

成人高等学校适用教材

模拟电子技术基础

孙国祉 主编

机械工业出版社

内 容 简 介

本书是根据1983年11月审定的职工高等工业专科学校《模拟电子技术基础》教学大纲编写的。内容包括：半导体器件的基本知识、基本放大电路及分析方法、放大电路的频率响应、场效应管及其放大电路、负反馈放大电路、正弦波振荡电路、功率放大电路、直接耦合放大电路、集成运算放大器及其应用、直流电源。为了便于教学与自学，每章前有学习要求，章后有小结。

本书可供职工高等工业专科学校电机、电力、电子和自动化工程类等专业的教材，全部内容总授课时间65~75学时（不包括实验），也可供其他院校的学生、工程技术人员、业余自学者作为学习电子技术的参考书。

成人高等学校适用教材 模 拟 电 子 技 术 基 础

主 编 孙国祉

责任编辑 蔡耀辉

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版营业许可证出字第117号)

河北省保定六中印刷厂印刷

燕赵文化书社发行

开本787×1092 1/16·印张20·字数486千字

1987年6月北京第一版·1987年6月保定第一次印刷

印数 0,001—2500·定价4.60元

统一书号：15033·6724H

前 言

本书是根据1983年11月审订通过的经原教育部批准的职工高等工业专科学校《模拟电子技术基础》教学大纲编写的。在编写过程中，注意到教材的通用性，力求适应职工高等工业专科学校电类各专业的教学需要，考虑到职工学习的特点，本书选材比较精练，注意循序渐近，由浅入深，力求做到讲解清楚，概念准确，在文字叙述上通俗易懂，便于自学。每章前都明确提出学习要求，每章后都有一个学习小结。注意到联系实际和成人的特点，避免过多过深的理论探讨和设计计算，以及繁琐的数学推导。在处理电子器件与电路的关系时，本着“管用为路用”的原则，主要了解器件的外部性能，能合理选择和正确应用，把重点放在基本电路的分析和应用上，在处理分立与集成电路关系时，则以分立为集成服务的思想选择分立电路的内容。

本书由孙国祉主编，刘靖涛、陈懋文为副主编。

参加本书的编写单位有：保定职工大学、唐山大学、上海市杨浦区业余大学、开滦职工大学、张家口市职工大学、呼和浩特市职工大学、包头钢铁公司职工大学等七所成人高等学校。

参加编写的人员有：孙国祉（第一章），刘靖涛（第二章），李树清（第三、六章），黄启杰（第四章），王世维（第五章），王丽捷（第七章），俞传铭（第八章），陈懋文（第九章），遇培海（第十章）。

本书承河北农业大学李凤翔副教授主审，开滦职工大学蒋理文参加了书稿的审阅，保定职工大学张英武、屈银茹为本书描绘了全部插图，在此一并致以衷心的感谢。

由于我们水平所限，加之时间仓促，书中难免有错误和不妥之处，殷切希望使用本书的师生及读者批评指正。

编 者

1987年4月

目 录

第一章 半导体器件的基本知识..... 1	比较.....52
§ 1-1 半导体的基础知识..... 1	一、共集电极基本放大电路.....52
一、导体、绝缘体和半导体..... 1	二、共基极放大电路.....55
二、本征半导体..... 2	三、放大电路三种接法比较.....58
三、杂质半导体..... 4	§ 2-6 阻容耦合多级放大电路.....58
§ 1-2 半导体二极管..... 5	一、多级放大电路的组成和级间耦合
一、PN 结的特性..... 5	方式.....58
二、二极管的结构和伏安特性曲线..... 6	二、RC 耦合多级放大电路的电压放大
三、二极管的主要参数..... 9	倍数, 输入电阻和输出电阻.....61
四、二极管的近似等效电路..... 9	三、放大电路的动态范围.....63
五、稳压管.....10	思考题和习题.....65
§ 1-3 半导体三极管.....12	第三章 放大电路的频率响应.....74
一、基本结构.....12	§ 3-1 放大电路频率特性的概念.....74
二、电流分配和放大原理.....13	一、频率特性和频率失真.....74
三、三极管的输入特性和输出特性.....15	二、频率特性的分析方法.....76
四、三极管的主要参数.....17	§ 3-2 单级阻容耦合放大电路的频率
五、温度对三极管参数的影响.....19	特性.....80
思考题和习题.....21	一、单级阻容耦合放大电路的低频
第二章 基本放大电路及分析方法.....23	特性.....80
§ 2-1 放大电路的组成和工作原理.....23	二、单级阻容耦合放大电路的高频
一、共射基本放大电路的组成.....23	特性.....83
二、直流通路和交流通路.....25	§ 3-3 多级放大电路的频率特性.....88
三、静态工作点及其估算.....25	一、多级放大电路的低频特性.....89
§ 2-2 放大电路的图解分析法.....26	二、多级放大电路的高频特性.....89
一、静态分析.....26	三、多级放大电路的通频带.....91
二、动态分析.....30	思考题和习题.....92
三、静态工作点对放大电路性能的	第四章 场效应管及其放大电路.....94
影响.....33	§ 4-1 结型场效应管.....94
四、应用图解法对放大电路进行动态分	一、结型场效应管的结构和工作原理.....94
析的步骤.....34	二、结型场效应管的特性曲线.....97
§ 2-3 微变等效电路分析法.....35	三、结型场效应管的主要参数..... 101
一、三极管的混合参数及其等效电路.....35	四、结型场效应管的特点..... 102
二、用 h 参数等效电路分析共射基本放	§ 4-2 绝缘栅场效应管.....102
大电路.....40	一、N 沟道增强型 MOS 管的结构和工
§ 2-4 静态工作点的稳定.....44	作原理..... 102
一、温度对静态工作点的影响.....45	二、N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线
二、稳定静态工作点的射极偏置电路.....46	和参数.....105
三、其他稳定工作点的偏置电路.....51	三、N 沟道耗尽型 MOS 管..... 107
§ 2-5 放大电路三种接法的性能	四、MOS 管的输入阻抗..... 108

五、各种场效应管特性的比较.....	108	二、起振和稳幅.....	183
六、使用注意事项.....	110	三、振荡电路的组成和分析方法.....	184
§ 4-3 场效应管放大电路.....	110	§ 6-2 RC 正弦波振荡电路.....	184
一、场效应管放大电路的组成.....	110	一、移项式振荡电路.....	184
二、静态分析.....	111	二、串并联式振荡电路.....	185
三、场效应管低频微变等效电路—动态分析.....	116	§ 6-3 LC 正弦波振荡电路.....	189
思考题和习题.....	122	一、LC 并联选频网络.....	189
第五章 负反馈放大电路.....	126	二、变压器反馈式振荡电路.....	191
§ 5-1 反馈的基本概念.....	126	三、电感反馈式振荡电路.....	192
一、什么叫反馈.....	126	四、电容反馈式振荡电路.....	193
二、反馈的物理过程.....	127	§ 6-4 石英晶体振荡电路.....	194
§ 5-2 反馈的分类.....	127	一、石英晶体的基本特性及等效电路.....	194
§ 5-3 反馈放大电路的框图及基本关系式.....	132	二、石英晶体振荡电路.....	195
一、反馈放大电路的方框图.....	132	思考题和习题.....	197
二、负反馈放大电路的基本关系式.....	133	第七章 功率放大电路.....	201
§ 5-4 负反馈的四种类型.....	135	§ 7-1 功率放大电路的特殊问题.....	201
一、电压串联负反馈.....	135	一、功率放大电路的特点及主要研究对象.....	201
二、电流串联负反馈.....	137	二、功率放大电路提高效率的主要途径.....	202
三、电压并联负反馈.....	139	§ 7-2 阻容耦合单管甲类放大电路.....	203
四、电流并联负反馈.....	141	§ 7-3 变压器耦合功率放大电路.....	205
§ 5-5 深度负反馈放大倍数的近似计算.....	143	一、变压器耦合单管甲类功率放大电路.....	205
§ 5-6 负反馈对放大电路性能的影响.....	151	二、变压器耦合乙类推挽功率放大电路.....	207
一、提高放大倍数的稳定度.....	151	§ 7-4 直接耦合功率放大电路.....	210
二、扩展通频带.....	152	一、乙类基本互补对称电路.....	211
三、减小非线性失真.....	153	二、OTL 乙类互补对称电路.....	215
四、抑制内部噪声和干扰.....	155	三、复合互补对称电路.....	216
五、对输入输出电阻的影响.....	156	四、直接耦合功率放大电路实例.....	217
§ 5-7 方框图分析法.....	162	§ 7-5 功率管的散热问题.....	220
一、基本原理.....	163	思考题和习题.....	221
二、画基本放大电路的方法.....	163	第八章 直接耦合放大电路.....	225
三、分析计算步骤.....	165	§ 8-1 直接耦合放大电路及其特殊性.....	225
四、负反馈放大电路的计算实例.....	165	§ 8-2 差动放大电路.....	229
§ 5-8 反馈放大电路的自激.....	170	一、基本差动放大电路.....	229
一、自激的表现形式.....	171	二、具有射极公共电阻的差放电路.....	232
二、自激的条件.....	171	三、具有恒流源的差放电路.....	236
三、自激的消除.....	174	四、差动放大电路的几种接法.....	237
思考题和习题.....	179	思考题和习题.....	240
第六章 正弦波振荡电路.....	182	第九章 集成运算放大器及其应用.....	242
§ 6-1 振荡的基本概念.....	182	§ 9-1 集成运算放大器.....	242
一、自激振荡的条件.....	182		

一、概述	242
二、集成运算放大器电路分析	244
三、集成运算放大器的主要技术指标	251
四、基本运算放大电路	254
§ 9-2 运算电路	258
一、加法器和减法器	258
二、积分器和微分器	263
§ 9-3 信号处理电路	265
一、比较器	265
二、采样保持电路	269
三、有源滤波电路	270
§ 9-4 信号发生电路	272
一、正弦波发生器	273
二、方波发生器	273
三、三角波发生器	275
四、锯齿波发生器	277
§ 9-5 集成运放在实际应用中的 问题	278
一、集成运放的调零和自激振荡的 消除	278
二、集成运放的保护	279

三、集成运放性能的扩展	282
思考题和习题	284

第十章 直流电源 290

§ 10-1 整流电路	290
一、单相半波整流电路	290
二、单相全波整流电路	292
三、单相桥式整流电路	293
§ 10-2 滤波电路	295
一、电容滤波电路	295
二、电感滤波电路	298
三、倒L型和 π 型滤波电路	299
§ 10-3 直流稳压电路	300
一、硅稳压管稳压电路	300
二、串联型直流稳压电路	302
三、提高稳压电源性能的措施	303
§ 10-4 集成稳压电路	306
一、5G14型单片集成稳压器	307
二、SW7800系列三端式集成稳压器	309
思考题和习题	312

第一章 半导体器件的基本知识

学 习 要 求

1. 掌握二极管（包括稳压管）的特性、主要参数和近似等效电路，为今后选择和
使用二极管及分析二极管电路打下基础。
2. 掌握三极管电流分配关系，共射输入、输出特性曲线和主要参数，能合理选择
和正确使用三极管，为今后分析三极管电路打下基础。
3. 熟悉温度对二极管、三极管的特性以及参数的影响。
4. 了解 PN 结的形成，PN 结空间电荷区宽度与外加电压的关系，PN 结正向电
流和反向电流传输过程。
5. 能解释下列术语
本征半导体，杂质半导体，空间电荷区，漂移电流，扩散电流，电流放大系数。

半导体器件是组成半导体电路的核心元件，电路的性能与其所用器件的特性有密切的关系。因此学习半导体电路，必须首先了解半导体器件的基本工作原理，掌握它的工作特性和参数。半导体器件种类很多，本章只讨论半导体二极管（包括稳压管）和三极管。还有一些常用器件，以后逐步介绍。

§ 1-1 半导体的基础知识

半导体器件是近代电子学的重要组成部分，由于半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。特别是集成电路的出现，使电子装置在微型化和可靠性方面向前推进了一大步。

在研究半导体器件的特性与电路之前，先对半导体的基础知识作一简要的介绍。

一、导体、绝缘体和半导体

在自然界中，存在着许多不同的物质，有的物质很容易传导电流，称为导体；金属一般都是导体，如铜、铝、银等。也有的物质几乎不传导电流，称为绝缘体；如橡皮、陶瓷、塑料等。此外还有一类物质，它的导电性能介于导体与绝缘体之间，我们称它为半导体。

物质的导电性能，主要决定于物质内部原子与原子的结合方式和原子本身的结构。原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的，而电子又分成几层围绕着原子核不停地运动。

导体。金属材料的外层电子受原子核的束缚力很小，有大量电子能够挣脱原子核的束缚而成为自由电子。这些自由电子就成为运载电荷的载流子，它们在静电场的作用下

作定向运动，从而形成电流。所以金属的导电性能好。

绝缘体。绝缘材料中，原子的外层电子受原子核的束缚力很大，不容易挣脱出来。因此形成自由电子的机会非常少，所以导电性能很差。

半导体。半导体的原子结构比较特殊。其外层电子不象导体那样容易挣脱。也不象绝缘体束缚得很紧，这就决定了它的导电性介于导体和绝缘体之间。

二、本征半导体

纯净的单晶半导体，既不含任何杂质，也没有结构上的缺陷，称为本征半导体。

物质导电能力的大小取决于其中能参与导电的粒子——载流子的多少。例如金属中有很多自由电子作为载流子，所以导电率大，导电能力强；橡胶、陶瓷等绝缘材料中自由电子极少，所以导电能力很弱，为了了解半导体的导电性能，我们先要了解半导体中载流子的情况。

1. 两种载流子

半导体材料锗和硅的原子结构。如图 1-1-1 所示，它们的共同特点是最外层的电子都是四个，一般，原子外层的电子叫价电子，有几个价电子就叫几价元素，所以锗和硅都是四价元素

当把硅、锗等半导体材料制成单晶体时，其原子排列就由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态。其中原子之间的距离都是相等的，约为 $2.35 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 。每个原子最外层的四个电子，不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的四个原子发生联系，每两个相邻原子之间共有一对电子。电子对中间任何一个电子，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

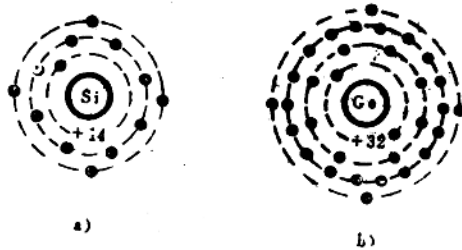


图 1-1-1 锗、硅原子结构平面示意图
a) 硅 (Si) 原子结构 b) 锗 (Ge) 原子结构

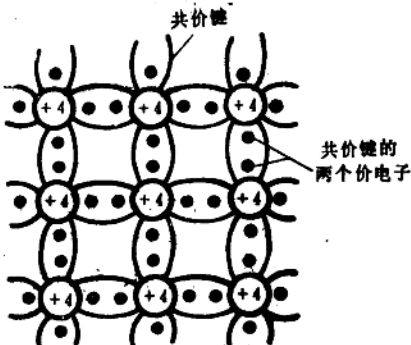


图 1-1-2 晶体的共价键结构

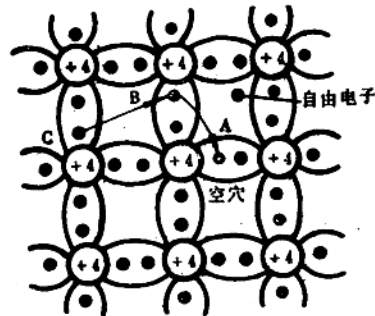


图 1-1-3 本征激发产生电子空穴对

在一定温度下，共价键中的电子因受热而获得能量。当一部分价电子得到的能量足够大时，便脱离共价键的束缚而成为自由电子。实际上，半导体中价电子所受的束缚不象绝缘体中那样紧，只要在室温条件下，便有一些价电子脱离共价键而成为自由电子

(本征载流子)。所以，在室温条件下，本征半导体便有一定的导电能力。

共价键的电子挣脱束缚成为自由电子后，在它原来所在的共价键位置上留下了一个空位这个空位叫做空穴。带有空穴的原子因为少了一个电子而带正电，我们把这个正电看成是空穴所带的正电荷量。在本征半导体中，激发出一个自由电子，同时便产生一个空穴，电子和空穴总是成对的产生，称为电子空穴对，如图 1-1-3 所示。半导体中共价键分裂产生电子空穴对的过程叫做本征激发。除了加热之外，用光或其它射线照射半导体，也能产生本征激发。

空穴也能运动，不过它的运动方式和自由电子的运动方式完全不同，空穴的运动实质上是价电子填补共价键上空位的运动结果。例如图 1-1-3 上，共价键 A 处有一个空穴，即 A 处共价键上有一个空位，附近共价键上的价电子便可能过来填补这个空位，假设共价键 B 处的电子去填补了共价键 A 处的空位，于是 A 处的空穴消失，B 处出现了空穴。这就如同空穴由 A 处移到了 B 处。如果共价键 C 处的价电子又来填补 B 处的空位，那么空穴便从 B 处移到 C 处。由于空穴带有正电荷，空穴的移动必伴随有正电荷的移动，所以空穴也是载流子。

当在半导体上加电压时，通过半导体的电流可看作是由两部分组成：一部分是自由电子定向运动形成的电子电流，另一部分是价电子递补空穴所形成的空穴电流。两者的区别是，由于电子电流是带负电的电子的定向运动，空穴（它的运动方向和电子相反）电流是带正电的空穴的定向运动。所以半导体中，不仅有电子载流子，而且还有空穴载流子，这是半导体导电的一个重要特征。

半导体中载流子的多少用单位体积中载流子的个数表示。 n 表示单位体积中电子的个数，叫做电子浓度； p 表示单位体积中空穴的个数，叫做空穴浓度。用 n_i 和 p_i 分别表示本征半导体中的电子和空穴浓度。因为本征半导体中，电子和空穴总是成对产生，所以必定有 $n_i = p_i$ 。

2. 载流子的产生与复合

半导体由于热激发而不断产生电子空穴对，但在一定温度下电子浓度和空穴浓度都保持一个定值。这是因为热运动不断产生自由电子，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，成对出现的。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。载流子浓度愈大，复合的机会就愈多。当本征载流子浓度增大到一定数值时，单位时间内复合的载流子数目将增大到和激发的载流子数目相等。于是载流子浓度就处于动态平衡而保持一定的数值。

温度升高时，热激发作用增强，单位时间内产生的载流子数目增加，载流子浓度增大，由此可知，半导体的电阻率将随温度升高而迅速减小。

因半导体中有两种载流子，所以在外加电压作用下，流过半导体的电流 I 是由电子电流 I_n 和空穴电流 I_p 所组成 ($I = I_n + I_p$) 如图 1-1-4 所示，但是在室温下，本征载流子的浓度比金属导体中载流子浓度要小的多，因此本征半导体电阻率比金属导体要大得多，在相同的

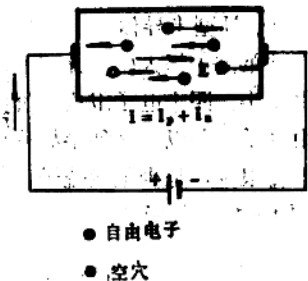


图 1-1-4 本征半导体中的电流

条件下，流过本征半导体的电流要比流过金属导体的电流小得多。

三、杂质半导体

上面分析的是纯单晶半导体。在这种半导体中，虽然多了一种空穴载流子，但是，载流子的总数仍然很少，导电能力较差，所以本身用途不大。然而，人们能够利用在纯单晶半导体中掺入有用杂质的方法，精确的控制半导体的电学特性。例如，硅单晶中掺入少量的硼，就能使半导体中空穴载流子的数目剧增，导电能力大大加强，因此半导体获得了极为重要的用途。

1. P型半导体

图 1-1-5 a 所示，是在硅单晶中掺入硼原子后，由硼原子和硅原子组成的共价键结构的示意图。由于硼原子的数目比硅原子要少得多，因此整个晶体结构不变。硼是三价元素，外层只有三个电子，所以当它与硅原子组成共价键时，就会形成空穴。掺入的硼杂质，每一个原子都能够提供一个空穴，从而使硅单晶中空穴载流子的数目大大增加。在这种半导体中几乎没有自由电子，主要靠空穴导电，所以叫做空穴半导体，简称 P 型半导体。在这种半导体中空穴很多很多，自由电子很少很少，空穴浓度远远大于自由电子浓度，所以把空穴叫做多数载流子，把电子叫做少数载流子。

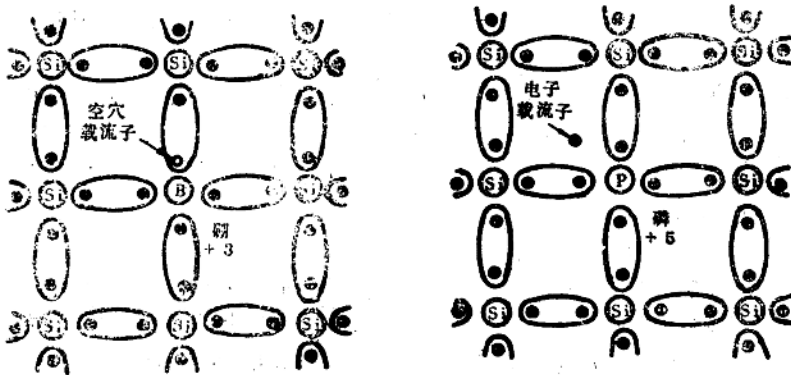


图 1-1-5 硅单晶掺杂示意图

a) 硅中掺硼形成空穴 (P型) b) 硅中掺磷形成自由电子 (N型)

2. N型半导体

硅单晶中掺入磷、锗等五价元素，硅原子和磷原子组成共价键后，磷原子外层的五个电子中，四个电子组成共价键，多出的一个电子受原子核的束缚很小，因此很容易成为自由电子。所以在这种半导体中，电子载流子的数目很多，是多数载流子，空穴载流子的数目很少，是少数载流子，主要靠电子导电，故叫做电子半导体，简称 N 型半导体，如图 1-1-5 b 所示

§ 1-2 半导体二极管

一、PN结的特性

1. PN结内部载流子的运动

当P型半导体和N型半导体联结为一体时,在交界的地方就必然发生由于两边载流子浓度的不均匀分布而引起电子和空穴的扩散运动——P区的空穴向N区扩散、N区的电子向P区扩散,见图1-2-1a、b。随着扩散的进行,P区空穴减少,出现带负电的粒子区(用 \ominus 表示);N区的电子减少,出现带正电的粒子区(用 \oplus 表示)。因此在交界面的两边便产生了内部电场,其方向正好和扩散运动的方向相反,由N区指向P区,见图1-2-1c。这样,带正电的空穴向N区扩散和带负电的自由电子向P区扩散,都要受到这个内部电场的阻力。当扩散运动进行到交界面两边的电荷不再增加时,达到动态平衡状态。动态平衡时,在交界面附近产生的缺少载流子的区域,叫做空间电荷区、耗尽区或耗尽层,如图1-2-1c所示。它就是PN结,耗尽层很薄,约为数十微米,其中可以认为都是不能移动的正负离子。

动态平衡时,PN结中不仅有多数载流子(P区中的空穴,N区中的电子)的扩散,而且还有少数载流子(P区中的电子,N区中的空穴)的漂移。所谓漂移,就是载流子在电场作用下的定向运动。PN结中的内部电场,只阻止多数载流子的扩散,对少数载流子反而起着吸引作用,只要它们靠近PN结,就会被内部电场拉到对方区域中去。因此,在动态平衡状态,当P区空穴向N区扩散产生扩散电流时,必然就会有一个数量相同的空穴漂移电流由N区流向P区,两者方向相反数值相等。同理,电子的扩散电流也必然被电子的漂移电流所抵消。所以,在无外加电场或其他激发因素(例如光的照射)作用时,PN结中没有电流通过。

2. PN结加正向电压

PN结加正向电压——电源正极接P,负极接N,这种连接方式称为正向接法,见图

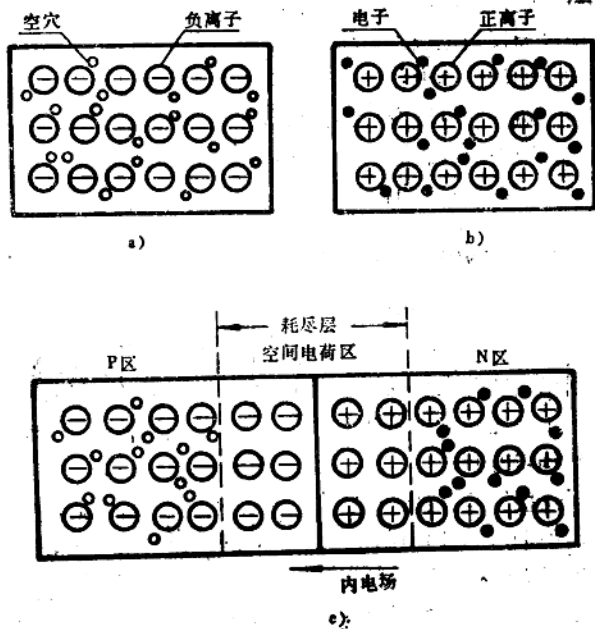


图1-2-1 PN结载流子的运动

a) P型半导体 b) N型半导体 c) 平衡状态下的PN结

1-2-2。正向接法时，外加电场与内部电场方向相反，因而削弱了内部电场，使空间电荷量和耗尽层的宽度都减小，N区中的电子和P区中的空穴都能够较顺利越过PN结，形成较大的扩散电流。至于漂移电流，本来就是少数载流子的运动形成的。而少数载流子的数量又很少，故对总电流的影响可以忽略。所以正向接法使PN结转化为导通状态，导通时电阻很小。

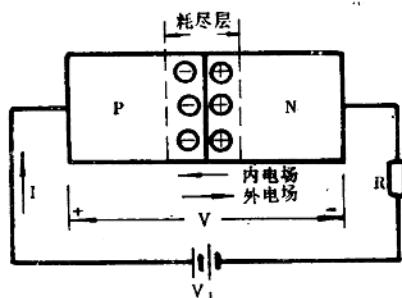


图 1-2-2 外加正向电压

3. 外加反向电压

PN 结加反向电压——电源正极接 N，负极接 P，这种连接方法称为反向接法，见图 1-2-3。反向接法时，外加电场与内部电场方向一致，空间电荷量和耗尽层都大大增加，因此扩散运动难以进行，扩散电流大大减小，而漂移电流则基本不变，通过 PN 结的电流主要是漂移电流。反向接法时产生的电流称为反向电流，由于温度不变时，少数载流子的浓度不变，因而反向电流在一定范围内不随外加电压变化，故称之为反向饱和电流。因为少数载流子的数量有限，反向电流很小，可以认为基本不导电，所以反向接法时，PN 结转化为截止状态。

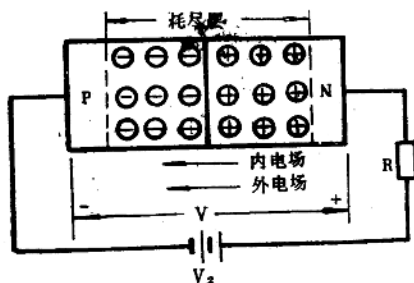


图 1-2-3 外加反向电压

二、二极管结构和伏安特性曲线

1. 二极管的结构

半导体二极管是PN结加上引出线和管壳构成的。图 1-2-4 是几种常见类型二极管的结构示意图。

点接触型二极管的特点是PN结面积小，因而结电容小，适用于高频(几百兆赫)工作。面接触型二极管由于结的面积大，允许通过的正向电流大，常用作整流管，但这种结构的结电容大，只能在较低的频率下工作。硅平面二极管，结面积较大时，可以通过较大的电流，适用于大功率整流，结面

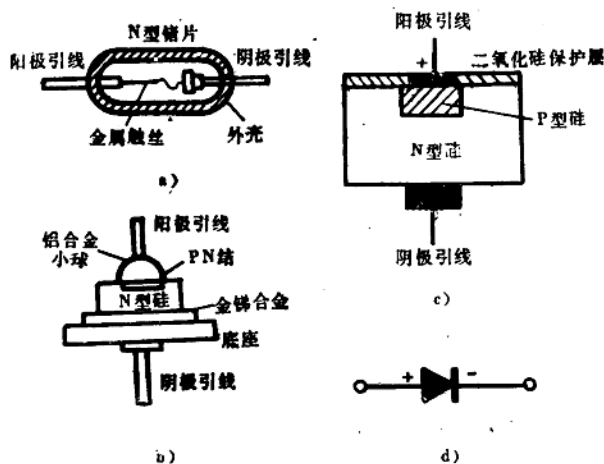


图 1-2-4 半导体二极管的结构及符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型 d) 符号

积较小时, PN 结电容小, 常用在脉冲数字电路中作开关管。图 1-2-4 d 所示是二极管的符号。

2. 二极管的伏安特性曲线

二极管的基本特性是单向导电性, 这一特性可用加在二极管两端的电压和流过二极管的电流的对应关系, 即伏安特性曲线表示。二极管的伏安特性曲线如图 1-2-5 a。图 1-2-5 b 是二极管伏安特性曲线的测试电路。由图可知, 二极管的伏安特性曲线正、反两个方向是不对称的, 下面将按此曲线的三个部分予以讨论。

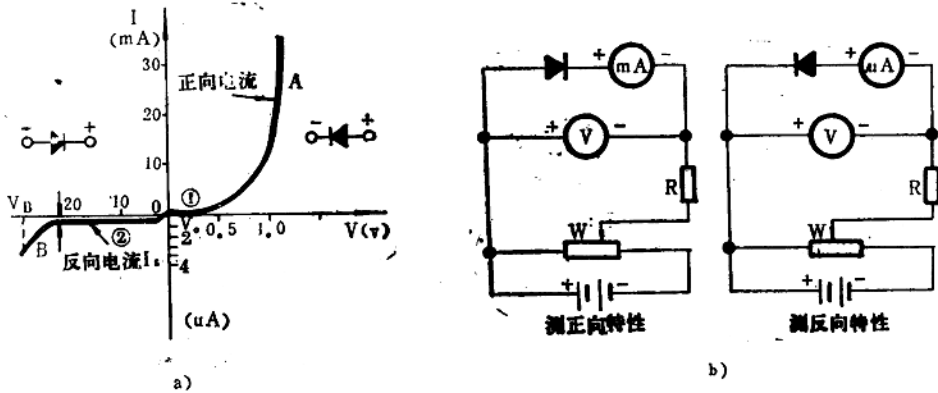


图 1-2-5 二极管伏安特性曲线及其测试电路

(1) 正向特性部分: 对应于图 1-2-5 a 中的①段。当正向电压比较小时, 由于外部电场还不足以克服内部电场对载流子扩散运动所造成的阻力, 因此这时的正向电流仍然很小, 二极管呈现的电阻较大, 当二极管两端的电压超过一定的数值 V_D 以后 (V_D 称为死区电压随管子的材料和温度的不同而不同), 内部电场将被大大削弱, 二极管的电阻变得很小, 正向电流开始显著增加。硅管的死区电压一般为 0.5V, 锗管的死区电压不象硅管那样显著, 一般可以认为在 0.1V 左右。

(2) 反向特性部分: 外加反向电压而且在一定的电压数值范围内, 二极管只有很小的反向电流通过, 其大小几乎不变, 此时二极管呈现很大的反向电阻而处于截止状态。如图 1-2-5 a 中②段所示

二极管截止时的反向电流是 PN 结内少数载流子形成的, 由于电极之间存在着漏电流, 所以二极管的反向电流中还包含有电极间的漏电流。反向电流小, 说明二极管反向截止性能好。硅管的反向电流是纳安级 (nA) 比锗管反向电流微安级 (μA) 小得多, 因硅管的本征载流子浓度比锗的本征载流子浓度要小得多。

(3) 反向击穿部分: 当反向电压高到一定数值时, 有可能因外加的电场过强, 破坏共价键而把价电子拉出, 使少数载流子数目急剧上升, 强电场也可能引起电子与原子的碰撞, 产生新的电子空穴对, 引起载流子的数目剧增。这两种因素所产生的现象称为电击穿, 如图 1-2-5 a 中所示。这个电压叫反向击穿电压 V_B , 如果二极管的反向电压接近或超过这个数值, 而没有适当的限流措施, 将会因电流大, 电压高使管子过热而造成永久性的损坏, 这叫做热击穿。

根据理论分析，二极管电流 I 与管子两端电压 V 的关系可由下式表示：

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1-2-1)$$

式中： q —— 电子的电荷量，等于 1.60×10^{-19} 库；

T —— 是绝对温度，单位是 $^{\circ}\text{K}$ ；

k —— 是一个常数，等于 1.38×10^{-23} 焦耳/ $^{\circ}\text{K}$ ；

I_s —— 反向饱和电流，与 PN 结的结构和制造工艺等有关，与外加电压无关。当 PN 结制成后它基本只与温度有关；

$V_T = kT/q$ ，为温度的电压当量。在绝对温度 300°K 时， $V_T \approx 26\text{mV}$

当 V 比 V_T 大，满足 $e^{\frac{V}{V_T}} \gg 1$ 时式 (1-2-1) 可近似为：

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \approx I_s e^{\frac{V}{V_T}} \quad (1-2-2)$$

当 V 为负值，且满足 $e^{\frac{V}{V_T}} \ll 1$ 时，则

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \approx -I_s \quad (1-2-3)$$

事实上，只要 $V > 100\text{mV}$ ，此时 $e^{\frac{V}{V_T}} \approx e^4 \approx 54.6$ 就可认为 $I \approx I_s e^{\frac{V}{V_T}}$ 。同理，只要 $V \leq -100\text{mV}$ ，就可认为 $I \approx -I_s$ 。

图 1-2-5a 所示为二极管的实际伏安特性曲线，与理论分析式〔式(1-2-1)〕所反映电流的变化规律基本上是一致的，但两者还是有些不同。例如，二极管的反向击穿特性在式 (1-2-1) 中无法反映

3. 二极管的电容效应

(1) 结电容

二极管除了具有单向导电特性外，还有一定的电容效应，其中之一就是结电容。结电容是由耗尽层引起的。前面已经指出，耗尽层内只有不能移动的正负离子，相当于存储的电荷；耗尽层内缺少导电的载流子，导电率很低，相当于介质；而两侧的 P 区和 N 区的导电率相对来说比较高，相当于金属；当外加电压改变时，耗尽层的电荷量将随着改变。这些现象都和电容的作用类似，这个电容称为结电容。又称势垒电容，记作 C_B 。

结电容的作用如下：若在 PN 结两端加正向电压，外加电场将使多数载流子向交界面运动，则耗尽层中的电荷量减少，耗尽层变窄，相当于结电容“放电”，见图 1-2-6a，而当 PN 结加反向电压时，外加电场使多数载流子背离交界面运动，则耗尽层中的电荷量增加，耗尽层变宽，相当于结电容“充电”，见图 1-2-6b。这种充放电效应与普通电容在外加变化电压作用下的充放电效应类似，不同之处在于结电容并非常数，而是和外加电压有关。 C_B 虽然在反向电压作用时数值小，但此时由于与结电容并联的结电阻很大，因此电容的作用显著。而在加正向电压时，结电阻很小， C_B 虽然大，但作用不明显。所以在反向偏压时应注意结电容的存在，尤其高频使用时更应考虑结电容的影响。一般情况下结电容为几个皮法至一、二百皮法。

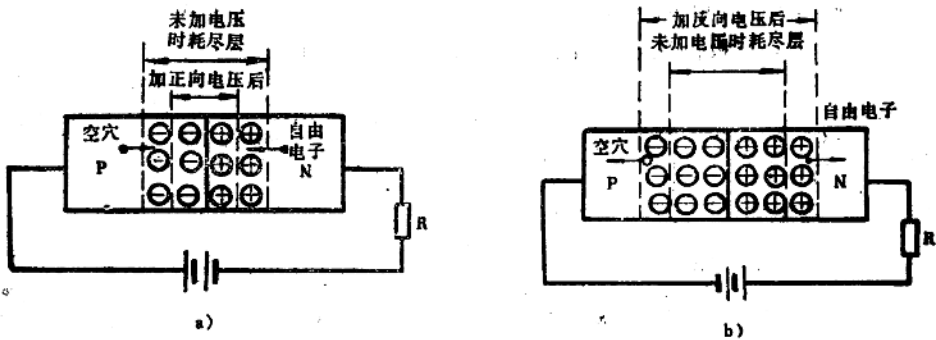


图 1-2-6 结电容充电放电效应

a) 放电 b) 充电

(2) 扩散电容

扩散电容的形成与结电容不同,它是由于N区电子和P区的空穴在互相扩散过程中的积累引起的。PN结在正向电压作用下,P区的空穴因扩散而注入到N区,愈靠近空间电荷区空穴愈多,远离空间电荷区,其浓度减小。也就是说在P区有电子的积累,同理,在N区有空穴的积累。当PN结正向电压改变时;这种积累也随着变化。由于积累在P区的电子(或N区的空穴)随外加电压的变化而变化,就相当于PN结有一个等效电容称为扩散电容 C_D 。 C_D 和通过的电流成正比,PN结正向导电时数值较大,反向工作时可忽略。

三、二极管的主要参数

1. 最大平均整流电流 I_F 。是管子长期运行时允许通过的最大正向平均电流,是为保证二极管的温升不超过允许值而规定的限制。使用时必须注意,通过二极管的平均电流不能超过这个数值,否则将损坏二极管。

2. 最大反向工作电压 V_R 。管子反向电压若达到反向击穿电压 V_B 时,反向电流剧增,二极管单向导电性被破坏,甚至引起热击穿而损坏二极管。为了确保管子安全工作,一般给出击穿电压值的一半作为最大反向工作电压。

3. 反向电流 I_R 。是管子未击穿时反向电流的数值,反向电流越小,管子单向导电性能越好,温度对反向电流影响很大,在使用时应加以注意。

4. 最高工作频率。主要由PN结的结电容及扩散电容的大小来决定,超过这个数值,二极管单向导电性能退化。最高工作频率就是指二极管单向导电性能明显退化时的交流信号的频率。

部份二极管的参数示于表1-1。

四、二极管的近似等效电路

二极管最常用的近似方法有二种:一是忽略二极管的正向电压和反向电流,把二极管理想化为一个开关如图1-2-7所示。当外加正向电压时,二极管导通, $V_f \approx 0$,等效为一个闭合开关,当外加反向电压时;二极管截止, $I \approx 0$ 等效为一个断开的开关。另一方法是近似认为二极管正向导通时有一个固定的管压降 V_f ,于是可用一个固定的电

压源 V_r 来等效,工作电流较小时,锗管的 V_r 约为 $0.2 \sim 0.3V$,硅管约为 $0.6 \sim 0.8V$ 。当电压 $V < V_r$ 时,二极管不通,电流为零,相当于开路。如图 1-2-8 所示。

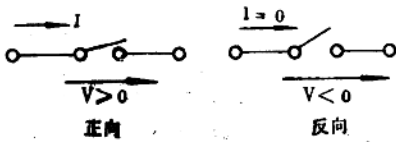


图 1-2-7 理想二极管等效电路

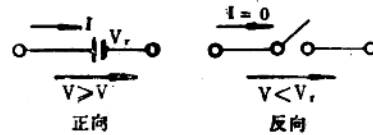


图 1-2-8 考虑正向电压降二极管等效电路

表 1-1 部分二极管的参数

参数名称 型号	最大整流 电 流 (mA)	最高反向 工作电压 (V)	反 向 电 流 (μA)	正向电压 1V时的 正向电流 (mA)	截 止 频 率 (MHZ)	结电容 (PF)	说 明
2AP1	16	20	≤ 250	≥ 2.5	150	≤ 1	点接触型锗管、检波、小电流整流
2AP2	16	30	≤ 250	≥ 1.0	150	≤ 1	
2AP3	25	30	≤ 250	≥ 7.5	150	≤ 1	
2AP4	16	50	≤ 250	≥ 5.0	150	≤ 1	
2AP5	16	75	≤ 250	≥ 2.5	150	≤ 1	
2CP21A	300	50	≤ 250	最大整流 电流时的 正向压降 $< 1V$	3 kHz		面接触型硅管 3 kHz以下整流
2CP21	300	100	≤ 250		3 kHz		
2CP22	300	200	≤ 250		3 kHz		
2CP24	300	400	≤ 250		3 kHz		
2CZ11A	1 (A)	100	≤ 600	$\leq 1V$	3 kHz		使用时应加散热器
2CZ11B	1 (A)	200	≤ 600		3 kHz		
2CZ11C	1 (A)	300	≤ 600		3 kHz		

五、稳压管

稳压管也是一种二极管,与一般二极管不同之处是它正常工作在PN结的反向击穿区。它有稳定电压的作用,故称稳压管。

当二极管反向击穿后,电流可以在相当大的范围内变化,而结两端的电压变化很小。这种电流改变而电压基本不变的特性称为稳压特性,稳压管就是利用这一特性工作的。为了利用击穿后的特性,必须限制击穿后的电流,以免功率损耗过大而将PN结烧坏。击穿电压的大小可由制造工艺过程控制。

稳压管的符号和伏安特性曲线如图 1-2-9 所示。它的伏安特性与二极管基本相同,只是稳压管正常工作时是利用特性曲线的反向击穿区。实际应用中,常常规定稳压管 V 、 I 的参考方向是:阴极高阳极低时电压 V 为正,从阳极流出时电流 I 为正。

稳压管的主要参数:

1. 稳定电压 V_z 。 V_z 是稳压管反向击穿后的稳定工作电压值。例如稳压管 2CW1 的稳定电压是 $7 \sim 8.5V$ 。由于工艺上的困难,同一型号的管子,稳定电压值有一定的分散性,就是说同样都是 2CW1 型的管子,一个稳定电压是 $7V$,而另一个却可能是

8.5V。

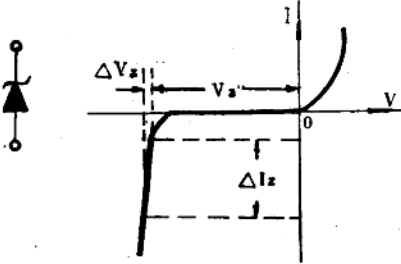


图 1-2-9 稳压管的特性和符号

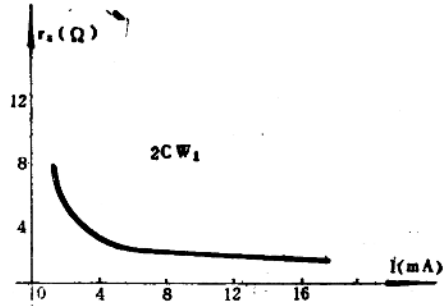


图 1-2-10 稳压管 r_z -I 曲线

2. 动态电阻 r_z 。 r_z 是稳压管在稳定工作范围内管子两端电压的变化量与相应电流变化量之比，即

$$r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z} \quad (1-2-4)$$

r_z 越小，表示稳压作用越好。一个稳压管 r_z 的大小与工作电流有关，工作电流越大 r_z 越小。图 1-2-10 是 2CW1 的 r_z 随工作电流变化的曲线。由图可见，当 $I = 2 \text{ mA}$ 时， $r_z = 4.5 \Omega$ ， $I = 5 \text{ mA}$ 时， $r_z = 2.2 \Omega$ ， $I > 5 \text{ mA}$ 时， r_z 继续下降，但变化不很明显。

3. 稳定电流。稳定电流是稳压管工作时的参考电流数值，手册上给出的稳定电压和动态电阻都是指在这个电流下的值。工作电流若小于稳定电流，则 r_z 增大，稳压性能差，工作电流大于稳定电流 r_z 减小，稳压性能好，但是要注意管子的功率损耗不要超出允许值。

4. 电压温度系数。温度变化 1°C 时，稳定电压变化的百分数，定义为电压温度系数。它是表示稳压管温度稳定性的参数。例如 2CW1 的电压温度系数是 $0.07\%/^\circ\text{C}$ ，假设 20°C 时稳定电压 $V_z = 8 \text{ V}$ ，那么 50°C 时稳压值将为

$$8 + \frac{7}{10000} \times (50 - 20) \times 8 = 8.168 \text{ V}$$

电压温度系数越小，温度稳定性越好。通常，稳定电压低于 6 V 的管子，温度系数是负的，高于 6 V 的管子，温度系数是正的，而稳定电压在 6 V 左右的管子，温度系数最小，接近于零。所以，要求温度稳定性较高的场合常选用 6 V 左右的管子，为了制造温

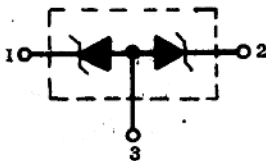


图 1-2-11 具有温度补偿的稳压管

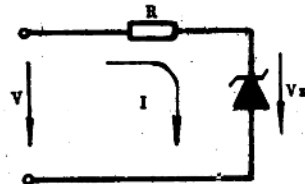


图 1-2-12 稳压管电路