

中等专业学校电子信息类教材

低频电子线路

■ 程民利 主编



西安电子科技大学出版社

[http:// www.xduph.com](http://www.xduph.com)

中等专业学校电子信息类教材

低频电子线路

程民利 主编

西安电子科技大学出版社

2000

—— 内 容 简 介 ——

本书根据中等专业学校“低频电子线路”教学大纲编写。编写时力求精选内容,深入浅出,图文并茂,便于阅读。

全书共分9章,主要介绍晶体二极管及其应用、晶体三极管及基本放大电路、场效应管及其应用、多级放大电路、集成运算放大器及其应用、负反馈放大电路、低频功率放大电路、正弦波振荡器和直流稳压电源。

本书可作为中等专业学校电子类专业的教材。也可作为从事无线电技术及相关专业的工人、技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

低频电子线路/程民利主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2000.9

中等专业学校电子信息类教材

ISBN 7-5606-0907-4

I. 低... II. 程... III. 低频-电子线路-专业学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第38522号

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8227828

邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安市高陵县印刷厂

版 次 2000年9月第1版 2000年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 17.375

字 数 412千字

印 数 1~4000册

定 价 18.00元

ISBN 7-5606-0907-4/TN·0154

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

社会的发展已进入信息时代,计算机技术、通信、机电一体化等成为信息社会的重要标志,电子技术则是这些技术的基础。为体现当前电子技术的新发展、新工艺、新器件,重新编写了《低频电子线路》,它与《高频电子线路》等教材成为中等专业学校相关专业的系列教材。

本书有以下几个特点:

(1) 在教材内容的选择和章节组织上,贯彻由浅入深的原则。主要讲述基本概念、基本电路原理、基本分析方法。从物理概念入手分析电路,删除了繁琐冗长的数学推导公式和表达式,在必须引用这些数学表达式时,只引入结论,并对其过程只作简短说明。

(2) 由于“低频电子线路”是实践性较强的一门基础课,本着培养读者应用理论知识分析电路、解决实际工程问题能力的目的、本书在讲述过程中列举了大量的例子。

在书后附有一定数量的实验,通过实践,加深理解其理论知识和内容,提高读者的动手能力。

(3) 为了帮助读者自学和阅读,每章后都有简短的小结和一定数量的习题。习题形式多样,供读者自己检查掌握知识的程度。

本书参考课时为 80 学时。

本书的第 1、2、4、7 和 8 章由西安铁路运输学校的程民利编写;第 3、9 章由孙津平编写;第 5、6 章由朱晓红编写;西安铁路运输学校赵连城老师担任主审。

由于时间仓促和作者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,希望读者批评指正。

编 者

2000 年 5 月

目 录

第1章 半导体二极管及整流电路	1	2.1.4 三极管的主要参数	29
1.1 半导体的基础知识	1	2.2 光电三极管及光电耦合器件	31
1.1.1 半导体的特性	1	2.2.1 光电三极管	31
1.1.2 本征半导体和掺杂半导体	1	2.2.2 光耦合器	32
1.1.3 PN结	4	2.3 基本放大电路	33
1.2 晶体二极管	6	2.3.1 基本放大电路的组成	33
1.2.1 二极管的伏安特性	7	2.3.2 基本放大电路中各元件的作用	33
1.2.2 二极管的主要参数	8	2.3.3 放大电路的直流通路和	
1.2.3 稳压二极管	8	交流通路	34
1.3 特殊用途的二极管	9	2.3.4 放大电路中各点电压波形及	
1.3.1 光电二极管	10	三极管各级的电流波形	34
1.3.2 发光二极管(LED)	10	2.3.5 放大电路的性能指标	35
1.3.3 激光二极管	10	2.4 图解分析法	36
1.3.4 变容二极管	10	2.4.1 用图解法确定静态工作点Q	36
1.4 二极管整流电路	11	2.4.2 用图解法分析动态特性	38
1.4.1 单相半波整流电路	11	2.4.3 放大电路的非线性失真	40
1.4.2 单相全波整流电路	13	2.5 微变等效电路法	41
1.4.3 单相桥式整流电路	14	2.5.1 静态工作点的估算	42
1.5 滤波电路	16	2.5.2 三极管的微变量等效电路	42
1.5.1 脉动系数和波纹因数	16	2.5.3 共发射极放大电路交流	
1.5.2 电容滤波电路	16	指标的计算	43
1.5.3 电感滤波电路	17	2.6 静态工作点稳定电路	46
1.5.4 复式滤波电路	18	2.6.1 静态工作点不稳定的原因	46
1.6 倍压整流电路	18	2.6.2 静态工作点稳定电路	47
1.6.1 二倍压整流电路	19	2.6.3 静态工作点的估算	48
1.6.2 多倍压整流电路	19	2.6.4 交流指标的计算	48
1.6.3 各种整流滤波电路的比较和		2.6.5 其它形式的偏置电路	52
应用举例	19	2.7 共集电极放大电路—射极输出器	53
本章小结	20	2.7.1 静态工作点的计算	54
思考与习题	21	2.7.2 射极输出器的特点	54
第2章 晶体三极管及其基本		2.7.3 射随器的应用	56
放大电路	23	2.8 共基极放大电路及三种放大	
2.1 晶体三极管	23	电路形式的比较	57
2.1.1 三极管的结构与符号	23	2.8.1 共基极放大电路	57
2.1.2 三极管的放大作用	24	2.8.2 三种形式放大电路的比较	59
2.1.3 三极管的输入、输出特性	27	本章小结	59
		思考与习题	60

第3章 场效应管及其应用	64	5.1.3 集成运放的主要参数	121
3.1 结型场效应管	64	5.1.4 集成运放的使用常识	122
3.1.1 场效应管的结构	64	5.2 集成运放的应用基础	122
3.1.2 结型场效应管的符号	65	5.2.1 理想集成运放的应用条件	122
3.1.3 场效应管的工作原理	65	5.2.2 集成运放工作于线性区及 非线性区的特点	122
3.1.4 结型场效应管的特性曲线	66	5.2.3 非理想技术指标引起的误差及 偏差问题	124
3.1.5 结型场效应管的主要参数	68	5.3 集成运放的线性应用	125
3.2 绝缘栅型场效应管	69	5.3.1 比例运算电路	125
3.2.1 N沟道增强型绝缘栅场效应管	69	5.3.2 加法运算	126
3.2.2 N沟道耗尽型MOS管	71	5.3.3 减法运算	127
3.2.3 场效应管的特点及注意事项	73	5.3.4 积分运算	128
3.3 场效应管放大电路	74	5.3.5 微分运算	129
3.3.1 共源放大电路	74	5.3.6 乘法运算	130
3.3.2 共漏极电路—源极输出器	78	5.4 集成运放的非线性应用—比较器 和波形发生器	131
3.4 场效应管应用举例	79	5.4.1 电压比较器	131
3.4.1 CMOS反相器	79	5.4.2 集成运放组成的波形发生器	134
3.4.2 模拟开关	79	5.5 集成运放应用中的一些实际问题	137
3.4.3 前置放大电路	80	5.5.1 常见故障分析和集成运放 的保护	137
3.4.4 场效应管当作压控电阻使用 —VOS简介	80	5.5.2 集成运放的单电源应用	138
本章小节	81	本章小节	139
思考与习题	82	思考与习题	139
第4章 多级交流放大电路	85	第6章 负反馈放大电路	143
4.1 多级放大电路简介	85	6.1 反馈的基本概念	143
4.1.1 多级放大电路的耦合方式	85	6.1.1 反馈及反馈电路	143
4.1.2 多级放大电路的指标	87	6.1.2 反馈极性(正负反馈)	143
4.2 多级放大电路的计算	87	6.1.3 直流反馈与交流反馈	146
4.3 阻容耦合放大电路的频率响应	90	6.2 负反馈放大电路的分类	147
4.3.1 幅频特性、相频特性	91	6.2.1 电压反馈与电流反馈	147
4.3.2 阻容耦合放大电路的频率特性	92	6.2.2 串联反馈与并联反馈	147
4.4 直接耦合放大电路	94	6.2.3 负反馈放大电路的四种类型	148
4.5 差动放大电路	96	6.2.4 负反馈类型的判别方法	150
4.5.1 差动放大电路的基本形式	96	6.3 负反馈对放大电路性能的影响	151
4.5.2 双电源的差动放大电路	103	6.3.1 提高闭环增益的稳定性	151
4.5.3 具有恒流源的差动放大电路	105	6.3.2 扩展通频带	153
4.5.4 差动电路的四种接法	108	6.3.3 减小非线性失真	153
本章小结	113	6.3.4 负反馈对输入和输出电阻 的影响	154
思考与习题	114	6.3.5 引入负反馈的一般原则	156
第5章 集成运算放大器及其应用	118	6.4 深度负反馈放大电路	156
5.1 集成运算放大器	118		
5.1.1 集成运放的产生和特点	118		
5.1.2 集成运放的组成及电路符号	119		

6.4.1 深度负反馈的定义及近似 估算法	156	8.2.3 电容三点式正弦波振荡器	209
6.4.2 深度电压串联负反馈的估算	157	8.2.4 相位条件判断准则	211
6.4.3 深度电压并联负反馈的估算	157	8.3 改进型电容三点式振荡器	211
6.4.4 深度电流并联负反馈的估算	157	8.3.1 串联改进型电容三点式振荡器	211
6.4.5 深度电流串联负反馈的估算	158	8.3.2 并联改进型电容三点式振荡器	213
本章小结	158	8.4 石英晶体振荡器	214
思考与习题	159	8.4.1 振荡器的频率稳定问题	214
第7章 低频功率放大电路	165	8.4.2 提高频率稳定度的措施	215
7.1 概述	165	8.4.3 石英晶体的基本特性及其 等效电路	216
7.1.1 功率放大电路的分类	165	8.4.4 石英晶体振荡器	217
7.1.2 功率放大电路的特殊问题	166	8.4.5 使用石英晶体注意事项	218
7.2 单管甲类变压器耦合功率放大电路	167	8.5 RC 振荡器	219
7.2.1 电路的组成与特点	167	8.5.1 RC 串并联电路的选频特性	219
7.2.2 输出回路的图解法分析	167	8.5.2 RC 桥式振荡电路	220
7.2.3 功率和效率计算	168	8.6 集成振荡电路	222
7.2.4 三极管的选择及甲类功率 放大电路的缺点	170	8.6.1 文氏桥实用振荡器	222
7.3 变压器耦合乙类推挽功率放大电路	170	8.6.2 二相振荡电路	222
7.3.1 电路组成与工作原理	170	本章小结	224
7.3.2 性能分析	172	思考与习题	225
7.4 互补对称功率放大电路	175	第9章 直流稳压电路与可控 整流电路	231
7.4.1 双电源的互补对称电路 (OCL 电路)	176	9.1 硅稳压管稳压电路	232
7.4.2 准互补对称电路	181	9.1.1 电路组成	232
7.4.3 单电源互补对称电路 (OTL 电路)	184	9.1.2 稳压条件	232
7.4.4 桥式对称功率放大电路 (BTL 电路)	187	9.1.3 稳压原理	232
7.5 集成功率放大电路	189	9.1.4 主要性能指标	233
7.5.1 专用型集成功放	189	9.2 串联型稳压电路	234
7.5.2 通用型集成功放	195	9.2.1 电路组成	235
本章小结	198	9.2.2 稳压电路工作原理	236
思考与习题	198	9.2.3 输出电压的调节范围	236
第8章 正弦波振荡器	203	9.2.4 改善稳压电路性能的措施	236
8.1 正弦波振荡器的工作原理	203	9.2.5 稳压电路中的保护措施	237
8.1.1 正弦波振荡器的组成	203	9.3 集成稳压电路	238
8.1.2 正弦波振荡器的起振过程和 起振条件	203	9.3.1 三端固定式稳压电路	239
8.1.3 振荡器的平衡过程和平衡条件	204	9.3.2 三端固定式稳压电路的应用	239
8.2 LC 正弦波振荡器	205	9.3.3 三端可调稳压电路	241
8.2.1 互感反馈式正弦波振荡器	205	9.3.4 集成稳压电路的主要参数	242
8.2.2 电感三点式正弦波振荡器	207	9.4 开关型稳压电路	244
		9.4.1 电路组成及各部分的功能	244
		9.4.2 开关型稳压电路的稳压原理	245
		9.5 晶闸管电路	246
		9.5.1 晶闸管的结构与符号	246

9.5.2 晶闸管的工作原理	247	9.9.1 结构与符号	260
9.5.3 晶闸管的伏安特性	248	9.9.2 伏安特性	261
9.5.4 晶闸管的主要参数	249	9.9.3 触发方式	261
9.5.5 晶闸管的型号	250	9.9.4 典型触发电路	262
9.6 可控整流电路	250	本章小结	263
9.6.1 单相半波可控整流电路	250	思考与习题	263
9.6.2 单相桥式半控整流电路	253	附 录	266
9.7 触发电路	254	实验一 二极管、三极管的测试	266
9.7.1 对触发电路的要求	254	实验二 单管共射极放大电路	266
9.7.2 单结晶体管触发电路	254	实验三 差动放大电路	266
9.7.3 单结晶体管的自激振荡电路	256	实验四 负反馈放大电路	267
9.7.4 单结晶体管的同步触发电路	257	实验五 集成信号运算电路	267
9.8 晶闸管保护	258	实验六 集成运放的非线性应用	267
9.8.1 过电流保护	258	实验七 集成稳压电路	268
9.8.2 过电压保护	259	实验八 集成 RC 振荡电路	268
9.9 双向晶闸管	260	参考文献	269

第 1 章

半导体二极管及整流电路

半导体二极管是由半导体材料制成的。因此,在讲半导体二极管及其应用之前,必须了解半导体的基础知识。

1.1 半导体的基础知识

自然界的各种物质就其导电性来说可分为导体、半导体、绝缘体三大类。导体具有良好的导电性。凡容易导电的物质(如金、银、铜、铝等金属物质)称其为导体,其电阻率很小(大约有 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$)。不易导电的物质(如玻璃、橡皮、塑料、陶瓷等)称其为绝缘体,其电阻率很大(大约在 $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 以上)。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质(如硅、锗、硒等)称为半导体,它的电阻率通常在 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 之间。半导体既无良好的导电性,又无良好的绝缘性,它之所以得到广泛的运用,是因为半导体具有奇妙的特性。

1.1.1 半导体的特性

1. 热敏特性

半导体对温度很敏感,温度每升高 10°C ,半导体的电阻率就减少为原来的 $1/2$,即导电能力提高一倍。利用半导体的这一特性,制成的热敏电阻已广泛应用于各种电子设备中。

2. 光敏特性

半导体对光照很敏感。半导体受到光照后,电阻率也显著减小。利用半导体对光照很敏感这一特点,可将光照强度的变化转化为电信号的变化,实现光控。利用这一特性做成的光敏元件有光敏电阻、光电二极管、光电三极管、光电耦合器和光电池等。

3. 掺杂性

半导体对杂质很敏感,在半导体中只要掺入亿分之一的杂质,电阻率就会下降到原来的几万分之一,这是半导体最显著、最突出的优点。正是利用控制掺杂方法制成各种不同性能、不同用途的电子器件,促进了电子技术的飞速发展。

1.1.2 本征半导体和掺杂半导体

1. 本征半导体

常用的半导体材料是单晶硅(Si)和单晶锗(Ge)。所谓单晶,是指整块晶体中的原子按一定规律整齐地排列着。非常纯净的单晶半导体称为本征半导体。

半导体硅和锗都是 4 价元素,其原子结构如图 1-1 所示。最外层是 4 个电子,带 4 个

单位的负电荷。将原子核和内层电子看成一个整体称为惯性核，如图 1-1(c)所示，惯性核带 4 个单位的正电，最外层有 4 个价电子，带 4 个单位负电，整个原子为中性。

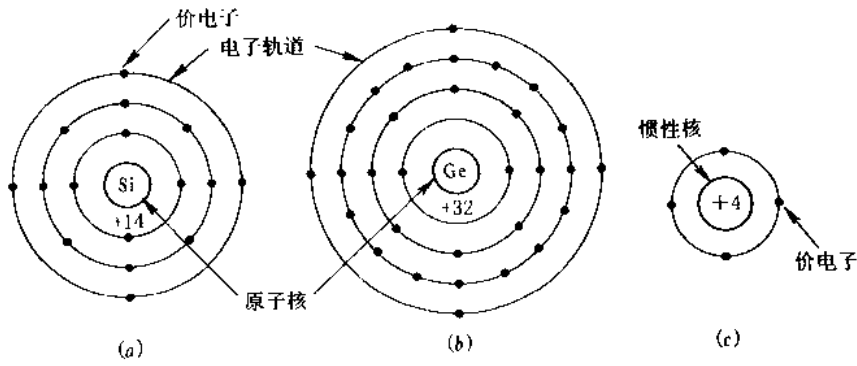


图 1-1 半导体的原子结构示意图
(a) 硅原子；(b) 锗原子；(c) 简化模型

本征半导体晶体结构的示意图如图 1-2 所示。由图 1-2 可见，各原子彼此间整齐，紧密地排列着，使每个原子的 4 个价电子不仅受所属原子核的吸引，而且还受相邻 4 个原子核的吸引，使得每一个价电子都为相邻原子核所共用，形成了稳定的共价键结构。每个原子核最外层等效有 8 个价电子，由于价电子不易挣脱原子核束缚而成为自由电子，因此，本征半导体的导电能力差。

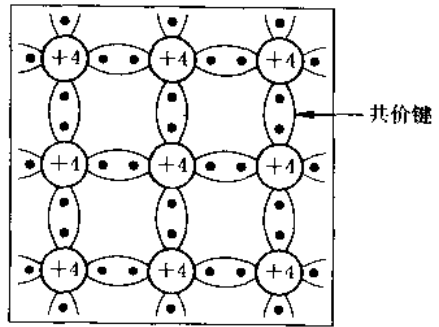


图 1-2 硅单晶的共价键结构

但是，如果能从外界获得一定的能量，一些价电子就会挣脱共价键的束缚而成为自由电子，在共价键中留下一个空位置，称为“空穴”。空穴的出现使相邻原子的价电子离开它所在的共价键来填补这个空穴，同时，这个共价键又产生了一个新的空穴。这个空穴也会被相邻的价电子填补而产生空穴，这种电子填补空穴的运动，无论在形式上还是效果上，都相当于带正电荷的空穴在运动。为了区别于电子的运动，将其称为空穴运动，并把空穴看成一种带正电的载流子。

显然，在本征半导体中，空穴与电子共存，称为电子—空穴对。将本征半导体在温度增加时产生电子空穴对的现象称为本征激发。

本征激发的过程中，温度越高，产生的“电子—空穴对”越多。电子、空穴是同时出现的，因此它们的总数量相等。当一个自由电子进入空穴时，空穴就会消失，这一过程称为复合。在一定温度条件下，激发和复合达到动态平衡。

可见，在半导体中存在着自由电子和空穴两种载流子，而导体中只有自由电子这一种载流子，这是半导体与导体的不同之处。

2. 掺杂半导体

本征半导体的导电能力很弱，热稳定性也差。但是通过控制杂质的掺入量就可使导电能力明显提高，这种掺入杂质的半导体，即掺杂半导体。根据掺入杂质的不同，可分为N型半导体和P型半导体。

1) N型半导体

N型半导体是在本征半导体硅中掺入微量的5价元素磷，磷原子就会取代晶体中少数的硅原子，占据晶格上的某些位置，如图1-3所示。

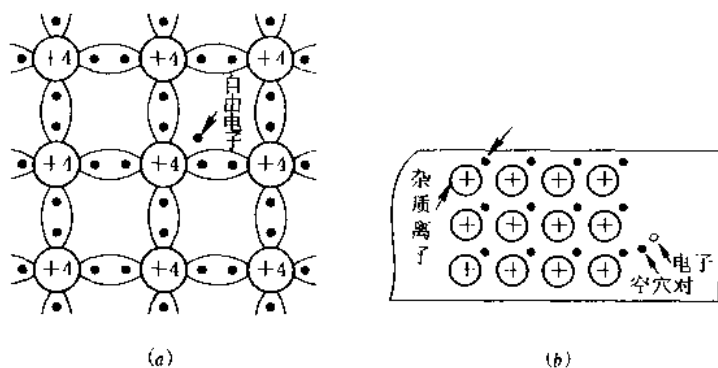


图1-3 N型半导体
(a)结构示意图；(b)简化图

由图1-3(a)可见，磷原子取代硅原子后，其外围价电子中有4个与相邻硅原子的价电子形成共价键，还有一个电子在共价键之外，只受磷原子的微弱束缚。因此，在室温下即可挣脱磷原子的束缚，游离于晶格之间。失去1个电子的磷原子则成为不能移动的正离子。磷原子因为释放电子而被称为施主原子或施主杂质。

由于每个磷原子都能释放出一个电子，使得半导体电子的数目远远超过本征激发中产生的电子空穴对数目，如图1-3(b)所示。电子成为多数载流子，简称多子；而空穴成为少数载流子，简称少子。显然，参与导电的主要是电子，故这种半导体称电子型半导体，简称N型半导体。

2) P型半导体

P型半导体是在本征半导体中掺入微量的3价元素例如硼，硼原子取代了晶体中少数的硅原子，占据了晶格的某些位置。如图1-4所示。

由图1-4(a)可见，硼原子取代硅原子占据了晶格位置后，3个价电子与相邻4个硅原子中的三个形成共价键，另一个硅原子因缺少一个电子留下一个空穴。这个空穴被相邻硅原子的价电子填充后，使3价硼原子获得一个电子而变成负离子，同时相邻共价键上又出现了一个空穴。由于硼原子接受电子，故称其为受主原子或受主杂质。

由于每个硼原子都能提供一个空穴，使半导体中空穴的数量远远大于本征激发中产生的电子-空穴对数目，如图1-4(b)所示。空穴成为多数载流子简称多子；而电子则是少数载流子，简称少子。显然，参与导电的主要是空穴，故这种半导体称空穴型半导体，简称P型半导体。

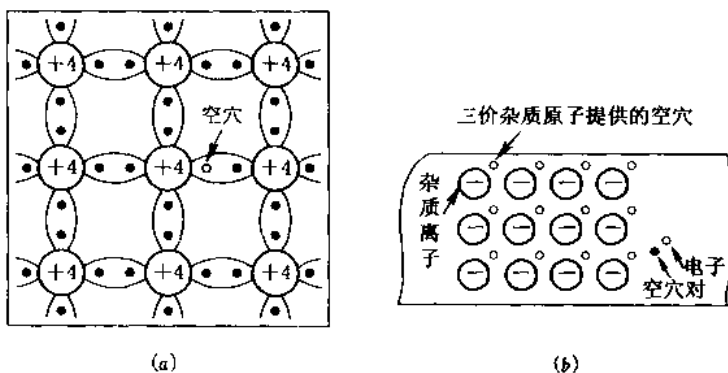


图 1-4 P 型半导体
(a) 结构示意图; (b) 简化图

1.1.3 PN 结

用不同的掺杂工艺在一块完整的硅片上形成一半是 N 型半导体, 另一半是 P 型半导体, 则在两种半导体的交界处会形成 PN 结。PN 结的形成过程如图 1-5 所示。

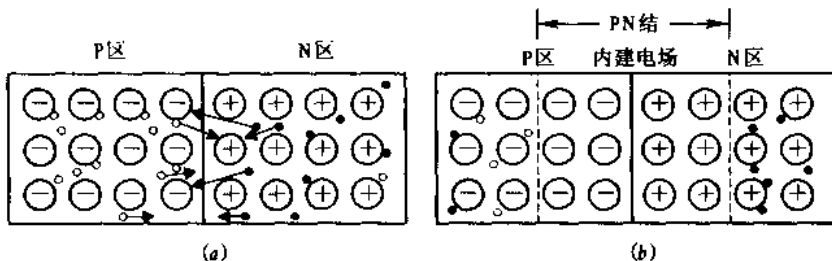


图 1-5 PN 结的形式
(a) 多子扩散示意图; (b) PN 结的形成

由图 1-5(a)可见, P 区的多子是空穴, 少子是电子; 而 N 区的多子是电子, 少子是空穴, 界面两边明显存在着载流子浓度差。不难理解, N 区的多子(电子)必然是向 P 区扩散, 并与界面附近 P 区的空穴复合而消失, 在 N 区留下一层不能移动的正电荷离子。同样, P 区的多子(空穴)也会向 N 区扩散, 并与界面附近的 N 区电子复合而消失, 在 P 区留下一层不能移动的负电荷离子。扩散的结果使界面出现了空间电荷区, 如图 1-5(b)所示。空间电荷区形成一个由 N 区指向 P 区的内电场。显然, 内电场的存在阻碍了扩散运动, 但加强了 P 区的少子(电子)向 N 区漂移, N 区的少子(空穴)向 P 区漂移。多子的扩散运动使空间电荷区加厚, 而少子的漂移运动使空间电荷区变薄。当扩散与漂移达到动态平衡时, 便形成了稳定的空间电荷区, 称为 PN 结。由于空间电荷区缺少能移动的载流子, 故又称 PN 结为耗尽层或高阻区。

PN 结最大的特点是具有单向导电性, 即正向(P 区接电源正极, N 区接电源负极)导通, 反向截止。

1. 正向导通

正向导通是将 PN 结按图 1-6(a)所示方法连接(即正向连接,或正向偏置)。由于 PN 结是高阻区,而 P 区, N 区电阻很小,所以外加电压几乎全落在 PN 结上。由图 1-6(a)可见,外电场将推动 P 区多子向右扩散,与原空间电荷区的负离子中和,推动 N 区的多子向左扩散与原空间电荷区的正离子中和,使空间电荷区变薄,打破了原来的动态平衡。同时,电源不断向 P 区补充正电荷,向 N 区补充负电荷,结果在电路中形成较大的正向电流,电流由 P 区流向 N 区。此时 PN 结对外呈现较小的阻值,处于导通状态。

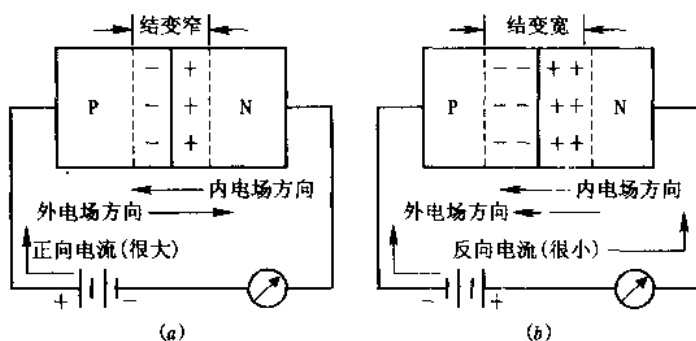


图 1-6 PN 结的单向导电性

(a) 正向连接, (b) 反向连接

2. 反向截止

反向截止是将 PN 结按图 1-6(b)所示电路连接(称 PN 结反向偏置)。由图可见,外电场方向与内电场方向一致,它将 N 区的多子(电子)从 PN 结附近拉走,将 P 区的多子(空穴)从 PN 结附近拉走,使 PN 结加厚,呈现出很大的阻值,且打破了原来的动态平衡,使漂移运动增强。而漂移运动是少子的运动,所以漂移电流很小,由 N 区流向 P 区。若忽略漂移电流的大小,则可以认为 PN 结截止。

值得注意的是:① 当外加反向电压在一定范围内变化时,反向电流几乎不变,故称其为反向饱和电流。② 因本征激发随温度的升高而加强,导致电子-空穴对增多,因而反向饱和电流随温度的升高而成倍增长。

综上所述,PN 结正向偏置时,正向电流很大,相当于 PN 结导通;PN 结反向偏置时,反向电流很小,相当于 PN 结截止,这就是 PN 结的单向导电性。

3. PN 结的电容效应

按电容的定义

$$C = \frac{dq}{du}$$

即电压变化引起电荷变化,反映出电容效应。PN 结两端加上电压,PN 结内就有电荷变化,说明 PN 结具有电容效应。

1) 势垒电容 C_T

当 PN 结的外加电压大小变化时,PN 结空间电荷区的宽度也跟着变化,即电荷量变化。这种电荷量随外加电压变化所形成的电容效应称势垒电容。势垒电容不是一个常数,

它随外加电压的大小变化。一般用 C_T 表示势垒电容，其容值为几 pF~200 pF。利用此电容效应可制成变容二极管。

2) 扩散电容 C_D

扩散电容是 PN 结在正向应用时，多数载流子在扩散过程中引起电荷积累而产生的，通常用 C_D 表示。PN 结的结电容 C_j 包含两部分，即

$$C_j = C_T + C_D$$

一般，PN 结正偏时，扩散电容起主要作用， $C_j = C_D$ ；PN 结反偏时，势垒电容起主要作用，即 $C_j = C_T$ 。

1.2 晶体二极管

晶体二极管简称二极管，用字母 V_D 表示。它由一个 PN 结加上两个电极引线构成。二极管的种类很多，按材料分类有硅二极管和锗二极管；按结构分类有点接触型、面接触型和平面型三大类。如图 1-7 所示。

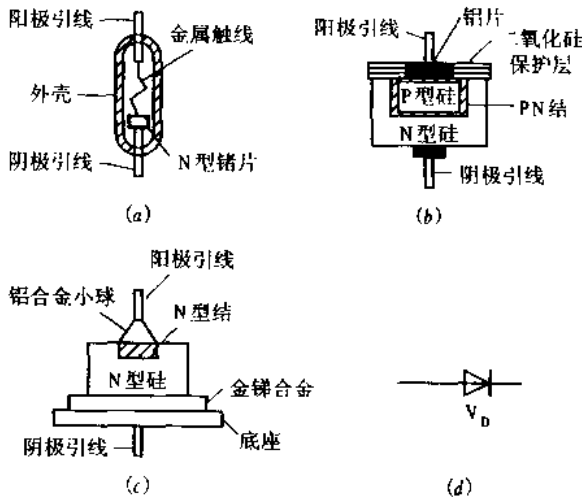


图 1-7 二极管的结构和符号

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 电路符号

点接触型二极管因其结面积小，结电容小，故适用于高频电路和开关电路，它不能通过很大的电流，承受的反向电压也不能太大。面接触型二极管结面积大，结电容也大，允许通过较大的电流，但工作频率低，一般用于整流电路。平面型二极管结面积也有大小之分，结面积大的适用于低频大电流工作，而结面积小的适用于高频小电流场合。二极管的电路符号如图 1-7(d) 所示，三角箭头方向表示 PN 结的导通方向，P 区引出的电极称为阳极或正极，N 区引出的电极称为阴极或负极。

常用二极管的型号有 2AP、2CP、2CZ、2CW、2DW 等，型号中 2 表示二极管；第一个字母表示材料(A 表示 N 型锗材料；C 表示 N 型硅材料；D 表示 P 型硅材料)。第二个字母表示类型(P 表示普通管；Z 表示整流管；W 表示稳压管)。

1.2.1 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性指流过二极管的电流与加到二极管两端电压的关系。二极管伏安特性如图 1-8 所示。

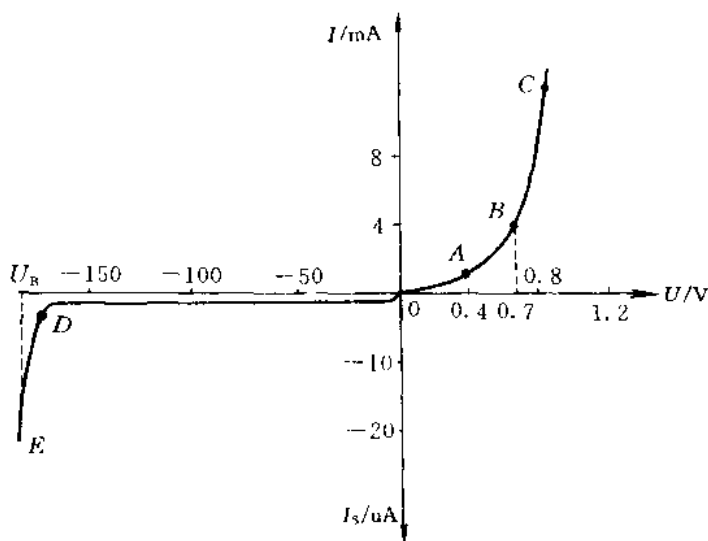


图 1-8 二极管 2CP6 的伏安特性

1. 正向特性

二极管的正向特性是当外加电压等于零时, 电流为零; 当外加电压较小时, 外加电场不足以克服 PN 结内电场的作用, 故正向电流很小, 二极管呈现出较大阻值, 如图 1-8 中 OA 段所示。OA 段被称为死区, A 点所对应的电压称门坎电压或死区电压, 用 U_m 表示, 其值大小与温度及管子的材料有关。一般硅管为 0.5 V, 锗管为 0.2 V。

当外加电压增大, PN 结的内电场被明显削弱, 二极管呈现的电阻减小, 电流显著增大, 如图 1-8 中 AB 段所示。二极管导通后, 管压降很小, 一般硅管为 0.7 V, 锗管为 0.3 V。若电流在较大范围内变化时, 其正向电压几乎不变, 如图 1-8 的 BC 段表现出二极管具有很好的恒压特性。利用二极管的这一特性可实现限幅。

2. 反向特性

当二极管两端加上反向电压时, 反向电流很小, 这个反向电流就是反向饱和电流, 如图 1-8 中 OD 段所示。反向饱和电流用 I_s 表示, I_s 愈大, 说明二极管的单向导电性越差。小功率硅管的 I_s 一般为 $1 \mu A$, 而锗管为几 μA 到几十 μA 以上。这是硅管和锗管的一个显著区别。反向运用时, 二极管的阻值很大, 呈截止状态。

若反向电压继续增大, 超过某一值时, 反向电流急剧增大, 这种现象称反向击穿。此时的电压称为击穿电压, 如图 1-8 中的 DE 段所示。击穿电压用 U_B 表示。由 DE 段可见, 电流在很大范围内变化时, 反向电压几乎不变, 表现出很好的恒压特性。这一特性是制作稳压二极管的依据。但反向电流不能过大, 否则 PN 结会因过热而烧坏, 这种情况称热击穿。

3. 温度特性

由于半导体的热敏特性,使二极管对温度很敏感。温度对二极管伏安特性的影响如图 1-9 所示。

由图可见:温度升高时,二极管的正向特性曲线左移。这是因为,温度升高,扩散运动加强,产生同一正向电流所需压降减小,正向特性左移。温度升高时,二极管的反向特性曲线下移。因为温度升高,本征激发加强,半导体中少数载流子数目增多,在同一反向电压下,反向饱和电流增大,反向特性下移;温度升高时,反向击穿电压减小。击穿现象是由于大的反向电压使少数载流子获得很大的动能,当它与 PN 结内的原子发生碰撞时,产生了很多的电子-空穴对,使 PN 结内载流子数目急剧增加,并在反向电压作用下形成很大的反向电流。因此温度升高,反向击穿电压减小。综上所述,温度升高,二极管的导通压降 U_F 降低,反向击穿电压减小,反向饱和电流增大。

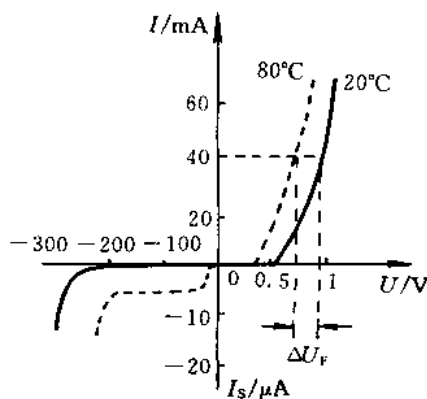


图 1-9 温度对二极管伏安特性的影响

二极管的以上特性在电子技术的各个领域得到了广泛的应用,利用二极管的单向导电性可实现整流、检波;利用正向恒压特性可实现限幅;利用反向特性可制成稳压二极管;利用温度特性可实现电路的温度补偿。

1.2.2 二极管的主要参数

二极管的参数是表征二极管的特性和应用范围的。只有正确理解这些参数的意义,才能正确、安全地使用二极管。

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流又称额定电流,它是指二极管长期工作允许通过的最大正向平均电流。若工作电流超过 I_F ,PN 结会因过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压指二极管使用过程中允许的最大反向电压。为保证管子安全工作,二极管的最大反向电压通常为反向击穿电压的 1/2 左右。

3. 反向饱和电流 I_S

在室温下,二极管未击穿时的反向电流值即为反向饱和电流 I_S 。

1.2.3 稳压二极管

1. 稳压特性

稳压二极管是一种具有稳压功能的二极管,其伏安特性如图 1-10 所示。由图可见,稳压管的正向特性与普通二极管相似,但反向特性却有所不同。① 反向击穿电压较小。② 反向击穿区的特性曲线陡峭(即恒压性能更好)。③ 由击穿转化为稳压是有条件的,这就是在外电路中串入限流电阻 R (如图 1-10(c)所示),以防电流过大而损坏稳压管。

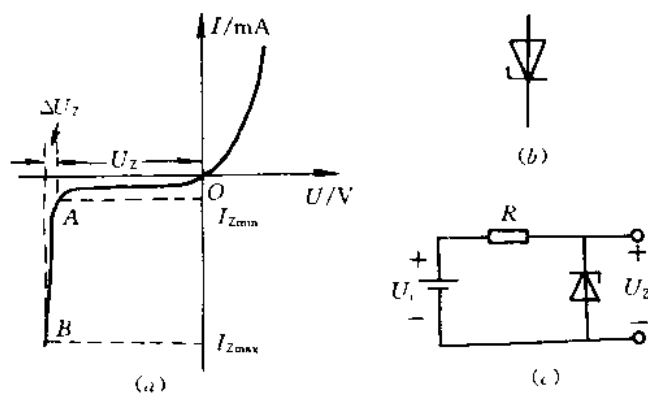


图 1-10 硅稳压管伏安特性及电路符号
(a) 伏安特性; (b) 电路符号; (c) 稳压管电路

2. 稳压管的参数

1) 稳定电压 U_Z

稳定电压是指在规定的测试条件下, 稳压管工作于击穿区时的电压, 通常指击穿电压 U_Z 。由于制造工艺原因, 即使同一型号的稳压管, U_Z 分散性也很大。选用时应以实际测量结果为准。

2) 稳定电流 I_Z

稳定电流是指稳压管在稳定电压 U_Z 时的工作电流, 其范围在 $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ 之间。

3) 最小稳定电流 I_{Zmin}

最小稳定电流是指稳压管工作时, 反向电流必须大于 I_{Zmin} , 否则不能稳压。

4) 最大稳定电流 I_{Zmax}

最大稳定电流是指稳压管长期工作允许通过的最大反向电流。其工作电流应小于 I_{Zmax} 。

5) 最大耗散功率 P_M

最大耗散功率是当管子的工作电流大于 I_{Zmax} 时, 管子功耗增加, PN 结温度上升而造成热击穿, 这时的功耗称最大耗散功率(即 $P_M = I_{Zmax} \cdot U_Z$)。

6) 动态电阻 r_Z

动态电阻 r_Z 定义为

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

r_Z 越小, 说明 ΔI_Z 引起的 ΔU_Z 变化越小, 稳压性能越好。 r_Z 通常在几 $\Omega \sim$ 几十 Ω 之间。

1.3 特殊用途的二极管

特殊用途的二极管在电子设备中早已得到广泛应用, 这里简单介绍几种特殊用途的二极管。