素，其原子的最外层轨道上有四个价电子。硅或锗材料经提纯形成单晶体后，所有原子排列整齐而对称，彼此距离很近，形成一种晶体结构，其平面示意图如图1-1所示。图中以小圆圈并标以“+4”表示除外层价电子而外，硅或锗所有内层电子和原子核结成的整体的合成电荷量。外面用黑圆点表示四个价电子，这些价电子由于处于原子的最外层，受原子核的束缚力较小，它们既受自身原子核中正电荷的吸引作用，又受相邻原子核中正电荷的吸引作用，可以由一个原子转移到相邻原子的轨道上去，成为共有的价电子。每两个相邻原子之间都共有一对价电子，这对价电子同时受到两个相邻原子的原子核的吸引作用而将此两相邻原子束缚在一起。这种束缚作用称为共价键。在图1-1中将共价键形象地表示为套住两个价电子的虚线环。每个原子通过共价键与邻

近四个原子结合在一起，形成整齐的点阵排列，即晶体结构，所以半导体又称晶体。纯净的、具有晶体结构的半导体就叫本征半导体。

当温度为绝对零度（ -273.15°C ）时，价电子无力挣脱共价键的束缚，半导体相当于绝缘体。如果使价电子获得一定的能量，例如升高温度至室温（或光照），则有些价电子就会挣脱共价键的束缚跑出来成为自由电子；与此同时，在原共价键失去电子的地方，便留下一个空位，叫做空穴，如图1-2所示。空穴是失去了带负电的价电子而形成的，原子失去电子后便形成带正电的离子，所以可以认为空穴带正电。在本征半导体中，有一个自由电子，就有一个空穴，它们成对产生，称为电子空穴对。由于温度使本征半导体产生电子空穴对的现象称为热激发或本征激发，温度升高，电子和空穴的浓度将增加。

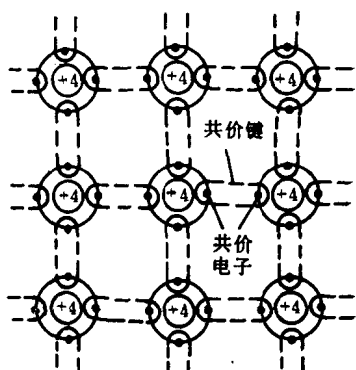


图 1-1 硅或锗晶体共价键结构的平面示意图

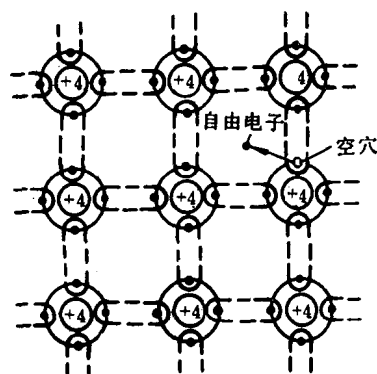


图 1-2 硅或锗晶体中的自由电子和空穴

当有外电场作用时，自由电子将逆着电场方向作定向运动而形成电流，这叫电子导电。同时，由于空穴带正电，具有吸引电子的作用，邻近共价键中的价电子在外电场作用下就可前来填补，使邻近共价键中出现新的空穴。此新出现的空穴又可被其邻近的价电子过来填补。这样就形成了（束缚于共价键中的）价电子连续填补的定向运动，如图1-3中1、2、3处的情形所示。这种价电子的填补运动也形成电流，它不同于自由电子的导电而是由空穴的存在所引起，而且价电子始终在共价键中移动。为与自由电子导电相区别，可把价电子的填补运动看作是空穴沿着相反的方向（即与外电场方向相同）移动，这种形成电流的方式称为空穴导电。

由上可知，半导体中存在着自由电子和空穴两种导电机构。自由电子是带负电的粒子，空穴则可看作是带正电的粒子，它们都能定向移动而形成电流，所以都叫做载流子。在外电场作用下，室温下的本征半导体会产生电流，其电流为电子电流和空穴电流之和。因为本征激发的电子空穴对数量很少，所以其导电能力很低。

在半导体中，当自由电子与空穴相遇时，便填补了空穴，两者同时消失，这种现象称为复合。自由电子与空穴不断地复合，同时热激发又不断地产生电子空穴对。激发和复合处于动态平衡状态，在一定的温度下，电子和空穴的数目基本一定。

二、N型和P型半导体

如果在半导体中掺入少量杂质，可显著地增加电子及空穴的数量，导电能力明显提高，

这种半导体称为掺杂半导体，它有广泛的用途。按掺入杂质元素类型不同，可得到两种导电类型的半导体：N型和P型半导体。

1. N型半导体

在纯净的硅（或锗）中掺入少量五价元素，例如磷（P），由于掺入量极少，晶体结构基本不变，只是某些位置上的硅原子被磷原子所代替，如图1-4(a)所示。磷原子有五个价电子，一个磷原子与相邻四个硅原子组成共价键时，多余一个电子不在共价键中，由于受到的束缚力较弱而成了自由电子。一个磷原子就给出一个自由电子，这使半导体中自由电子的数量剧增。与此同时，由于热激发而产生的电子空穴对仍然存在，因此，在这种半导体中仍然存在着两种载流子，自由电子占绝大多数，故称为多数载流子，简称多子；空穴数量很少^①，叫少数载流子，简称少子。磷原子失去一个电子后成为正离子，不能自由移动，故不能参与导电。这种半导体主要依靠带负电的电子导电，所以叫做电子型半导体，或N型半导体。图1-4(b)为N型半导体的结构示意图，图中未画出正离子，只表示出多子和少子。注意，整个N型半导体呈电中性，并非带负电。

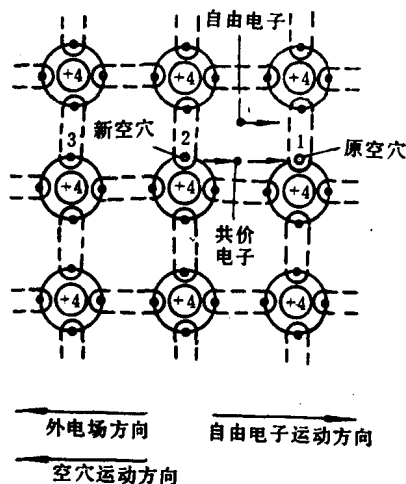
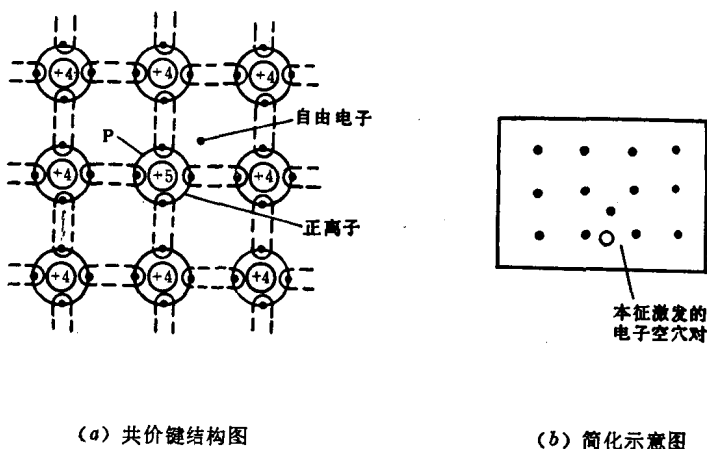


图 1-3 电子和空穴的导电



(a) 共价键结构图

(b) 简化示意图

图 1-4 N型半导体

2. P型半导体

在纯净的硅（或锗）晶体中，掺入少量三价元素，例如硼（B），则晶体排列如图1-5(a)所示。硼原子只有三个价电子，所以，每个硼原子在与相邻四个硅原子组成共价键时，有一个共价键缺少一个电子而形成空位，邻近硅原子共价键中的价电子很容易被吸入填补这个空位，从而在该共价键中形成一个空穴，而硼原子则由于吸收一个电子而成为负离子

^① 由于复合机会增多，所以比本征激发所产生的空穴还要少。

子。这样，由于掺入硼而使空穴的数量剧增，空穴成为多子，电子为少子。导电主要依靠空穴，所以这种半导体叫做空穴型半导体，或P型半导体。P型半导体的结构示意图如图1-5(b)所示，图中只画出多子空穴和少子电子，而未画出不能参与导电的负离子。同样，P型半导体在电上也呈中性，并非带正电。

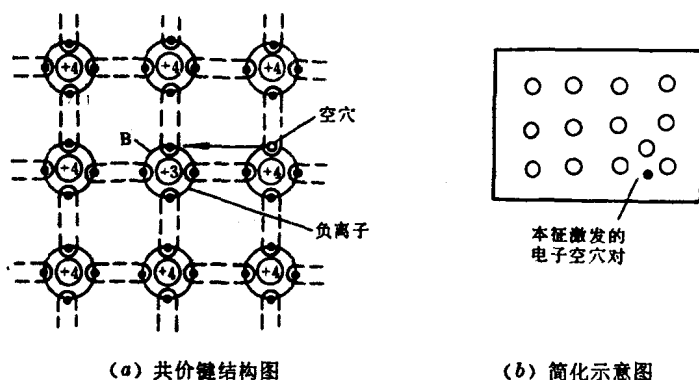


图 1-5 P型半导体

【思考题】

1-1-1. 空穴导电既然是由电子填补空穴而形成，那么，空穴导电和电子导电究竟有何实质性区别？

1-1-2. N型半导体中的自由电子多于空穴，P型半导体中空穴多于电子，是否N型半导体带负电，而P型半导体带正电？

1.2 PN结及其单向导电性

单一的P型或N型半导体并无多大用处。如在一块半导体的两边，采取一定的掺杂工艺措施，在两边分别形成P型和N型半导体，则在其交界面上就形成PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础，二极管、三极管和晶闸管就分别由一个、两个和三个PN结所组成，了解PN结的性质对掌握半导体器件的原理是非常重要的。

一、PN结的形成

图1-6(a)表示一块晶片，两边分别形成了P型和N型半导体。图中只分别画出两边的多子和少子，只要有一个载流子存在，就必然伴随有一个正的或负的离子。为清楚起见，图中未表示出离子，离子是不参与导电的。

由于P区空穴浓度大，而N区空穴浓度小，因此空穴要从浓度大的P区向浓度小的N区扩散。同理，N区的电子要向P区扩散。于是在交界面附近就形成多子的扩散运动，如图1-6(a)中的箭头所示。扩散的结果，在交界面附近，P区由于失去空穴，得到电子而留下带负电的三价杂质离子；N区一侧由于失去电子，得到空穴而留下带正电的五价杂质离子。这样，在交界面两侧就形成了正的和负的空间电荷区，如图1-6(b)所示，这个空间电荷区就是PN结。

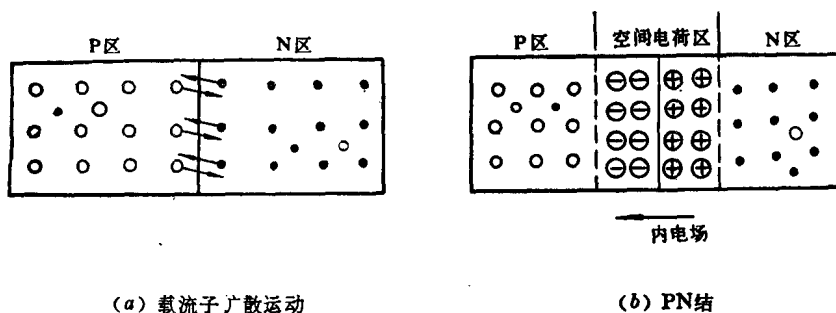


图 1-6 PN结的形成

形成空间电荷区中的电荷——正、负离子不能移动,不参与导电。在空间电荷区内,载流子极少,所以电阻率很高。此外,这区域内的多子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,所以空间电荷区也称为耗尽层。

在PN结处,由于正负空间电荷的存在,形成了一个电场,称为内电场或自建电场,其方向为由带正电的N区指向带负电的P区,如图1-6(b)所示。电场的形成将对由P区向N区扩散的空穴和由N区向P区扩散的电子产生阻力,即内电场对多子的扩散运动起阻挡作用,所以空间电荷区又称为阻挡层或壁垒层。只有极少量能量很高的多子能克服此阻力继续扩散。

与上述情况相反,内电场的存在却有利于少子的运动。P区的自由电子和N区的空穴可借助内电场力的推动作用,越过空间电荷区,进入对方。这种少子在内电场作用下有规则的运动称为漂移运动。

扩散运动和漂移运动的方向相反,既互相联系,又互相矛盾。开始,内电场未建立时,只有多子的扩散运动。随着内电场的逐步建立和加强,扩散运动受到越来越强的阻力,扩散运动逐渐减弱,而少子的漂移运动是靠电场力推动的,一开始没有,然后由弱变强。先是扩散运动占优势,后来只有极少的多数载流子能够扩散,其数量与作漂移运动的少子(本来数量就极少)达到平衡,这是一种动态的平衡,P区的多子空穴向右扩散的数量与N区的少子空穴向左漂移的数量相等;对自由电子而言也是这样。达到平衡后,没有净电流流过PN结,空间电荷区的宽度稳定下来,PN结就处于相对稳定的状态。

二、PN结的单向导电性

上面讨论的是PN结在没有外加电压时的情况,这时,由多子形成的扩散电流和少子形成的漂移电流大小相等而方向相反,所以通过PN结的净电流为零。下面讨论加上外部电压的情况。

1. 外加正向电压(正向偏置)

如图1-7所示,电源 E 通过电阻 R 在PN结两端加上外电压 U ,P区接电源正端,N区接电源负端,这种情况称为加正向电压,或正向偏置(简称正偏)。

此时,外电场与内电场方向相反。在外电场作用下,P区的空穴进入空间电荷区,与部分负离子中和,抵消一部分负空间电荷;同时,N区的电子进入空间电荷区,与部分正离子

中和，使空间正电荷减少。最终结果是使空间电荷区变窄，因而内电场减弱，多数载流子的扩散运动增强，扩散电流远大于漂移电流，于是 PN 结中就有较大的从 P 区流向 N 区的扩散电流流过，叫做正向电流。在一定范围内，外电场愈强，正向电流愈大，这时 PN 结呈现的电阻很低。外电源不断向半导体提供电荷，使电流得以维持。此时的 PN 结在正向电压作用下呈导通状态。

2. 外加反向电压（反向偏置）

如图 1-8 所示，将电源极性反接，使 P 区接负极性端，N 区接正极，这种接法称为加反向电压，或反向偏置（简称反偏）。

此时，外加电场与内电场方向一致。在此外电场作用下，P 区的空穴左移，使负空间电荷增加；N 区的电子右移，使正空间电荷增加。结果，使空间电荷区变宽，内电场增强，P

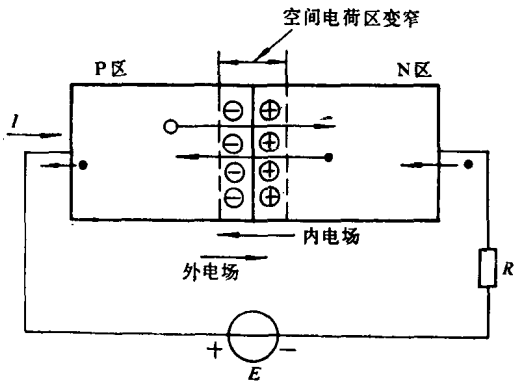


图 1-7 PN 结外加正向电压

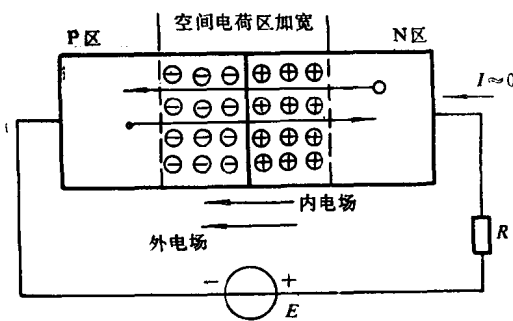


图 1-8 PN 结外加反向电压

区的多子空穴和 N 区的多子电子就更难越过 PN 结，扩散运动减弱。反过来，由于内电场的增强，使少子的漂移运动得到加强，使漂移电流大于扩散电流，形成了由 N 区向 P 区流动的电流，称为反向电流。

由于少子的数量很少，所以反向电流很小，即 PN 结呈现的反向电阻很高，可以认为反向偏置的 PN 结基本上是不导电的，呈截止状态。又因为少子是由本征激发（热激发）而产生的，环境温度愈高，少子的数量愈多，所以温度对反向电流的影响很大。

由以上分析可知，PN 结具有单向导电性。即 PN 结正向偏置时，呈现低阻，正向电流较大常称为正向导通，反向偏置时，呈现高阻，反向电流很小，常可忽略，称为反向截止。

〔思考题〕

1-2-1 空间电荷区里有许多正的和负的空间电荷，为什么还会呈现出很高的电阻率？

1.3 半导体二极管

一、二极管的结构

把一个 PN 结的两端接上电极引线，外面用金属（或玻璃、塑料）管壳封闭起来，便构

成二极管。从PN结的P端引出的电极叫阳极，从N端引出的电极叫阴极。

二极管有点接触型和面接触型两类。点接触型二极管的结构如图1-9(a)所示，它由一根很细的金属丝（含有三价元素的合金材料，如金镓或金铟合金）和一块半导体（一般为N型锗片）熔接在一起而构成PN结，其特点是PN结面积很小，因而结电容很小，宜于高频小电流情况下工作。因此主要用于高频检波、脉冲电路和小电流整流。面接触型二极管的结构如图1-9(b)所示，一般为硅管，其特点是结面积大，因而允许通过较大的电流（达上千安培），但其结电容也大，只能在较低频率下工作。

图1-9(c)是二极管的表示符号。

二、二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指加在二极管两端的电压和流过管中电流之间的数量关系。可通过实验方法测出。图1-10为典型的硅二极管伏安特性曲线。由图可见，其伏安特性是非线性的，它反映出二极管（即PN结）的单向导电性。下面分三部分来说明。

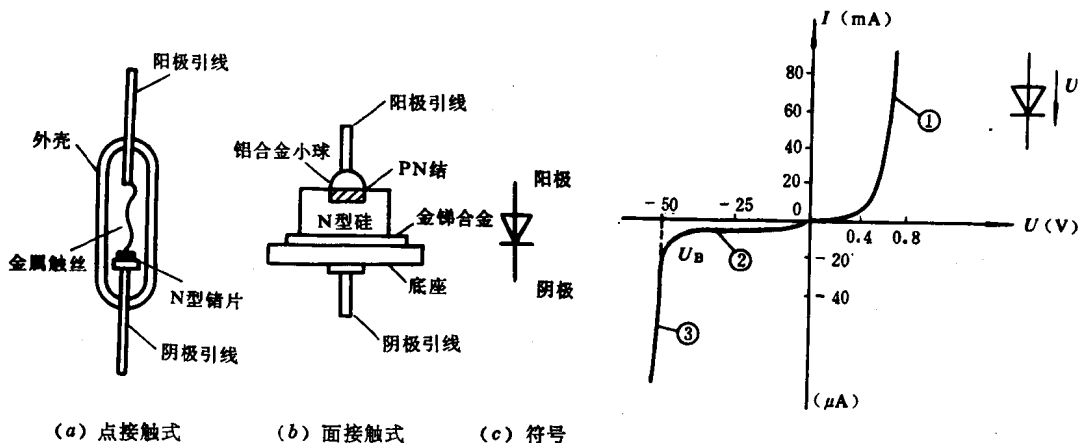


图 1-9 半导体二极管的结构和符号

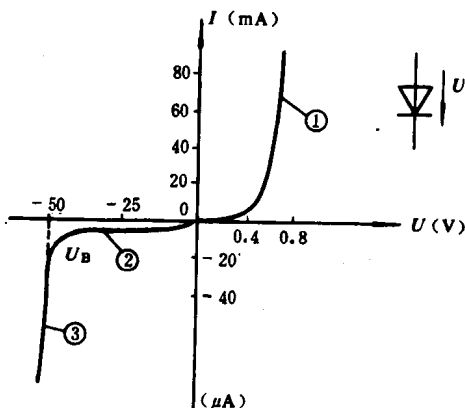


图 1-10 二极管伏安特性曲线

正向特性 图中曲线①部分为正向特性。当正向电压比较小时，外电场较小，不足以克服PN结内电场对多子扩散运动的阻碍作用，故起始的一段电流很小，几乎为零。当正向电压超过一定数值后，电流才显著增长，此时的电压值称为死区电压。硅管的死区电压约为0.5V，锗管约为0.15V。当正向电压超过死区电压以后，PN结内电场被大大削弱，正向电流急剧增长，二极管处于正向导通状态，这时电流可（随负载电阻）在较大范围内变化，而其压降则很小且几乎不变。一般硅管正向压降约为0.6~0.8V，锗管约为0.2~0.3V。

反向特性 图中曲线②部分为反向特性。二极管加反向电压时，由少子的漂移运动，形成很小的反向电流。由于少数子数量很少，加上一定数值的反向电压之后，全部少数子均参与导电，不会再增加，所以，反向电流基本不随反向电压变化而呈饱和态，故又称为反向饱和电流。

当环境温度升高时，反向电流将急剧增加。

反向击穿 如图中曲线③部分所示，当反向电压增加到一定大小 U_B 时，反向电流急剧