

高等学校教材

船舶无线电技术基础

CHUANBO WUXIANDIAN JISHU JICHU

郭有润 主编

李立魁 主审



大连海运学院出版社

内 容 简 介

本书是根据高等学校航海类专业教材编审委员会船舶驾驶专业编审组确定的教材编写规划编写的。主要内容包括：半导体器件的基础知识、各种放大器、正弦波振荡器、频率变换电路、脉冲电路基础和数字逻辑电路等，最后还简要介绍了无线电技术在航海上的应用。书中每章均附有复习思考题和习题。各章开头有内容提要，末了有本章小结。最后还有附录。内容广泛，深入浅出。

本书除作为海洋船舶驾驶专业的教材外，还可供水运管理、水产、航政等各相关专业使用。作为教学参考书，相近专业的中等专业学校也可以有删节地以它作为参考教材。

根据教材编审组的约请，由李立魁担任主审。

船舶无线电技术基础

郭有润 主编

大连海运学院出版社出版（大连凌水桥）

大连海运学院出版社发行 大连海运学院出版社印刷厂印刷

责任编辑：张 娟

封面设计：王 艳

开本：787×1092 1/16

印张：20.5 字数：512千

1990年2月第1版 1990年2月第1次印刷 印数：4200

ISBN 7-5632-0144-0/TN·3

定价：3.65元

前 言

无线电电子技术是二十世纪以来发展最快、应用最广的一门学科。它不但广泛应用于工农业、国防、文化卫生等部门,而且日益成为千千万万人民生活中不可分离的“伴侣”。对于一名船舶驾驶员来说,如果不具备必要的电子技术知识和基本技能,要管理好新型船舶是很困难的。因此,《船舶无线电技术基础》被列为海洋船舶驾驶专业的一门重要的技术基础课。

本书是根据高等航海学校海洋船舶驾驶专业《船舶无线电技术基础》教学大纲及大连、上海两个海运院校分别编写的内部教材试用几年之后,修改出版的。教学时数约100学时。书中主要内容包括:各种电子器件的简单结构和特性;基本放大电路和电路的基本分析方法;各种放大器;正弦波振荡器和调制、检波、变频等基本单元电路;脉冲和数字逻辑电路等。最后,通过对“无线电技术在航海上的应用”的介绍,作为本课程与有关专业课之间的衔接纽带。

鉴于本学科范围十分广泛,新技术层出不穷,但课时数有限,所以教材的内容注重于基本概念、基本原理和基本分析方法的阐述,对于电子器件(包括分立元件与集成电路)的构造、各种实际电路、电路的设计与计算等方面,都只能是“适可而止”。换句话说:本书在叙述“器件”与“电路”两方面的内容时,以“电路”为重点;在进行“定性分析”与“定量分析”时,以“定性分析”为主;在讲分立电路与集成电路的过程中,贯穿着“分立为集成服务”的思想,分析分立电路之后即过渡到集成电路;或者是前面部分以分立电路为主,后面部分以集成电路为主。

实验课是学习本课程不可缺少的教学环节,建议由各校按专业要求自行编写实验指导书。

为了帮助同学复习和巩固,书中列出了适量的复习思考题和习题。每章前后所写的内容提要和小结,可以帮助学生了解各章的学习重点和主要结论。

本书的附录部分,主要是介绍一些电子器件的型号规定和电路图符号等。中英专业名词对照只罗列一些主要名词,以供同学们阅读英文书刊或在工作中阅读英文说明书时参考。

本书虽然是以海洋船舶驾驶专业学生为对象而编写的教材,但还可以作为海上其它专业、水运管理、航政专业以及水产等大中型院校有关专业的参考教材。对业余自学读者也有一定的参考价值。它具有篇幅不多但内容广泛的特点。

本书经高等学校航海类教材编审委员会船舶驾驶专业编审组确定,由大连海运学院航海系郭有润主编,大连和上海海运学院郭有润、杨树新和王素云三位同志具体编写。其中,第一、二、三、四章由王素云执笔;第五、六、七章由杨树新执笔;第八章和附录等由郭有润执笔,最后由郭有润统稿。教材编审组约请上海海运学院李立魁副教授担任本书的主审。在编写期间,蒙航海类教材编审委员会船舶通讯专业编审组组长缪德刚教授和大连海运学院苏殿泉副教授等审阅了部分内容,并提出了宝贵的意见,特此表示感谢!

由于水平所限,本书必然存在许多缺点和不足,恳切希望各位师生和读者给予批评指正。

编 者

1989年1月

本书采用的主要符号

A	放大倍数 (增益)		量, 等等。)
A_f	有反馈时的放大倍数	k	阴极, 负极, 耦合系数
A_v	电压放大倍数	k	千
A_{vf}	有反馈时的电压放大倍数	L	电感器, 电感
a	阳极, 正极	l	长度
B	通频带	M	互感系数
b	基极	M	百万 (兆)
C	电容器, 电容	m	毫米, 分钟
c	集电极	N	绕组匝数
D	半导体二极管	N	电子型半导体
D_z	稳压二极管	n	变压器变比 (匝数比)
d	漏极	P	功率
E	直流电源电压	P	空穴型半导体
e	发射极	p	皮 (10^{-12})
F	反馈系数	Q	静态工作点, LC 回路的品质因数
F	法拉 (电容量的单位)	R	电阻
f	频率	r	交流电阻, 微变电阻
G	电子管	r_i	放大器的输入电阻
g	栅极, 控制极	r_o	放大器的输出电阻
Hz	赫兹 (频率的单位)	s	源极
I^*	电流, 直流电流, 交流分量的有效值, 电流的平均值	T	半导体三极管 (晶体管), 周期, 温度
I_{cbo}	晶体管集-基反向饱和电流	t	时间
I_{ceo}	晶体管穿透电流	Tr	变压器
i^*	电流的瞬时值	V, v^*	电压 (*表示方法同 I, i)
	(* I, i 符号中所附的下标, 表示各种不同的电流值, 例如:	V_f	反馈电压
	I_{cQ} 集电极静态电流	V_i	输入电压
	I_{cM} 集电极最大允许电流	V_o	输出电压
	I_{cs} 集电极饱和电流	W	电位器
	I_m 正弦电流的幅值	X	电抗
	I_{max} 电流最大值	Y	导纳
	I_{min} 电流最小值	Z	阻抗
	i_{cr} 集电极电流中的交流分	α	晶体管共基电流放大系数
		β	晶体管共射电流放大系数

ϵ 电场
 η 效率
 λ 波长
 μ 微 (10^{-6})
 τ 时间常数

φ 相角
 Ω 欧姆 (电阻的单位)
 ω 角频率 (在调制信号中, 低频信号角频率用 Ω)

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	(1)
〔内容提要〕	(1)
1.1 半导体二极管	(1)
1.1.1 本征半导体和杂质半导体	(1)
1.1.2 PN 结	(4)
1.1.3 半导体二极管	(6)
1.1.4 稳压管	(9)
1.2 半导体三极管	(11)
1.2.1 半导体三极管的构成	(11)
1.2.2 三极管的电流分配关系	(12)
1.2.3 三极管的特性曲线和主要参数	(14)
1.2.4 温度对三极管参数的影响	(18)
本章小结	(18)
思考题和习题	(19)
第二章 放大器	(20)
〔内容提要〕	(20)
2.1 放大器的基础知识	(20)
2.1.1 基本放大电路	(21)
2.1.2 放大电路的基本分析方法	(25)
2.1.3 静态工作点的稳定	(37)
2.1.4 多级放大电路	(43)
2.2 放大电路中的反馈	(46)
2.2.1 反馈的基本概念	(46)
2.2.2 负反馈对放大电路性能的影响	(51)
2.2.3 射极输出器	(53)
2.3 直接耦合放大电路和集成运算放大器	(56)
2.3.1 直接耦合放大电路	(56)
2.3.2 集成运算放大器	(63)
2.4 调谐放大器	(69)
2.4.1 LC 并联谐振电路的基本特性	(70)
2.4.2 LC 调谐放大器	(75)
2.4.3 具有集中选择滤波器的放大器	(83)
2.5 功率放大器	(85)

2.5.1 概述	(85)
2.5.2 乙类互补对称式功率放大器	(86)
2.5.3 甲乙类互补对称式功率放大器	(89)
2.6 场效应管及其放大电路	(91)
2.6.1 结型场效应管	(91)
2.6.2 绝缘栅场效应管	(93)
2.6.3 场效应管使用注意事项	(95)
2.7 电子管及其放大电路	(95)
2.7.1 真空二极管和三极管	(96)
2.7.2 五极管和束射四极管	(99)
本章小结	(100)
思考题和习题	(103)

第三章 正弦波振荡器..... (108)

[内容提要]	(108)
--------------	---------

3.1 振荡器的基本原理	(108)
3.1.1 振荡器的基本组成	(108)
3.1.2 维持振荡的条件	(109)
3.1.3 振荡的建立与稳定	(110)
3.2 LC 正弦波振荡器的基本电路	(112)
3.2.1 变压器反馈式振荡电路	(112)
3.2.2 电容反馈式(电容三点式)振荡电路	(114)
3.2.3 电感反馈式(电感三点式)振荡电路	(116)
3.2.4 改进型电容三点式振荡电路	(117)
3.3 石英晶体振荡器	(118)
3.3.1 石英晶体的特性和晶体的等效电路	(118)
3.3.2 石英晶体振荡电路	(119)
本章小结	(122)
思考题和习题	(122)

第四章 频率变换电路和超外差式接收机..... (124)

[内容提要]	(124)
--------------	---------

4.1 概述	(124)
4.1.1 无线电发射系统简介	(124)
4.1.2 无线电接收系统简介	(126)
4.1.3 调幅、变频和检波的一般概念	(127)
4.2 非线性电路的频率变换作用	(130)
4.2.1 线性元件与非线性元件	(130)
4.2.2 频率变换电路的组成原则	(131)

4.2.3 非线性电路频率变换作用的数学分析	(131)
4.3 调幅、变频和检波电路	(132)
4.3.1 调幅电路	(132)
4.3.2 变频电路	(134)
4.3.3 检波电路	(137)
4.4 超外差式调幅接收机概述	(139)
本章小结	(140)
思考题和习题	(141)
第五章 脉冲电路的基本知识	(142)
〔内容提要〕	(142)
5.1 概述	(142)
5.1.1 脉冲的定义	(142)
5.1.2 常见的脉冲波形	(142)
5.1.3 脉冲波的主要参数	(143)
5.1.4 学习脉冲电路时要注意的几个问题	(144)
5.2 晶体管的开关特性	(144)
5.2.1 二极管的开关特性	(144)
5.2.2 三极管的开关特性	(145)
5.2.3 三极管开关电路——反相器	(146)
5.2.4 三极管的开关时间	(146)
5.2.5 加速电容的作用	(147)
5.3 波形变换电路	(148)
5.3.1 微分电路	(148)
5.3.2 积分电路	(149)
5.3.3 限幅电路	(150)
5.3.4 锯齿电压产生器	(153)
本章小结	(156)
思考题和习题	(156)
第六章 数字逻辑电路	(158)
〔内容提要〕	(158)
6.1 概述	(158)
6.2 基本逻辑门电路	(159)
6.2.1 逻辑状态的表示方法	(159)
6.2.2 基本逻辑门电路	(159)
6.3 脉冲单元电路	(167)
6.3.1 双稳态触发器	(168)
6.3.2 单稳态触发器	(175)

6.3.3 施密特触发器	(179)
6.3.4 多谐振荡器	(182)
6.4 集成电路钟控触发器	(186)
6.4.1 钟控 RS 触发器	(186)
6.4.2 T 触发器	(188)
6.4.3 D 触发器	(190)
6.4.4 主从结构的 JK 触发器	(192)
6.4.5 触发器类型的转换	(195)
本章小结	(196)
思考题和习题	(196)
第七章 组合逻辑部件	(200)
[内容提要]	(200)
7.1 计数制和 BCD 编码	(200)
7.1.1 十进制数	(200)
7.1.2 二进制数	(201)
7.1.3 二进制数与十进制数的转换	(201)
7.1.4 二-十进制编码 (BCD 编码)	(203)
7.2 二进制加法器	(204)
7.2.1 二进制数的基本运算	(204)
7.2.2 二进制加法器	(206)
7.3 计数器和分频器	(210)
7.3.1 异步二进制计数器	(210)
7.3.2 异步 BCD 计数器	(212)
7.3.3 分频器	(214)
7.4 寄存器和移位寄存器	(216)
7.4.1 数码寄存器	(216)
7.4.2 移位寄存器	(217)
7.5 译码器	(219)
7.5.1 二进制译码器	(219)
7.5.2 二-十进制译码器	(221)
7.6 数码显示器	(222)
7.7 脉冲数字电路应用举例	(225)
7.8 模数与数模转换器	(227)
7.8.1 模拟与数字转换的基本概念	(227)
7.8.2 数模 (D/A) 转换器	(228)
7.8.3 模数 (A/D) 转换器	(231)
本章小结	(236)
思考题和习题	(236)

第八章 无线电技术在航海上的应用	(238)
[内容提要].....	(238)
8.1 概述	(238)
8.1.1 无线电技术与航海事业的关系	(238)
8.1.2 无线电波及其传播特性	(239)
8.1.3 信号的主要调制方式	(245)
8.2 无线电技术在船舶通信上的应用	(249)
8.2.1 船舶电台的设置	(249)
8.2.2 单边带通信系统	(252)
8.2.3 调频通信系统	(257)
8.2.4 数字通信系统	(260)
8.2.5 卫星通信系统	(263)
8.3 无线电技术在船舶导航上的应用	(269)
8.3.1 无线电测向系统	(269)
8.3.2 雷达导航系统	(274)
8.3.3 双曲线导航系统	(279)
8.3.4 卫星导航系统	(285)
8.3.5 组合导航系统	(290)
本章小结.....	(293)
思考题和习题.....	(293)
附录	(294)
附录一 国产半导体器件型号命名方法.....	(294)
附录二 国产集成电路型号命名方法.....	(296)
附录三 国产电真空器件型号命名方法.....	(298)
附录四 常用电路图符号.....	(301)
附录五 中英专业名词对照.....	(304)
参考文献.....	(314)

第一章 半导体二极管和三极管

〔内 容 提 要〕

半导体二极管和三极管是近代电子设备中应用十分广泛的电子器件。它们和其它无线电元件按一定规律组合起来,构成了各种电子线路,进而制造成包括船用导航与通讯设备在内的各种各样的电子设备。因此,掌握二极管和三极管的特性及其工作原理,是今后学习各种电子线路及航海仪器的基础。

本章首先简要介绍制造半导体器件的材料——本征半导体、P型半导体和N型半导体的结构和电特性;在此基础上,讨论构成半导体管的基础——PN结;然后重点讨论二极管和三极管的外部工作特性——如二极管的伏安特性、三极管的电流分配关系和输入、输出特性等。

1.1 半导体二极管

1.1.1 本征半导体和杂质半导体

大家知道,物质就其导电能力来说可以分为三种:一种称之为电的良导体,如铜、铝、金、银一类;一种则为绝缘体,如玻璃、木头等;还有一种其导电能力介于导体与绝缘体之间,称为半导体。

半导体材料的导电特性不仅仅由自身结构决定,而且与外界条件——如温度、光照或掺入杂质的多少密切相关。因此在电子工业中获得广泛应用。目前在电子工业中应用较多的半导体材料主要有锗和硅两种。

一、本征半导体

高度提纯后,几乎不含杂质的半导体称为本征半导体。

从化学课中我们知道,锗和硅都是四价元素,即原子结构的最外层有四个电子,被称为价电子。它们的原子结构示意图如图1.1.1所示。图中内圈里面的+4是表示除最外层四个价电子外,原子核与内层电子合在一起的部分(常称为惯性核)共带四个正电荷。这样,整个原子是电中性的。

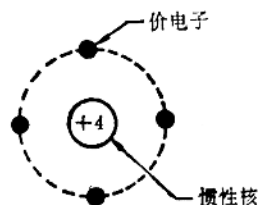


图1.1.1 硅或锗原子结构示意图

当锗或硅半导体材料制成纯单晶体时,它的原子排列就由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态。图1.1.2为硅或锗晶体平面结构示意图。由原子理论知道,原子的外层电子须有八个才能处于稳定状态。现在硅和锗原子只有四个外层电子,因此在组成单晶体时,每个原子都将从四周相邻原子取得四个价电子而形成共价键结构。如图1.1.2所示,四个价电子“手挽手”与相邻四个原子的价电子构成四个共价键。通过共价键,每个价电子不仅受自身原子核的吸引,而且受相邻四个原子的影响,即受到共价

键的约束。

在绝对零度时，价电子没有能力摆脱共价键的束缚，这时的硅和锗是良好的绝缘体。但是在室温条件下，就会有少数价电子由于具有了足够的动能，可以挣脱共价键的羁绊而游离成为自由电子。与此同时，在原来共价键的位置上就留下一个空位，通常称空穴，如图1.1.2中a处所示。

价电子具有一定能量后摆脱共价键束缚成为自由电子的现象，称为热激发，又称本征激发。

显然，由于热激发现象而产生了自由电子（简称电子），同时也出现了等量的空穴。热激发产生的电子和空穴是成对出现的，被称之为电子-空穴对。自由电子是一种带负电、而且能自由移动的粒子，因此是一种载流子，可以参与导电。

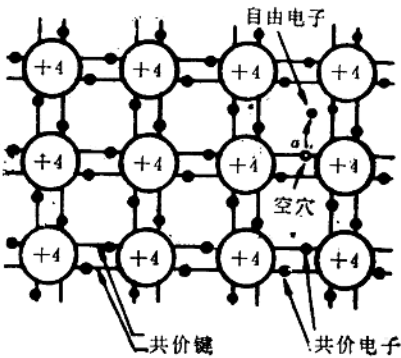


图1.1.2 硅或锗晶体结构示意图（图中o表示空穴）

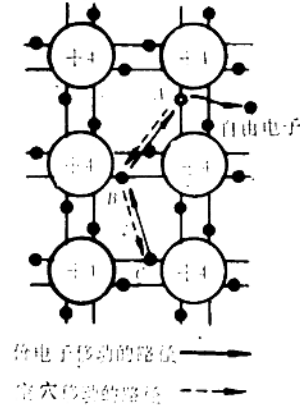


图1.1.3 空穴的移动

那么，空穴呢？

空穴本是价电子跑掉后留下的空位。空穴所在的地方由于失去了一个带负电的价电子，就破坏了局部的电中性，从而使得空穴具有正电荷的性质，而其电量则与电子电量相等。

空穴不仅具有正电荷性质，而且可以在半导体内移动。因为，当某处出现了一个空穴后，它附近的共价电子就有了活动余地，可以很容易地过来填补这个空位子。例如图1.1.3中所示：设A处出现一个空穴后，B处的共价电子便跑到A处空穴位置上，使A处空穴消失，B处却因失去一个价电子而出现一个空穴；如果C处共价电子又跑到B处，则B处空穴消失，而在C处又出现一个空穴。依次推去，于是就形成了这样一种效果：空穴从A处移到B处、又移到了C处。可见，空穴在运动。以上分析也表明：空穴的运动，实质上是共价电子从一处到另一处填补空穴位置的运动。这种运动无论从现象上还是从效果上，都相当于一个带正电荷的粒子——空穴，按照共价电子运动的相反方向在运动。所以，一般称这种共价电子的运动为“空穴运动”，以与自由电子的运动相区别。

空穴既然是带电粒子而且可以运动，因此也是一种载流子。

当半导体在外加电压作用下，自由电子与空穴都将做定向运动，在电路中形成电流。两种载流子都参与导电，这是半导体的一个重要特征。

由此可见，在室温下半导体锗和硅已不再是绝缘体了，但由于室温不高，因热激发而产生的电子-空穴对数量还不多，故其导电能力还不强。

当温度升高时，就会有更多的价电子受热激发而产生电子-空穴对，因此半导体的导电能力与温度密切相关。在一定的温度下，半导体内载流子的浓度是基本稳定的。应当指出，材料不同，在同样温度下，其电子-空穴对数量是不同的。例如，在同样温度下，硅晶体热激发而形成的载流子浓度约为锗晶体的千分之一，这主要是因为价电子挣脱共价键束缚所需要的能量，硅要比锗大得多。

二、杂质半导体

半导体的导电能力不仅与温度有关，更重要的是，在本征半导体中加入少量杂质元素后，其导电能力大增，而且加入不同的杂质元素，将得到不同导电类型的半导体。

(一) N型半导体

将少量的磷元素(P)掺进本征硅(或锗)晶体中。由于磷是五价元素，原子最外层有五个价电子，当磷原子代替硅原子位置时，除了以其四个价电子与周围四个硅原子组成共价键结构外，还多余一个价电子，如图1.1.4(a)所示。该价电子仅受磷原子核吸引而不受共价键的约束，在常温下即可脱离磷原子，游离成为自由电子；在此同时，磷原子失去一个电子成为一个带正电的离子，这是一种杂质电离的过程。在这一过程中，磷原子由于给出一个

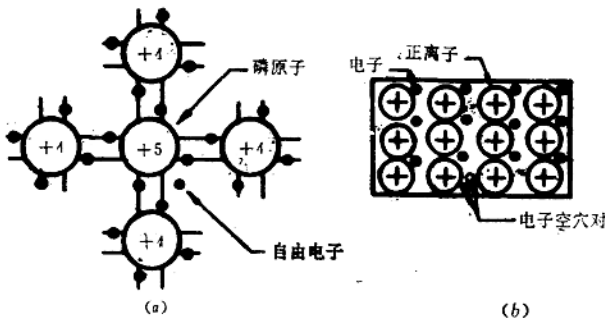


图1.1.4 N型半导体

电子而被称为施主杂质。杂质电离在常温下即可进行。因此，所加入的杂质原子几乎全部电离成为带正电的离子和自由电子。掺入的磷原子越多，产生的自由电子就越多。

当然，与本征硅一样，在其余硅原子中仍存在热激发现象，也将产生少量的电子-空穴对。

通常掺入杂质的数量总是使得杂质电离产生的自由电子数量大大超过热激发产生的电子-空穴对的数量。这样一来，在掺杂了磷的半导体中，自由电子在数量上占优势，而空穴是少数。这里我们称电子为多数载流子(简称多子)，空穴为少数载流子(少子)。由于正离子是由原子核与外围电子所组成，被限制在晶格之中不能移动，故正离子不是载流子。

显然，这种半导体将是以电子导电为主导的，通常称为N型半导体或电子型半导体。我们把N型半导体的物理结构，形象化地表示在图1.1.4(b)中。图中， $\oplus$ 代表正离子，它旁边的“·”代表所施出的自由电子，中性的本征硅原子没有画出。

掺杂了少量磷的硅(或锗)晶体，电子载流子的浓度大大增加，因此其导电能力大增。

(二) P型半导体

如果把少量的硼元素(B)掺入本征硅(或锗)中，则由于三价硼只有三个价电子，当它占据硅原子位置与周围硅原子组成共价键结构时，就少了一个价电子，自然地形成一个空

位，而附近的其它共价键中的电子就很容易跑来填补这个空位。这样一来，硼原子获得了一个电子，使自己带了负电，变为一个不能移动的负离子，同时在附近产生了一个空穴，如图 1.1.5 (a) 所示。硼原子获得一个电子成为负离子，同时产生一个空穴的过程也称为杂质电离。在这里，硼原子获得一个电子，故被称为受主杂质。在常温下，所有掺入的硼原子几乎全部电离，因而在掺入硼的硅或锗晶体中，空穴的数量将大大增加，掺入的硼越多，空穴数

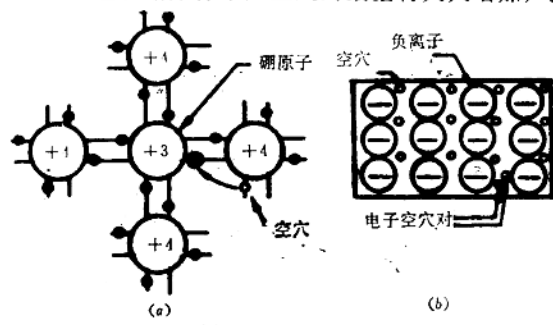


图1.1.5 P型半导体

量也越多。与此同时，也存在着热激发产生的电子-空穴对，其数量相对要少得多。显然，在这样掺杂的半导体中，空穴成为多数，被称为多数载流子；而电子则是少数，成为少数载流子。负离子由于不能移动而不是载流子。

掺入三价硼的半导体以空穴导电为主，称为 P 型半导体或空穴型半导体。其物理模式可以表示为图 1.1.5 (b)，图中， $\ominus$ 代表负离子，“ $\bigcirc$ ”代表空穴。

1.1.2 PN 结

N 型半导体与 P 型半导体由于掺杂而使其导电能力大增，然就其作用来说只不过充当一个电阻元件。可是，如果采取一定措施使一块半导体的一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，那么，在这两种半导体的界面处就会形成一层很薄的结层——PN 结，其导电特性也将发生重大改变。PN 结是构成二极管、三极管等各种半导体器件的基本组成部分。

一、PN 结的形成

如图 1.1.6 (a) 所示，在一块半导体晶片的左边形成 P 型半导体、右边形成 N 型半导体。很明显，左边 P 型区一侧的空穴浓度要远大于右边的，而右边 N 型区一侧的电子浓度远大于左边的。由于界面两边存在着多数载流子的浓度差，所以 P 型区这边的空穴就要向空穴浓度低的 N 型区扩散，而 N 型区的电子也要向 P 型区扩散。这就是在界面附近因载流

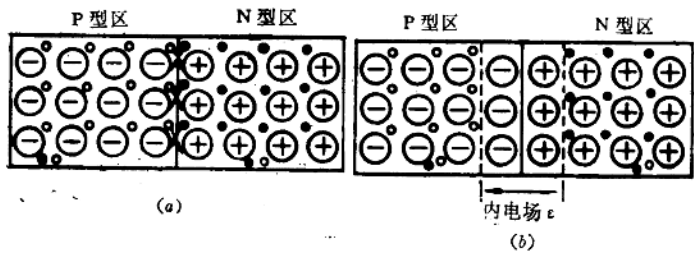


图1.1.6 PN结的形成

子浓度差而引起的载流子扩散运动。结果，交界面左边因失去一部分空穴而留下了负离子，形成带负电的薄层，界面右侧则因失去电子而留下了正离子，形成带正电薄层，如图1.1.6(b)所示。随着扩散运动的进行，交界面左右剩下的离子数增多，带电薄层将加厚。

由于界面左边是负离子薄层，带负电；右边是正离子薄层，带正电。因此界面两边就存在一个电位差，即产生了一个电场，其方向是从N型区指向P型区的。因为这个电场是多数载流子扩散后自己建立起来的，故称为自建电场或内电场。这个电场的方向将阻碍左边空穴继续向右扩散，也阻碍右边电子继续向左扩散。所以内电场对多数载流子的扩散运动是一个阻力。随着扩散的不断进行，内电场将逐渐增强，对扩散作用的阻力也随之加大，使扩散运动越来越弱。与此同时，内电场的方向却有利于两边半导体内少数载流子的运动。使左边P型区内的少子——电子在内电场作用下，向右移动，越过交界面；而右边的少子——空穴则在内电场作用下漂移到左边，形成少数载流子在内电场作用下的漂移运动。

多数载流子的扩散与少数载流子的漂移是交界面处一对矛盾着的运动，它们互相依存又互相制约。开始时，由于浓度差大，扩散运动占优势，随着扩散进行，内电场增强，对扩散阻力加大，使扩散运动变缓；反之漂移运动却愈来愈强，直到多子的扩散与少子的漂移达到动态平衡。这时二者的运动虽仍在进行，但由于方向相反，作用相互抵消，交界面处正负离子数量不再变化，内电场强度也相对稳定。

交界面附近，由不移动的正、负离子所组成的这个区域，称为空间电荷区。这是一个仅有数微米宽的极薄区域。所谓PN结，指的就是这个薄层。由于空间电荷区里存在一个内电场，阻碍扩散运动进行，故又称为阻挡层。又因为在空间电荷区里，载流子数目极少，因此也常称为耗尽层。

二、PN结的导电特性

PN结的最重要特性，就是当外加电压时，呈现单向导电特性。

图1.1.7表示PN结加正向电压时的情况(亦称正向偏置，简称正偏)。据图所示，此时电源正极应接P型区，负极接N型区。显然，外加电压方向与PN结内电场方向相反。在外加电场作用下，P型半导体内的空穴将向右移动进入空间电荷区与负离子中和，使负离子数减少；而N型半导体内的电子将向左移动，进入空间电荷区与正离子中和，正离子数量亦减少。这样一来，PN结内正负离子数减少，空间电荷区变薄，内电场削弱，对多子扩散运动的阻力减小，扩散运动得以增强，形成较大的电流。所以PN结在正向偏置下，呈现较小电阻，处于正向导通状态。

如果PN结加反向电压(反向偏置)，则外加电场与内电场方向一致，如图1.1.8所示。

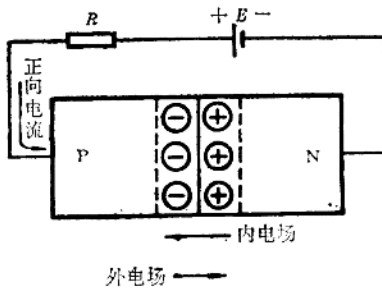


图1.1.7 PN结正向导通

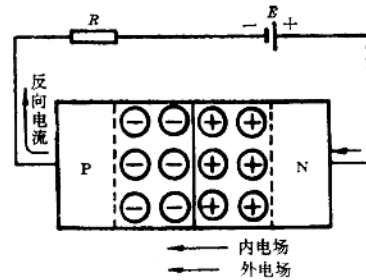


图1.1.8 PN结反偏状态

与正向偏置情况恰好相反，此时空间电荷区内正负离子数增多，结层增厚，对扩散的阻力加大，使扩散难以进行；而各区内少数载流子的漂移运动却大大增强，因此由少子漂移而形成的漂移电流占了优势。于是通过PN结的电流将主要由漂移电流决定，其电流方向与正偏导通时电流方向相反。漂移电流是由少数载流子形成的，数量极少，因此得到的电流远小于正向导通电流，有如阻断了一样，此时，常称PN结为反向截止。

PN结在反向电压作用下产生的反向电流极小，且由于在一定温度下，少数载流子浓度一定，因此反向电流几乎不随外加电压变化而变化，故称反向电流为反向饱和电流。

综上所述，PN结在正向电压作用下导通，呈低阻状态；而在反向电压作用下近乎截止，呈高阻状态。这就是PN结的单向导电特性。

1.1.3 半导体二极管

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。它在电路中的符号如图1.1.9(c)所示，其中A端为正极（接P区）、B端为负极（接N区），箭头方向为二极管正向导通时电流方向。

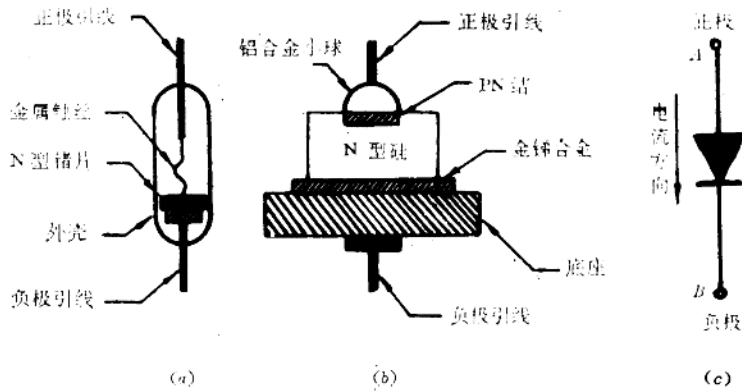


图1.1.9 二极管的外形与符号
(a) 点接触型 (b) 面接触型 (c) 符号

根据制造材料，半导体二极管可分为硅管、锗管两大类，根据结构形式，它们又可分为点接触型和面接触型。点接触型二极管，如图1.1.9 (a)所示，其特点是结面积小，PN结的结电容效应弱*，适用于高频工作，但不能通过较大电流，常用作检波；而面接触型二极管，如图1.1.9 (b)所示，其结面积大，允许通过的正向电流大，常被用作整流使用。

(半导体管的型号命名法见本书附录)

一、半导体二极管的伏安特性

半导体二极管既然是由一个PN结组成的，就必定具有PN结的单向导电特性，这一单向导电特性可用伏安特性曲线具体表达出来。所谓伏安特性，就是管子的两电极间的电压与

* 结电容效应：PN结是一个空间电荷区，当PN结外加电压大小与极性改变时，电荷区正、负离子数量也将随之改变。这种空间电荷的改变也是需要时间的，与平板电容器的充、放电效应完全类同，故称PN结电容效应。

流过它的电流之间的关系曲线。电压的单位为伏特（或毫伏），电流单位为安培（或毫安、微安等）。

图1.1.10为二极管的伏安特性曲线。从图中可以看到，二极管的工作状态大致可分为两个部分。

（一）正向特性部分

1. 在锗管或硅管处于正向偏置时（图1.1.10中①段），可以看到：当正向电压很低时，其正向电流几乎为零，只有正向电压超过某一数值后，电流才开始明显增加，这个电压值称为死区电压或门坎电压。在该区域内，外加电压还不足以克服PN结内电场，多子扩散运动不明显，所以电流很小。硅管死区电压一般约为0.5V左右，而锗管死区电压为0.1V左右。

2. 越过死区电压以后，随着正向电压的增加，正向电流增加较快，表现为曲线陡直上升。而且，当正向电流较大时，正向特性几乎为一条直线，其电压变化量 ΔV_D 与电流变化量 ΔI_D 之比接近一个常数。该常数可用 r_D 表示，即 $r_D = \Delta V_D / \Delta I_D$ 被称为二极管正向交流（动态）电阻。显然，二极管充分导通时，其交流电阻值是很小的。从曲线形状可看出，二极管充分导通后，二极管电流可在较大范围内变化，而两端电压变化量却不大。通常认为，二极管充分导通时，其管压降，硅管为0.7V左右，锗管为0.2~0.3V。

（二）反向特性部分

1. 当二极管两端加反向电压时，其反向电流极小，且在反向电压值小于某一数值前基本不随电压的变化而变化（如图1.1.10中②段所示），称此时的电流为二极管反向饱和电流 I_S 。常温下，小功率硅管的反向饱和电流 I_S 小于0.1 μA ，锗管通常为几十到几百微安之间。

反向电流是由少数载流子形成的，而少数载流子又是热激发的产物，故反向电流的大小与温度有关，通常温度每升高10℃，其反向饱和电流值约增加一倍。

2. 当反向电压升高到一定数值时，其反向电流将会急剧增加，这种现象称为击穿。这是因为外加电场过强时，有可能破坏共价键而把价电子强行拉出，使少数载流子数目骤然上升；强电场也能引起电子高速运动并与原子相撞，产生新的电子-空穴对，引起载流子数目剧增。这两种因素所产生的现象称为电击穿，如图1.1.10中③段所示， V_B 称为击穿电压。如果二极管所加反向电压接近或超过这个数值，又没有适当限流措施，将会因电流过大而使管子过热，造成永久性损坏，这就使管子从电击穿转变为热击穿，这种现象是应该避免的。

以上分析可见：二极管的伏安特性是非线性的，反映在正偏和反偏时的导电性能有很大差别。此外，即使都是正向偏置，二极管流过的电流与二极管两端所加的电压，也不是成正比例变化的，因此常称二极管为非线性器件。

二、二极管的主要参数

参数是反映管子性能的质量指标。二极管的主要参数有：

1. 最大平均整流电流 I_F

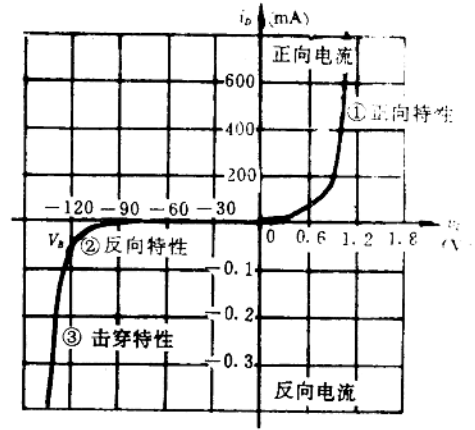


图1.1.10 二极管的伏安特性曲线