

MUNI DIANZI JISHU

模拟电子技术

重庆大学电子学教研组编

程开明 主编

重庆大学出版社

771
C 73

337244

模 拟 电 子 技 术

重庆大学电子学教研组 编

程 开 明 主 编



重庆大学出版社

内 容 简 介

本书按照国家教委批准的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》编写。内容有：半导体器件基础、放大电路基础、集成运算放大器、负反馈放大电路、集成运算放大器的应用、信号发生器、直流稳压电源、模拟电子电路的读图，各章均附有习题。可供60~70学时课堂教学用。

本书可作高等学校电气类、电子类和其它相近专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

模拟电子技术

程开明 主编

责任编辑 谭 敏

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆印制一厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：13.5 字数：337 千

1993年6月第1版 1993年6月第1次印刷

印数：1—4000

标准书号：ISBN 7-5624-0538-7 定价：6.63元
TN·12

(川)新登字020号

初 版 序

根据电气类电子技术基础课程教学需要,我们采用从模拟到数字的体系,编写了讲义。经多年教学实践充实,最后按照1987年国家教委批准的《高等工业学校电子技术基础课教学基本要求》修订成《模拟电子技术》、《数字电子技术》。本册是模拟电子技术基础部分。

本书以基本概念、基本知识、基本方法为主线,以加强集成**削减分立元件**为原则编写。作为技术基础课的电子技术,既要学习电子器件、电子电路和主要应用,更重要的是掌握电子线路的基本分析方法。因此,该书注意将基本理论贯穿始终。**其次**,突出反映现代电子技术的成果——集成电路。分离元件基本放大电路(包括电流源电路、复合组态)压缩为一章,从第三章开始,均以模拟集成电路为核心安排内容。运算放大器、功率放大器、模拟乘法器、集成稳压器的应用得到加强。方法上,既重视定性分析即物理概念上的阐述,又注重数学方法的推理,以简化分析,使之言简意赅。结论尽量以通用形式表达,便于记忆、运用。

除基本内容外,有的章节还有拓宽部分,均以“*”号标出,可供选用。

本书第一、二章由杨永明、程开明执笔,第三、四、五章由唐治德执笔,第六章由周宝薇、唐治德执笔,第七章由曾孝平执笔,第八章由谭金蓉、杨永明执笔。程开明任主编,负责组织、统编和修改定稿。唐治德、杨永明协助主编工作。编写过程中,郑荣义、赵新权、邓晓琳等同志参加了部分工作,给予了很大支持。

书稿承李时光教授主审,提出了详细的修改意见。对主审及编写出版过程中给予帮助和支持的同志,在此,一并表示诚挚的谢意。

由于我们水平有限,虽然根据各方意见多次修改,书中一定还有不少缺点、错误,恳请读者批评、指正。

编者

1992年3月于重大

目 录

第一章 半导体器件基础	1
§1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	2
1.1.4 PN结的特性	3
§1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管的结构和特性	5
1.2.2 二极管的主要参数	7
1.2.3 二极管应用举例	8
1.2.4 特殊二极管	8
§1.3 晶体管	10
1.3.1 晶体管的结构	10
1.3.2 晶体管的共射特性曲线	13
1.3.3 晶体管的主要参数	14
§1.4 场效应管	15
1.4.1 结型场效应管	15
1.4.2 绝缘栅场效应管	18
1.4.3 场效应管的主要参数	21
1.4.4 场效应管的特点和使用注意事项	22
习题一	22
第二章 放大电路基础	25
§2.1 放大电路的基本概念	25
2.1.1 放大的概念	25
2.1.2 性能指标	25
§2.2 基本放大电路的工作原理	27
2.2.1 放大电路的组成原则	27
2.2.2 静态工作点的设置	27
§2.3 放大电路的基本分析方法	28
2.3.1 静态工作点的估算法	28
2.3.2 图解分析法	29
2.3.3 微变等效电路法	32
§2.4 工作点稳定电路	36
§2.5 单管放大电路的3种组态	38
2.5.1 共集放大电路	38
2.5.2 共基放大电路	40
§2.6 复合联接放大电路	40

2.6.1 共集-共集放大电路	41
2.6.2 共集-共基放大电路	42
§2.7 电流源电路	42
§2.8 场效应管放大电路	44
2.8.1 场效应管放大电路的静态偏置	44
2.8.2 场效应管放大电路的微变等效电路法	45
§2.9 多级放大电路	47
2.9.1 多级放大电路的耦合方式	47
2.9.2 多级放大电路的动态分析	50
§2.10 单管放大电路的频率响应	51
2.10.1 频率响应的基本概念	51
2.10.2 晶体管混合 π 模型和参数	53
2.10.3 单管共射放大电路的频率响应	56
2.10.4 多级放大电路的频率响应	61
习题二	62
第三章 集成运算放大器	68
§3.1 差动放大电路	68
3.1.1 射极耦和差动放大电路	68
3.1.2 差动放大电路的输入输出方式	70
3.1.3 差放的改进电路	73
§3.2 互补对称功率放大器	75
3.2.1 功率放大器的特点	75
3.2.2 互补对称功率放大器	76
§3.3 集成运算放大器	79
3.3.1 集成电路的特点	79
3.3.2 集成运放电路介绍	80
§3.4 集成运放的主要参数	84
§3.5 特殊集成运放	85
3.5.1 集成运放的分类	85
3.5.2 高输入阻抗集成运放	86
3.5.3 集成功率放大器	87
3.5.4 选择运放的方法	88
习题三	88
第四章 负反馈放大电路	92
§4.1 反馈的基本概念	92
4.1.1 反馈及反馈通路	92
4.1.2 反馈的分类	92
§4.2 负反馈放大电路的4种基本组态	95
4.2.1 电压串联负反馈	95
4.2.2 电压并联负反馈	96
4.2.3 电流串联负反馈	96
4.2.4 电流并联负反馈	97
§4.3 负反馈放大电路的方框图分析	98

4.3.1	负反馈放大电路的方框图	98
4.3.2	闭环放大倍数的一般表达式	98
4.3.3	方框图分析法	99
*4.3.4	负反馈放大电路分析实例	101
§4.4	深度负反馈放大电路的计算	104
4.4.1	深度负反馈电路的特点	104
4.4.2	深度负反馈放大电路分析举例	105
§4.5	负反馈对放大电路性能的改善	108
4.5.1	提高放大倍数的稳定性	109
4.5.2	扩展通频带宽	109
4.5.3	减小非线性失真	110
4.5.4	抑制干扰和噪声	111
4.5.5	对输入电阻和输出电阻的影响	111
§4.6	负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	112
4.6.1	自激振荡的原因及条件	112
4.6.2	用波特图分析电路是否自激	112
4.6.3	相位补偿	115
习题四		118
第五章	集成运算放大器的应用	124
§5.1	运算放大器的工作状态	124
§5.2	基本运算电路	125
5.2.1	比例运算电路	125
5.2.2	加减运算电路	126
5.2.3	积分和微分电路	128
§5.3	对数和反对数运算电路	130
5.3.1	对数运算电路	130
5.3.2	反对数运算电路	132
§5.4	模拟乘法运算电路	133
5.4.1	对数式乘法运算电路	133
5.4.2	变跨导乘法电路	134
5.4.3	乘法电路的应用	136
§5.5	RC有源滤波器	137
5.5.1	滤波器的功能及分类	137
5.5.2	一阶低通滤波器	138
5.5.3	无限增益多环反馈型滤波器	140
5.5.4	压控电压源型滤波器	143
§5.6	电压比较器	145
5.6.1	简单电压比较器	145
5.6.2	迟滞比较器	146
5.6.3	窗口比较器	148
习题五		149
第六章	信号发生器	155
§6.1	正弦波振荡器	155

6.1.1 正弦波振荡原理	155
6.1.2 RC正弦波振荡器	156
6.1.3 LC正弦波振荡器	158
6.1.4 石英晶体正弦波振荡器	162
§6.2 非正弦波发生器	164
6.2.1 短形波发生器	164
6.2.2 三角波发生器	165
6.2.3 锯齿波发生器	166
6.2.4 应用举例——多波形信号发生电路	167
习题六	167
第七章 直流稳压电源	172
§7.1 单相整流电路	172
7.1.1 单相半波整流电路	172
7.1.2 单相全波整流电路	173
7.1.3 单相桥式整流电路	175
7.1.4 倍压整流	176
§7.2 滤波电路	176
7.2.1 电容滤波电路	177
7.2.2 电感滤波电路	179
7.2.3 其它形式的滤波电路	180
§7.3 稳压电路	180
7.3.1 硅稳压管稳压电路	180
7.3.2 串联型晶体管稳压电路	182
7.3.3 稳压电路的保护	184
§7.4 集成稳压器	185
7.4.1 集成稳压器分类	185
7.4.2 W7800稳压器	185
7.4.3 三端可调稳压器W317	188
习题七	193
第八章 模拟电子电路的读图	197
§8.1 读图的方法及步骤	197
§8.2 典型实例	197
8.2.1 JO412型晶体管毫伏表	197
8.2.2 YL-1型音频电疗机	205
8.2.3 高温报警器	206
参考文献	208

第一章 半导体器件基础

本章介绍半导体二极管、三极管、场效应管的工作原理，特性曲线和主要参数。

§1.1 半导体基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

容易传导电流的物质叫做导体，如铜、铝、银等金属。几乎不传导电流的物质叫做绝缘体，如塑料、陶瓷、橡皮、玻璃等。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体，如硅、锗、硒等。

物质导电性能的根本差异在于物质内部原子间的结合方式以及原子本身的结构。我们知道，原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成，而电子又分层围绕原子核不停地运动。图1.1.1(a)、(b)分别表示了硅、锗原子的结构模型。原子的最外层电子叫做价电子，有几

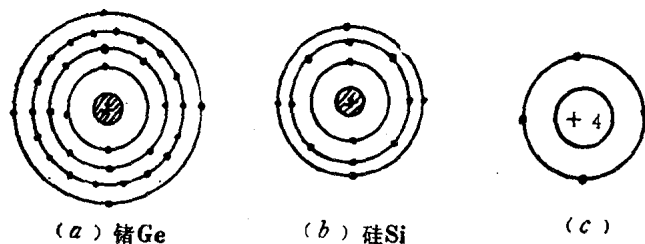


图1.1.1 硅和锗的原子结构
(a)锗 (b)硅 (c)简化模型

个价电子就叫做几价元素，物质的导电性与价电子的数目有关，硅和锗是4价元素。为了突出价电子的作用和画图的方便，用图(c)简化模型表示硅和锗，其中+4表示原子核及内层电子所具有的电荷。

导体的外层电子受原子核的束缚力很小，在室温下有大量的价电子能够挣脱原子核的束缚成为自由电子（即运载电荷的载流子），在外电场的作用下，作定向运动形成电流。所以，导电性能很好，电阻率一般小于 $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$ 。

绝缘体的外层电子受原子核的束缚力很大，在室温下不易挣脱出来，不易形成自由电子，故导电性能很差，电阻率一般大于 $10^9\Omega\cdot\text{cm}$ 。

半导体的原子结构比较特殊，外层电子既不象导体那样容易挣脱出来，也不象绝缘体那样束缚很紧，它的导电性能介于导体和绝缘体之间。

1.1.2 本征半导体

完全纯净的、结构完整的半导体叫做本征半导体。

硅、锗制成本征半导体时，其原子的排列就由杂乱无章的状态排列成很有规律的空间点阵（简称晶格）。在晶体中，原子之间距离很近，每个原子的4个价电子不仅受所属原子核的

作用，而且还与相邻的4个原子发生联系，即每两个相邻的原子共有一对电子。电子对中任一个电子，一方面围绕自身原子核运动，另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上，这样的组合叫做共价键结构，如图1.1.2所示。共价键中的电子受两个原子核的约束，叫做束缚电子。如果没有足够的能量，束缚电子不能挣脱共价键的束缚。因此，在绝对温度零度（即 0°K ，相当于 -273°C ）且无外界激发时，本征半导体无自由电子，和绝缘体一样不导电。在常温下，由于热运动，将有少数束缚电子获得足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子——电子载流子。值得注意的是，束缚电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，在共价键中就留下一个空位，有了这样一个空位，在外电场或其它能源作用下，邻近的束缚电子就会填补到这个空位上，这个电子原来的位置又留下新的空位，然后，其它束缚电子又会移到这个新的空位上，如此下去，形成束缚电子的运动。这种运动，好像一个带正电荷的空位在移动，叫做空穴（即空位）运动。

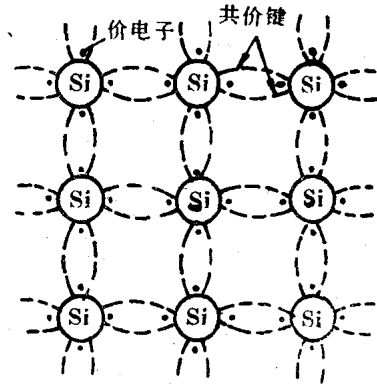


图 1.1.2 硅晶体的共价键结构

在半导体上加电压时，其电流由两部分组成，一是自由电子定向运动形成的电流；二是束缚电子递补空位所形成的空穴电流，其方向与电子电流相反。由此可知，在半导体中不仅有电子载流子，而且还有空穴载流子，这是半导体的一个重要特征。

由于热运动，使本征半导体不断产生自由电子，同时也出现相应数量的空穴。自由电子和空穴总是相伴而生，成对出现，称之为电子-空穴对。另一方面，自由电子在运动中又会与空穴重新结合而消失，这是一种相反的过程，叫做复合。在一定温度下，电子-空穴对既产生又复合，达到相对的动态平衡。这时，产生与复合过程虽然在进行，但是电子-空穴对却维持一定的数目。载流子的浓度不仅与半导体材料的性质有关，还对温度十分敏感，对于硅材料，温度每升高 8°C ，载流子的浓度大约增加一倍；对于锗材料，温度每升高 12°C ，载流子的浓度大约增加一倍。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体中，载流子的数目有限，导电能力很低。如果掺入微量的杂质，导电性能就会发生显著改变。由于掺入杂质的性质不同，分成N型半导体和P型半导体。

一、N型*半导体

在硅（或锗）晶体中掺入少量的5价元素磷P（或砷、锑），则硅晶体中某些位置的硅原子被磷原子代替，如图1.1.3所示。磷原子有5个价电子，它的4个价电子与相邻硅原子组成共价键后，还多余一个价电子。这个多余的价电子不受共价键的束缚，而只受自身原子核的束缚，这种束缚力比较弱，只需少量的能量，就能挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。在室温下，几乎所有多余电子都能成为自由电子。

上述杂质半导体，除了杂质给出自由电子外（注意杂质给出自由电子的同时，并不产生新的空穴），原晶体本身也产生少量的电子-空穴对。故这种杂质半导体，自由电子是多数载

* N型: N type

流子，简称“多子”，空穴是少数载流子，简称“少子”。通常这种杂质半导体叫做N型半导体或电子半导体。

二、P型*半导体

在硅（或锗）晶体中掺入少量的3价元素硼B（或镓、铟），如图1.1.4所示。由于硼原子只有3个价电子，与相邻的硅原子组成共价键时，缺少一个电子而产生一个空穴。这样每个杂质原子都会提供一个空穴，从而使空穴载流子的数目大大增加成为多子，自由电子因浓度降低而成为少子，故这种杂质半导体叫做P型半导体或空穴半导体。

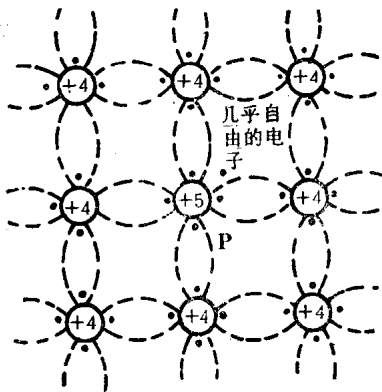


图1.1.3 N型半导体结构

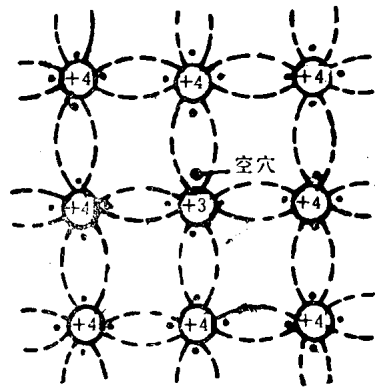


图1.1.4 P型半导体结构

1.1.4 PN**结的特性

通过掺杂使一块半导体的一边形成P型半导体，另一边形成N型半导体，则在两种半导体的交界面附近形成一个具有特殊性质的薄层，叫做PN结，如图1.1.5所示。

一、开路PN结

P型半导体与N型半导体结合在一起时，在交界的地方必然发生由于电子与空穴的浓度不均匀分布，而引起的载流子从浓度高的区域向浓度低的区域扩散的现象。扩散到N区的空穴与电子复合，扩散到P区的电子与空穴复合，这在交界面附近，出现了由不能移动的带电粒子组成的空间电荷区。P型侧为负粒子区（用 $\ominus$ 表示），N型侧为正粒子区（用 $\oplus$ 表示），它们形成了一个由N区指向P区的电场（内电场）。内电场对多子的扩散不利，却有利于少子向对方区域运动。载流子在电场作用下的定向运动叫做漂移运动。从N区漂移到P区的空穴，填补了P区失去的空穴；从P区漂移到N区的电子，填补了N区失去的电子，从而使空间电荷减少，内电场削弱，又有利于扩散而不利漂移。

由此可见，扩散与漂移既相互联系，又相互矛盾。扩散使空间电荷区加宽，内电场增强，反过来对扩散阻力增大，使漂移容易进行；而漂移又使空间电荷区变窄，内电场削弱，这又使扩散容易而阻碍漂移。开始时，扩散占优势，随着扩散进行，空间电荷区加宽，内电场增强，于是漂移也不断增强，当漂移运动与扩散运动达到相等时，便处于动态平衡状态。此时，两边虽然仍有载流子的往返，但扩散多少又漂移多少，PN结中的电流为零，空间电荷不再增加而形成相对稳定状态。

* P型: P type
** PN junction

二、PN结的单向导电性

1. 外加正向电压

PN结外加正向电压，即电源的正极接P区，电源的负极接N区，如图1.1.6所示，这种接法叫做正向偏置。

PN结正向偏置时，内电场因与外电场相反而受到削弱，空间电荷减少，这有利于多子

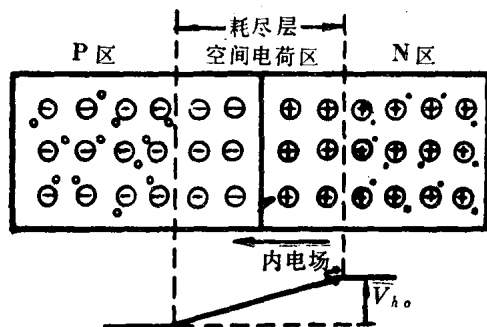


图1.1.5 无外加电压的PN结

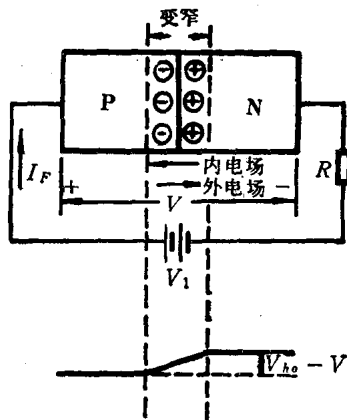


图1.1.6 PN结加正向电压

的扩散而不利子少子的漂移。多子的扩散通过回路形成正向电流 i_F 。此时，加上不大的正向电压，就可产生相当大的正向电流，为避免烧坏PN结，在回路中串入电阻 R 来限流。

2. 外加反向电压

外加反向电压，就是电源的正极接N区，电源负极接P区，这种接法也叫做反向偏置，如图1.1.7所示。

PN结反向偏置时，外电场使空间电荷增加而加强内电场，阻碍扩散而有利于漂移。少子的漂移形成反向电流 i_R 。由于少子数量有限（当温度一定时，少子的浓度不变），因此，反向电流不仅很小，而且在一定范围内基本上不随外加电压变化，故反向电流又叫做反向饱和电流 I_s 。

由此可知，PN结正向偏置时，形成较大的正向电流，PN结反向偏置时，反向电流很小，这就是PN结的单向导电性。

三、PN结电容

PN结具有电容效应，按形成的原因不同分势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 。

1. 势垒电容 C_b

PN结的空间电荷随外加电压变化而形成电容效应，该效应叫做势垒电容，记为 C_b 。外加正向电压增加时，P区的空穴和N区的电子扩散到对方区域而中和一部分带电粒子，就象一部分电子和空穴“存入”PN结，相当于势垒电容充电；外加电压减小时，又有一部分电子和空穴离开PN结，好似一部分电子和空穴从PN结中“取出”，相当于势垒电容放电。当外加电压不变时，空间电荷量也保持不变，势垒电容无充放电现象。因此，势垒电容只在外加电压变化时才起作用，外加电压频率越高，其作用越显著。

2. 扩散电容 C_d

外加正向电压时，PN结两侧的载流子加速向对方区域作扩散运动。载流子扩散到对方

区域并不立即复合消失，而是在一定路程内，一面继续扩散，一面复合消失。于是，P区积累（存入）大量的电子，N区存入大量的空穴。存入电荷的多少随外加电压变化，也是一种电容效应，该效应用扩散电容 C_d 来描述。

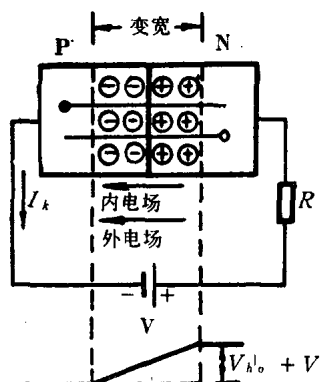


图1.1.7 PN结加反向电压

PN结的等效电路如图1.1.8，其中结电容 C_j 为势垒电容与扩散电容之和，即

$$C_j = C_d + C_s$$

正向偏置时，扩散电容较大；反向偏置

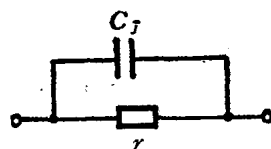


图1.1.8 PN结等效电路

时，以势垒电容为主。 C_d 和 C_s 一般为几至几百皮法。

§1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和特性

一、二极管的结构

半导体二极管是由一个PN结加上两个引出电极，再由管壳封装而成。P区引出电极叫阳极（正极），N区引出电极叫阴极（负极），图1.2.1中示出了一些常见二极管的结构图和符号。

二极管的类型很多，按所用材料来分，有硅二极管和锗二极管。按结构来分，有点接触型、面结触型。点接触型二极管PN结的面积小，不允许通过较大的电流，但它们的结电容小，可以在高频下工作，最高工作频率可达几百兆赫，适用于检波和小功率整流。面结触型二极管PN结的面积大，可通过较大的电流，但结电容也大，宜作低频整流用。此外还有一种开关型二极管，在脉冲数字电路中作为开关管。

二、二极管的特性

二极管的性能常用伏安特性来表示，如图1.2.2所示，它是二极管两端的电压 v 和流过管子的电流 i 之间的关系曲线。可以通过实验测得。

1. 正向特性

当正向电压比较小时，正向电流几乎为零，只有在外加电压超过一定数值时，才有明显正向电流，这个数值的电压叫做死区电压，或开启电压，其大小与环境温度及材料有关。硅管的死区电压 V_T 约为0.5V，锗管 V_T 约为0.1V。当外加电压高于死区电压后，电流随电压基本上按指数规律增长，二极管处于导通状态。当正向电流达到一个较大数值再增加时，二极管两端电压变化很小，几乎接近一个常数，通常硅管为0.6~0.8V，锗管为0.2~0.3V。

2. 反向特性

二极管两端加反向电压时，反向电流的值很小，当反向电压超过零点几伏后，反向电流

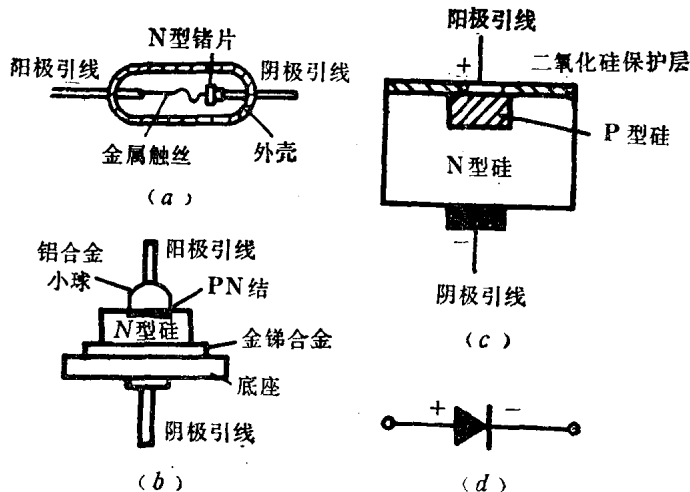


图1.2.1 二极管结构和符号
(a)点接触型 (b)面接触型 (c)平面型 (d)符号

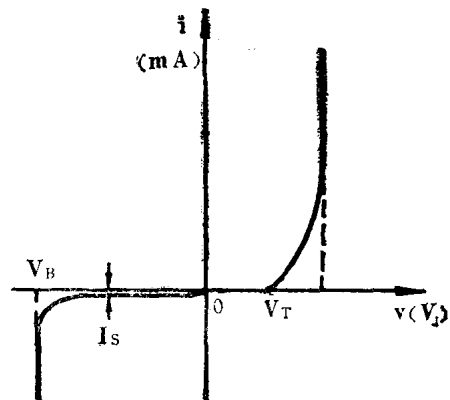


图1.2.2 二极管的伏安特性

不再随反向电压而增大，这个电流叫做反向饱和电流 I_S 。硅管的反向电流比锗管小得多。

3. 反向击穿特性

当反向电压增加到一定数值（反向击穿电压 V_B ）时，反向电流将突然激增，这种现象叫做反向击穿。

导致二极管击穿的原因有两种：

当半导体材料的掺杂浓度较高时，耗尽层的宽度很窄，在不大的反向电压之下，耗尽层中的电场强度也可能达到很高的值，这样高的电场强度将直接破坏耗尽层中原子间的共价键结构，把电子从共价键“拉”出来，形成大量的电子-空穴对，于是反向电流急剧增大，这种击穿叫做“齐纳击穿”。

如果耗尽层的宽度相对来说比较宽，当反向电压升高时，少数载流子在漂移过程中受到电场的作用而不断被加速，这些载流子获得足够的动能，当它们与共价键中的电子发生碰撞时，能够将其“撞”出共价键，产生电子-空穴对，而这些新的电子和空穴被加速又去撞击其它价电子，于是发生雪崩式的连锁反应，结果反向电流迅速增大。这种击穿叫做雪崩击穿。

上述两种击穿叫做电击穿。电击穿是可逆的，只要反向电压降低后，仍可恢复原状。但是，当反向电压接近或超过 V_B 时，如果没有适当的限流措施，就会因电流大，电压高，使管子过热造成永久性的损坏，这叫做热击穿。电击穿往往为人们利用（如稳压管），而热击穿必须避免。

4. 二极管方程

根据理论分析，PN结二极管电流与端电压的关系可表示为

$$i = I_S(e^{v/V_T} - 1)$$

式中 I_S 为反向饱和电流， $V_T = KT/q$ 为温度的电压当量，其中 K 为玻耳兹曼常数， T 为热力学温度， q 为电子的电量。在常温（300K）时， $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

由理想二极管方程可知，正向偏置时，只要 $v \gg V_T$ ，则 $i \approx I_S e^{v/V_T}$ ，即电流 i 与电压 v 基本上成指数关系。反向偏置时，只要 $|v| \gg V_T$ ，则 $i \approx -I_S$ 。

5. 二极管的温度特性

二极管的特性对温度很敏感。常温下, 温度每升高 1°C , 正向压降减少 $2\sim 2.5\text{mV}$; 温度每升高 10°C , 反向电流约增大一倍。

1.2.2 二极管的主要参数

二极管的性能除了用伏安特性表示外, 还可用一些称为参数的数据来描述。二极管的主要参数有下面几个:

一、最大平均整流电流 I_F

它是指二极管长期使用时, 允许流过的最大正向平均电流。实际使用时的工作电流应小于 I_F , 如果超过此值, 将引起PN结过热而损坏。

二、最高反向工作电压 V_R

V_R 为工作时二极管两端所允许加的最大反向电压。超过此值, 二极管可能被击穿。为安全起见一般取 $V_R = V_B/2$ 。

三、反向电流 I_R

I_R 为在室温条件下, 管子加上最高反向电压时的反向电流值。该值小, 管子的单向导电性好, 且受温度的影响小。硅管的反向电流较小, 一般在几微安以下, 而锗管为硅管的几十到几百倍。

四、最高工作频率 f_m

结电容的存在限制了二极管的工作频率, 如果管子所加电压的频率极高, 高频电流将直接从结电容通过而破坏PN结的单向导电性。所以, 各种型号的二极管都规定有一个最高工作频率 f_m 。

五、二极管的电阻

1. 直流电阻 R_D

二极管两端所加直流电压 V_D 与通过它的直流电流 I_D 之比, 定义为二极管的直流电阻 R_D ,

即 $R_D = \frac{V_D}{I_D}$ 。一般, 正向电阻小, 约为几十

欧到几千欧, 而反向电阻大, 约为几十千欧到几百千欧。

2. 交流电阻 r_d

二极管在小信号运用时, 常用到交流电阻(或微变电阻), 定义为特性曲线工作点附近电压的变化量 ΔV 与相应的电流变化量 ΔI 之比, 其值也可由二极管方程式导出:

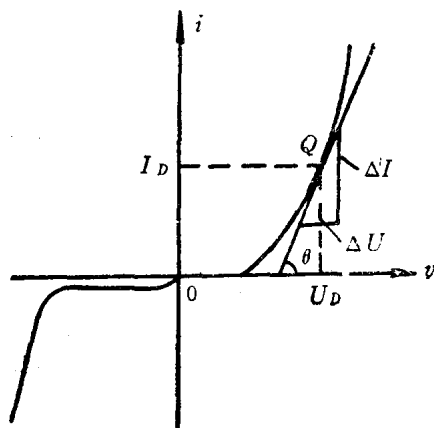


图1.2.3 由伏安特性求电阻

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\Delta I}{\Delta V} \approx \frac{dI}{dV} = d[I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)] / dV = \frac{1}{V_T} I_s e^{\frac{V}{V_T}} \approx \frac{I_D}{V_T}$$

即

$$r_d = V_T / I_D$$

一
二
三
四
五
六
七
八
九
十
十一
十二
十三
十四
十五
十六
十七
十八
十九
二十
二十一
二十二
二十三
二十四
二十五
二十六
二十七
二十八
二十九
三十
三十一
三十二
三十三
三十四
三十五
三十六
三十七
三十八
三十九
四十
四十一
四十二
四十三
四十四
四十五
四十六
四十七
四十八
四十九
五十
五十一
五十二
五十三
五十四
五十五
五十六
五十七
五十八
五十九
六十
六十一
六十二
六十三
六十四
六十五
六十六
六十七
六十八
六十九
七十
七十一
七十二
七十三
七十四
七十五
七十六
七十七
七十八
七十九
八十
八十一
八十二
八十三
八十四
八十五
八十六
八十七
八十八
八十九
九十
九十一
九十二
九十三
九十四
九十五
九十六
九十七
九十八
九十九
一百

二极管的参数是正确使用二极管的依据，一般半导体器件手册中都给出不同型号管子的参数，但这些参数是在一定条件下测得的。应用时，应注意这些条件，若条件改变，相应的参数值也会发生变化。

1.2.3 二极管应用举例

基于二极管的单向导电特性，其用途很广，下面介绍两种应用电路。

例1.1 一种简单的限幅电路如图1.2.4所示。当输入信号 v_i 为正负尖脉冲波时，试作出相应的输出 v_o 的波形。（二极管为硅管，正向压降为 $0.7V$ ）。

解 首先判断二极管所处的状态。

当 $v_i < 3.7V$ 时，二极管截止相当于断开，则 $v_o = 3V$ ；

当 $v_i > 3.7V$ ，二极管导通，相当于一个值为 $0.7V$ 的恒压源，则 $v_o = v_i - 0.7V$ ，所以，输出电压 v_o 的波形如图1.2.4 (c) 所示。

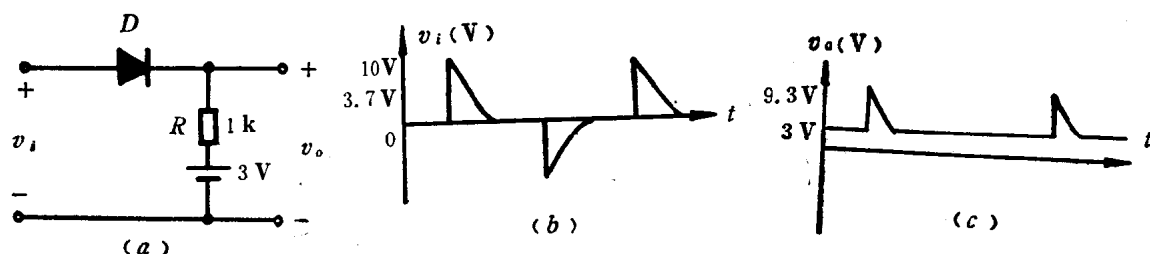


图1.2.4 限幅电路
(a)电路 (b) v_i 波形 (c) v_o 波形

例1.2 试分析图1.2.5所示电路，当 V_A 和 V_B 分别为 $0V$ 和 $3V$ 的不同组合时， V_o 的值（二极管为硅管，正向压降为 $0.7V$ ）。

解 1. 当 $V_A = V_B = 0V$ 时， D_1 和 D_2 两端的开路电压均超过 $0.7V$ 而导通， $V_o = V_D = 0.7V$ 。

2. 当 $V_A = V_B = 3V$ 时， D_1 和 D_2 两端开路电压仍超过 $0.7V$ 都导通，则 $V_o = V_A + V_D = 3.7V$ 。

3. 当 $V_A = 0V$ ， $V_B = 3V$ 时，因为 D_1 两端的开路电压大于 D_2 两端的开路电压，所以 D_1 优先导通， D_1 导通后， V_o 被限制在 $0.7V$ ，这就使 D_2 处于反向偏置而截止。则 $V_o = 0.7V$ 。

4. 当 $V_A = 3V$ ， $V_B = 0V$ 时，情况与前类似， D_2 导通， D_1 截止， $V_o = 0.7V$ 。

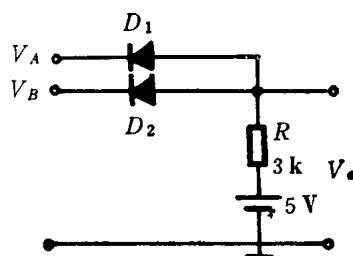


图1.2.5 二极管门电路

1.2.4 特殊二极管

除了上述普通二极管外，还有一些专供特殊用途的二极管。

一、稳压管

稳压二极管又叫做稳压管（齐纳二极管），常用做稳压器件，电路符号如图1.2.6所

模
拟
电
子
水

示。

稳压管与普通二极管不同之处在于它正常工作于反向击穿区，当外加反向电压撤除后，管子仍能恢复正常状态，这种性能叫做可逆性反向击穿。

图1.2.6(a)为稳压管的伏安特性。其正向特性与普通二极管相同，正向导通电压约为0.7V。但它的反向特性更陡些。所加反向电压小于击穿电压 V_z （又叫稳压管的稳定电压，对应于曲线中A点电压）时，反向电流极小；但当反向电压增加到 V_z 后，反向电流增加很快，这时管子处于反向击穿状态。曲线中的AB段就是稳压管正常工作的反向击穿区。稳压管正是利用该区内电流在很大范围内变化而电压基本不变的特性进行稳压的。

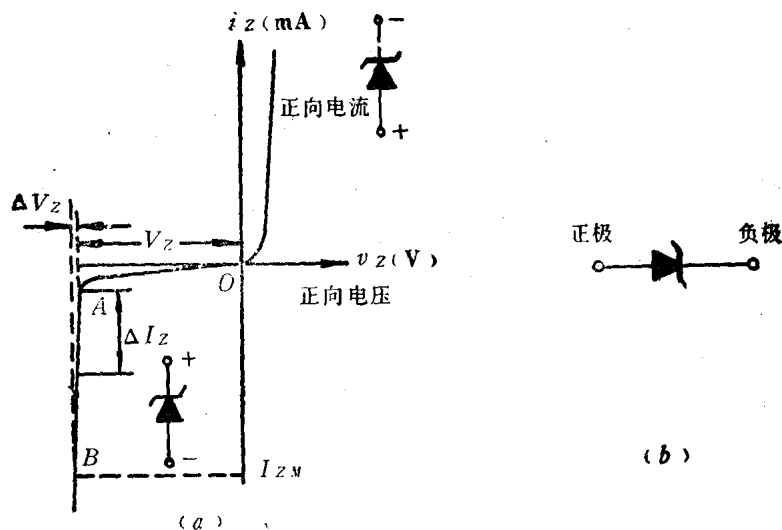


图1.2.6 稳压管
(a)伏安特性 (b)符号

稳压管的主要参数：

1. 稳定电压 V_z ：指工作在反向击穿区时稳压管的稳定工作电压。
2. 稳定电流 I_z ：稳压管正常工作时的参考电流。工作电流低于 I_z ，管子的稳压性能变差；工作电流高于 I_z ，只要不超过额定功耗，管子可以正常工作。
3. 动态内阻 r_z ： r_z 为稳压管两端电压的变化量 ΔV_z 与相应的电流的变化量 ΔI_z 之比，即

$$r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$$

其值愈小，伏安特性曲线越陡，稳压性能愈好。

4. 电压的温度系数 α_z ：当稳压管的电流保持不变时，环境温度每变化1℃时，稳定电压的相对变化量。一般说来，稳定电压大于6V的稳压管， α_z 为正值；低于6V的管子， α_z 是负值；而6V左右的管子， α_z 接近于零，受温度影响最小。

5. 额定功耗 P_z ：额定功耗 P_z 决定于稳压管的允许温升。稳压管的最大稳定电流 I_{zM} 与耗散功率之间存在以下关系： $P_z = I_{zM} \cdot V_z$ 。如果电流超过 I_{zM} 使之耗散功率值大于 P_z ，则稳压管就会烧坏。因此在实际使用中，应在稳压管电路上加限流电阻，如图1.2.7。

二、变容二极管

变容二极管，简单地说，就是一只工作在负偏压下的二极管。由前述知，二极管的结电