

• 高等学校试用教材 •

模拟电子技术 基本教程

浙江大学
电子学教研室编

邓汉馨 主编



高等学校试用教材

模拟电子技术基本教程

浙江大学电子学教研室 编

邓汉馨 主编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书根据原教育部 1980 年制订的《高等工业学校电子技术基础教学大纲(草案)》(模拟电子技术部分)的要求编写而成。全书共分七章,内容有半导体二极管及其电路的分析方法,半导体三极管及其基本放大电路,多级放大电路,放大电路的频响分析,反馈在放大电路中的应用,波形发生与变换电路及功率电路等。每章附有小结、习题和思考题,适于作为高等院校自动控制、电力和仪表类各专业 60~70 学时的教材,也可作为工程技术人员自学与进修的参考书。

责任编辑:尹 洪

3531 63

高等学校试用教材

模拟电子技术基本教程

浙江大学电子学教研室 编

邓汉馨 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

祝 桥新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 18.375 字数 443,000

1986 年 10 月第 1 版 1986 年 10 月第 1 次印刷

印数 00,001—10,700

书号 15010·0777 定价 3.30 元

前 言

本教程是根据原教育部 1980 年组织制订的《高等工业学校电子技术基础教学大纲(草案)》(模拟电子技术部分)的要求,结合多年来教学实践经验编写而成的。初稿写成后,曾在本校电机系、科仪系各专业和化工自动化等专业中试用。在几经试用、修改的基础上,于 1984 年参加了全国同类教材的评选,并于同年 11 月在广州举行的全国高等学校工科电工教材编审委员会电子技术编审小组扩大会议上一致通过为中选教材。本书可供高等学校“模拟电子技术基础”课程 60~70 学时的教学使用。

电子技术是一门正在不断地迅速发展着的学科。从最初的真空和充气器件及其电路,经过晶体管及其电路阶段,现已发展成集成电路乃至超大规模集成电路,使器件和电路相结合,成为不可分割的组合体,给电子技术课程的教学带来了日益严重的内容和学时之间的矛盾。编写一本既能在有限的学时内较好地达到本课程的基本要求,又具有一定特色的教材是我们很久以来的愿望。

我们在反复讨论基本要求的基础上,对教材内容作了精选安排。突出基本概念、基本原理和基本分析方法,并注重从教材体系上进行探索。例如,将晶体管和场效应管基本放大电路结合在一起讨论,既可以加深对它们的放大本质和各自特点的理解,又可节省篇幅。又如为在全书中贯串“以集成为主”的思想,较早地引入了模拟集成电路的内容,并在后续章节中不断引用和加深,不但更新和精简了教学内容,而且分散了教学难点。此外,每章结尾时,还作了简明小结,归纳了本章的主要问题,并选用了一定数量的思考题和习题,以利于巩固理论和加深理解,为进一步学习电子技术

到引导的作用。

参加本教程编写工作的有陈道铎、方伟、吴国膺、姚玉明、郑家龙和邓汉馨同志。书稿的最后整理和修改工作由郑家龙同志完成。邓汉馨同志负责全书的审定工作。郑元耀、李政、于胜其、曹琴华和章安元等同志参加了编写大纲的讨论和本教程的试用。

在评选过程中，工科电工教材编审委员会电子技术编审小组的沈尚贤、童诗白、汤之璋、康华光、李士雄、吴存亚、何金茂等教授以及顾立旄等副教授对书稿提出了宝贵意见。北京工业大学的虞光楣副教授仔细审阅了书稿，并提出了评审和修改意见。参加本教程编写工作的全体同志对此表示衷心的感谢。

限于我们的水平，本教程难免会有缺点甚至错误，欢迎广大读者给与批评指正。

编 者

1985年11月

目 录

第一章 半导体二极管及其电路的分析方法	1
§1.1 半导体器件工作机理的基础	1
1.1.1 半导体的导电特性	1
1.1.2 PN 结的形成	4
1.1.3 PN 结的单向导电特性	7
1.1.4 PN 结的反向击穿特性	11
1.1.5 PN 结的温度特性	13
§1.2 整流二极管和稳压二极管	14
1.2.1 半导体二极管的结构和类型	14
1.2.2 整流二极管的特性和参数	15
1.2.3 稳压二极管的特性和参数	18
§1.3 半导体二极管电路的分析方法	22
1.3.1 图解分析法	22
1.3.2 模型分析法	28
1.3.3 二极管的基本应用电路	35
§1.4 半导体二极管中的电容效应及其影响	38
1.4.1 势垒电容的概念	39
1.4.2 扩散电容的概念	40
本章小结	44
参考文献	45
思考题和习题	45
第二章 半导体三极管及其基本放大电路	51
§2.1 双极型晶体三极管(简称晶体管)	51
2.1.1 晶体管的结构	51
2.1.2 晶体管中的电流分配与控制	53
2.1.3 晶体管的伏安特性曲线	55

2.1.4 晶体管的主要参数	64
§2.2 场效应晶体三极管(简称场效应管)	72
2.2.1 结型场效应管	73
2.2.2 绝缘栅场效应管	82
2.2.3 场效应管的特点	88
§2.3 晶体管和场效应管基本放大电路的图解分析	92
2.3.1 基本放大电路的功能和组成	92
2.3.2 基本放大电路的图解分析	96
§2.4 晶体管和场效应管基本放大电路的模型分析	115
2.4.1 晶体管的低频小信号模型	116
2.4.2 用晶体管小信号模型分析电压放大倍数	123
2.4.3 场效应管的低频小信号模型	129
2.4.4 放大器输入、输出电阻的计算	131
§2.5 放大电路的基本结构	138
2.5.1 偏置电路的结构	139
2.5.2 输入回路的结构	150
2.5.3 输出回路的结构	153
§2.6 其它基本放大电路分析	156
2.6.1 共集电极放大电路(射极输出器)	156
2.6.2 共基极放大电路	162
2.6.3 恒流源电路	164
本章小结	172
参考文献	174
思考题和习题	175
第三章 多级放大电路	189
§3.1 多级放大器中的级联问题	189
3.1.1 多级放大器的级间耦合方式	190
3.1.2 多级放大器主要指标的计算	195
§3.2 差动放大电路	206
3.2.1 差动放大电路的工作原理	206
3.2.2 射极耦合差动放大电路	209

3.2.3 采用恒流源的差动放大电路	225
§3.3 集成运算放大器	228
3.3.1 5G28 型运放的工作原理	231
3.3.2 运算放大器的主要技术指标和符号	237
3.3.3 集成运放的发展概况	243
本章小结	248
参考文献	249
思考题和习题	250
第四章 放大电路的频响分析	260
§4.1 频率响应的基本概念	260
4.1.1 放大电路频率响应的定性分析	260
4.1.2 对放大器频率特性的要求	265
§4.2 简单 RC 电路的对数频率特性	268
4.2.1 RC 高通滤波电路的频率特性	268
4.2.2 RC 低通滤波电路的频率特性	272
§4.3 基本放大电路的频率响应	274
4.3.1 晶体管的高频小信号模型	274
4.3.2 基本共射放大电路的高频特性	276
4.3.3 基本共射放大电路的低频特性	284
§4.4 对数频率特性曲线的一般绘制方法和上限频率 的确定	287
§4.5 集成运放 5G28 的频响分析	291
§4.6 基本共射放大电路的阶跃响应	296
4.6.1 阶跃响应的基本概念	296
4.6.2 上升时间与上限频率的关系	297
4.6.3 平顶倾斜率与下限频率的关系	299
本章小结	301
参考文献	302
思考题和习题	303
第五章 反馈在放大电路中的应用	31

§5.1 反馈的基本概念	310
5.1.1 开环放大器存在的问题	310
5.1.2 怎样在放大电路中引入反馈	311
§5.2 反馈放大器的方框图分析法	322
§5.3 负反馈对放大器性能的改善	326
5.3.1 提高闭环增益 A_f 的稳定性	326
5.3.2 减小频率失真, 扩展通频带	328
5.3.3 减小非线性失真	330
5.3.4 抑制放大器内部的干扰和噪声	332
5.3.5 负反馈对输出电阻的影响	333
5.3.6 负反馈对输入电阻的影响	337
§5.4 负反馈放大电路的计算	340
5.4.1 深度负反馈放大电路的近似算法	340
*5.4.2 负反馈放大电路的框图法计算举例	345
§5.5 集成运放线性应用基础	356
5.5.1 集成运放实现线性应用的基本条件	357
5.5.2 三种基本负反馈电路的特点	360
§5.6 集成运放组成的基本运算电路	372
5.6.1 和、差运算电路	372
5.6.2 积分运算电路	376
5.6.3 微分运算电路	382
5.6.4 对数和反对数运算电路	386
*§5.7 集成运放组成的其它线性应用电路	388
✓5.7.1 检测放大器	389
✓5.7.2 有源滤波器	393
✓5.7.3 采样保持器	402
§5.8 放大电路中的自激振荡问题	405
5.8.1 产生自激振荡的原因和条件	405
5.8.2 稳定判据和稳定裕度	409
5.8.3 消除自激振荡的方法	410
本章小结	421

参考文献	423
思考题和习题	424
第六章 波形发生与变换电路	436
§6.1 产生正弦振荡的条件	436
§6.2 RC 正弦波振荡器	439
6.2.1 RC 串、并联电路的选频特性	439
6.2.2 RC 桥式振荡器的工作原理	441
6.2.3 其它 RC 振荡电路	444
§6.3 LC 正弦波振荡器	448
6.3.1 LC 并联回路的选频特性	448
6.3.2 LC 振荡器的结构	452
6.3.3 振荡频率和起振条件	454
6.3.4 稳幅与稳频问题	458
*§6.4 石英晶体振荡器	461
✓ §6.5 比较器	464
§6.6 非正弦波发生器	469
本章小结	480
参考文献	481
思考题和习题	481
第七章 功率电路	491
§7.1 低频功率放大电路的特殊问题	491
7.1.1 怎样才能使负载得到尽可能大的不失真功率	491
7.1.2 功率放大器的效率问题	496
7.1.3 对功率晶体管的考虑	503
§7.2 实用功率放大电路举例	507
7.2.1 由 OTL 电路作为输出级的功率放大电路	507
7.2.2 由 OCL 电路作为输出级的功率放大电路	514
§7.3 直流稳压电源概述	517
7.3.1 整流、滤波电路概述	
7.3.2 稳压电路的性能指标	

§7.4 线性串联型稳压电路	525
7.4.1 串联型稳压电路的结构	525
7.4.2 稳压电路指标的计算	527
7.4.3 对调整管的考虑	534
7.4.4 稳压电路中的保护环节	535
§7.5 集成稳压电路	540
7.5.1 集成稳压器及其应用概述	540
*7.5.2 三端集成稳压器 CW7800 系列的原理电路	547
§7.6 开关型稳压电路	550
*§7.7 晶闸管电路	556
7.7.1 晶闸管的结构和特性	556
7.7.2 硅可控整流电路	561
7.7.3 晶闸管用作无触点开关和电流控制器	563
7.7.4 双向晶闸管	565
本章小结	568
参考文献	570
思考题和习题	570

第一章 半导体二极管及其电路的分析方法

本章将在简要地复习 PN 结基本特性的基础上, 介绍两种半导体二极管——整流二极管和稳压二极管, 然后讨论基本二极管电路的工作原理和分析方法。

§ 1.1 半导体器件工作机理的基础

电子技术发展到了今天这样先进的水平, 首先要归功于半导体材料的发现和半导体制造工艺的日益完备。无论是制造单个半导体器件, 还是制造大规模集成电路, 都需要用半导体材料作为芯片。因此, 在介绍半导体器件之前, 应当对半导体的基本性能有一定的了解, 这将有助于对半导体器件外部特性的理解。

1.1.1 半导体的导电特性

自然界中, 属于半导体的材料很多。但目前, 用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si), 其次是锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。硅和锗都是四价元素, 以后的讨论常以硅作为例子。

一、本征半导体

作为半导体器件的材料, 必须首先经过高纯度的提炼。这种几乎不含任何杂质的半导体, 称为本征半导体。高纯度的单晶硅称为本征硅。它的导电性能与硅原子最外层的四个价电子及其所处的能级有关。在热力学温度零度下, 价电子因无外界能量的激发而无法参加导电, 故呈现绝缘体的特性。

但是在常温下, 或者受到光照时, 半导体中将同时激发出两种载流子——自由电子(带单位负电荷)和空穴(带单位正电荷)。自由电子和空穴总是成对地出现, 通常称之为电子空穴对。

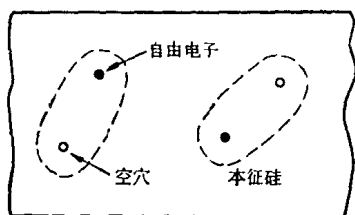


图 1.1.1 本征激发下的电子空穴对

1.1.1中所示。图中,常用小黑点表示电子,用小圆圈表示空穴。

如果用 p_i 表示本征硅在一定温度下的空穴浓度, n_i 表示电子浓度,则 $n_i = p_i$ 。值得注意的是,它们的数值很小**, 仅为硅原子密度的 $1/10^{12}$, 却与温度有着十分密切

的关系。据计算,在常温附近,大约温度每升高 10°C ,硅材料的 n_i (或 p_i) 将增加一倍。由此可见,本征半导体有很大的电阻率,而且温度对电阻率有较大的影响。

二、掺杂半导体

由于本征半导体的电阻率很大,所以不能直接用来制造半导体器件。如果人为地在本征半导体中掺入某些微量的元素作为杂质,则其导电能力将发生显著的变化。因此,只有经过精确的掺杂控制的半导体,才能制造各种不同特性的半导体器件。

1. N型半导体

如果在本征硅中采用扩散等工艺,掺入微量的五价元素如磷或砷等,便可形成N型半导体如图 1.1.2 所示。图中,符号 $\oplus$ 代表磷原子因提供了一个价电子而成为带一个单位正电荷的正离子((2)9页)。尽管所掺入的元素

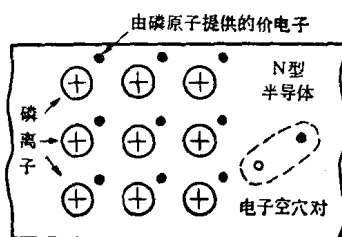


图 1.1.2 N型半导体中的载流子
(多子—电子;少子—空穴)

* 常称这种激发为本征激发。有关自由电子和空穴的形成过程和导电机理详见参考文献[2]第6~9页。

** 在常温下,本征硅的 $n_i = 1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$, 约为硅原子密度 $5 \times 10^{23}/\text{cm}^3$ 的 $1/10^{12}$ 。锗的 n_i 约为硅的两千倍。

含量极微,但由于在常温下,每个磷原子所提供的价电子都可成为自由电子,且它在数量上已远远超过了本征激发下出现的电子空穴对数目*,所以,这是一种以电子导电为主的半导体。这里的电子为多子,而空穴为少子。

2. P型半导体

如果在本征硅中掺入微量的三价元素如硼或铟等,便可形成P型半导体如图1.1.3所示。图中,符号 $\ominus$ 代表硼原子因提供了一个空穴而成为负离子(2)10页)。鉴于与N型半导体相类似的原因,P型半导体是一种以空穴导电为主的半导体。这里,空穴为多子,而电子为少子。

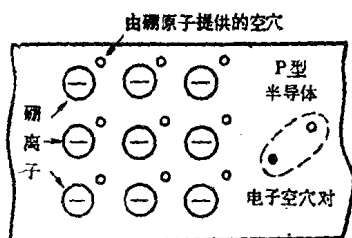


图1.1.3 P型半导体中的载流子
(多子—空穴;少子—电子)

由以上的分析可知,掺杂半导体中的多子浓度主要取决于杂质的含量,它与温度几乎没有关系;而少子的浓度则主要与本征激发有关,因而它的大小与温度有十分密切的关系。从以后的讨论中读者将会了解到,正是这一原因,给半导体器件的温度特性带来了很大的影响。

三、半导体中载流子的运动

大家知道,电流是载流子定向运动的结果。半导体中,载流子有两种运动形式:

1. 漂移运动

漂移运动是载流子在外电场 $\mathcal{E}$ 作用下的定向运动。如图1.1.4所示,空穴顺电场方向运动,而电子逆电场方向运动。由于它们所

* 在原子密度为 $5 \times 10^{23}/\text{cm}^3$ 的本征硅中,掺入百万分之一的磷原子后,将在每立方厘米的硅中产生 $5 \times 10^{23} \times 10^{-6} = 5 \times 10^{16}$ 个自由电子。这个数目比常温下,由本征激发所产生的电子空穴对的数量(1.4×10^{10})约大一百万倍。

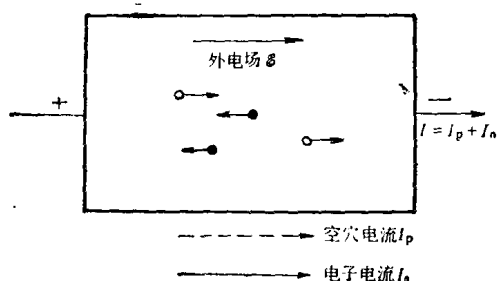


图 1.1.4 电场作用下,载流子的漂移运动

带的电荷极性相反,所以两种载流子运动所产生的电流方向一致。

设在电场 $\mathcal{E}$ 的作用下,载流子的平均漂移速度为 v ,则载流子的迁移率 μ 可表示为:

$$\mu = v/\mathcal{E}$$

漂移电流的大小显然与迁移率成正比。虽然自由电子和空穴同为半导体中的载流子,但由于所处能级不同,所以迁移率亦不同。据分析,电子的迁移率约比空穴高 2~3 倍。

2. 扩散运动

实际上,半导体的载流子浓度是在一定温度下的某一热平衡值。因为载流子不断地激发出来,又不断地相互复合,在一定温度下,激发与复合达到了动态平衡,使浓度保持某一平衡值。当半导体受到光照,或者有载流子从外界注入时,原先的热平衡被破坏。此时,新出现的非平衡自由电子或空穴将在半导体内形成浓度差,如图 1.1.5 所示。

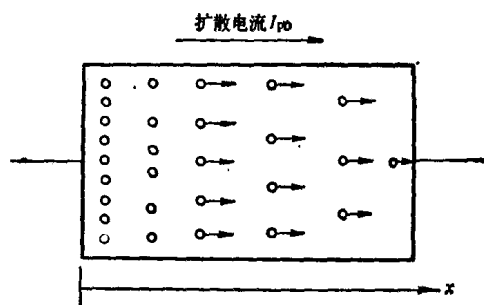


图 1.1.5 非平衡载流子(空穴)的扩散运动

载流子由浓度高的区域向浓度低的区域的扩散运动形成了扩散电流。扩散电流的大小与浓度分布曲线的斜率,即浓度梯度: dp/dx (对应于空穴)或 dn/dx (对应于电子)成正比。

1.1.2 PN 结的形成

如果在N型(或P型)半导体的基片上,采用平面扩散法等工艺*,掺入三价(或五价)元素作为补偿杂质,使之形成P型(或N型)区,则在P区和N区之间的交界面附近,将形成一个很薄的空间电荷层(其厚度典型值为 $0.5\mu\text{m}$),称为PN结,如图1.1.6(a)所示.为说明方便起见,将PN结附近的区域扩展为图1.1.6(b)的形式.

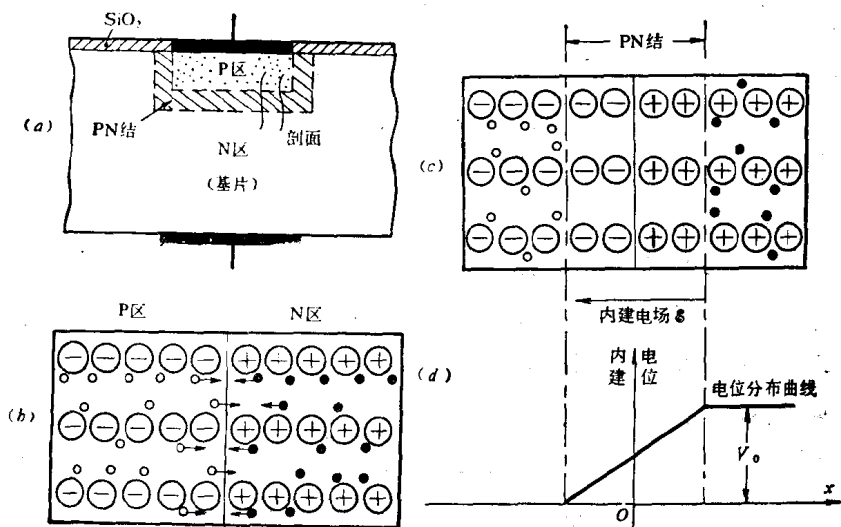


图 1.1.6 PN 结的形成

(a)用平面扩散法掺杂;(b)扩展后的P区和N区交界面;(c)PN结的形成;
(d)结区电位分布曲线

PN 结的形成过程可以这样解释.首先是由于P型和N型半导体之间存在着多子浓度的显著差异,如空穴在P区内是多子,在N区内则是少子;自由电子在N区内是多子,在P区内则是少子.因此,P区内的空穴就要向N区扩散,结果,交界面附近的P区一侧因失去空穴而留下不能移动的负离子.同样,N区内的电子将

• 制造 PN 结的工艺还有合金法和电形成法等.

向P区扩散，N区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子。扩散到对方的载流子便成为异型半导体中的少子而与该区内的多子相复合。这样，在两种半导体的交界面附近就逐渐显露出由正、负离子电荷所组成的空间电荷区，如图 1.1.6(c) 所示。由于在交界面的P区一侧呈现出负电荷，N区一侧呈现出正电荷，所以出现了方向由N区指向P区的内建电场 $\mathcal{E}$ (以下简称内电场)，从而形成了如图 1.1.6(d) 所示的电位分布曲线。 V_0 是 PN 结上的内建电位差。

内电场是由多子的扩散运动引起的。伴随着它的建立将带来两种影响：一是内电场将阻碍多子的扩散；二是P区和N区的少子一旦靠近 PN 结，便将在内电场的作用下漂移到对方。N区的少子(空穴)到达P区后将使P区的空间电荷区缩小。同时，P区的少子(电子)到达N区后，也将使N区的空间电荷区缩小。其作用恰好与多子的扩散运动相反。

由此可见，只有当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时，空间电荷区的宽度和内建电位的高度才能相对稳定下来。此时，有多少

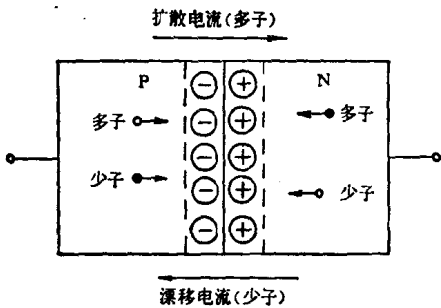


图 1.1.7 扩散电流和漂移电流的方向

少个多子扩散到对方，便必定有多少个少子从对方漂移回来。由于二者所产生的电流方向相反(如图 1.1.7 所示)，因而在动态平衡时，流过 PN 结的净电流为零。如无外加电场的作用或其它因素的激发，即使把 PN 结短路，也仍然没有电流流向外电路。

为了强调 PN 结的某种特性，有时称它为“空间电荷层”或“势垒区”；有时称它为“阻挡层”(以强调对多子扩散运动的阻挡作