

实用电子技术

模拟电子技术

秦 斌 编



实用电子技术

模拟电子技术

秦 斌 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“实用电子技术”丛书之一。作为模拟电路的入门书,首先介绍模拟电路的基础知识,如半导体基础、放大电路基础,然后进一步由浅入深地介绍低频小信号放大电路、负反馈放大电路、功率放大电路、高频放大电路、振荡电路、调制电路、解调电路、集成放大电路、电源电路等原理和技术。书中各章均配有例题及解答,以帮助读者更好地掌握所讲解的内容。

为了便于读者理解消化所学知识,本书尽量把理论图解化,并结合丰富的举例来阐述相关的内容。

本书适合电子工程、通信工程、电子技术等领域的技术人员,以及各大院校相关专业的师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/秦斌编.—北京:科学出版社,2009
(实用电子技术)

ISBN 978-7-03-024524-3

I. 模… II. ①秦… III. 模拟电路-电子技术 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 066648 号

责任编辑:孙力维 杨 凯/责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静/封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 6 月第一次印刷 印张: 18 1/2

印数: 1—5 000 字数: 355 000

定 价: 28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在电子技术高速发展的今天,我们都直接或间接地与电路打着交道。其中,数字电路和模拟电路是两大重要组成部分。数字电路处理的是脉冲等离散信号,而模拟电路处理的则是大小随时间连续变化的信号。

自然界大部分物理现象都是连续变化的模拟量,这些模拟量都是先被传感器所接收,再经过放大等加工、处理过程之后才变成人类所能感知的信息。因此,模拟技术在电子技术中显得尤为重要。

作为一本学习模拟电子技术的图书,本书共分 11 章,从半导体基础、放大电路基础入手,由浅入深地讲解了低频小信号放大电路、负反馈放大电路、功率放大电路、高频放大电路、振荡电路、调制电路、解调电路、集成放大电路、电源电路等。本书在编写过程中突出以下几个特点:

(1)通过例题与解答的形式,使读者易于理解所讲述的内容,并达到举一反三之功效。

(2)着眼于方法的介绍,而不是简单地阐述原理,结合实际应用,使读者能够学以致用。

(3)大量使用在模拟电路分析中涉及的图表,加强了本书内容的深度和广度。

本书利用大量的图表,以图解的形式对模拟电子技术的重要基础知识进行了简单易懂的论述,这样既便于读者理解学习,又增添了本书的可读性、趣味性。故编者相信,本书对于电子工程、通信工程、电子技术等领域的技术人员,以及各大院校相关专业的师生具有较强的参考价值。

由于编者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。最后,在本书出版之际,谨向在编写过程中给予帮助的同仁及科学出版社的编辑表示感谢。

目 录

第 1 章 半导体基础	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 非本征半导体	3
1.1.3 pn 结	7
1.2 半导体二极管	8
1.2.1 半导体二极管的结构、类型及符号	8
1.2.2 晶体二极管的伏安特性	9
1.2.3 伏安特性的数学表达式	11
1.2.4 二极管的主要参数	11
1.2.5 二极管应用举例	13
1.2.6 特殊二极管	15
1.3 半导体三极管	18
1.3.1 半导体三极管的结构和类型	18
1.3.2 半导体三极管的电流放大作用	19
1.3.3 半导体三极管的特性曲线	21
1.3.4 半导体三极管的主要参数	24
第 2 章 放大电路的基础	27
2.1 放大的原理	27
2.1.1 放 大	27
2.1.2 晶体管的电流放大作用	28



2.1.3 静态特性	30
2.1.4 直流和交流的分离	31
2.2 基本放大电路	35
2.2.1 工作原理	35
2.2.2 各部分的波形	35
2.2.3 偏 置	36
2.2.4 动态特性	37
2.2.5 组合特性	39
2.3 放大倍数	42
2.3.1 放大倍数	42
2.3.2 分 贝	43
2.4 h 参数和等效电路	45
2.4.1 h 参数	45
2.5 基本放大电路的放大倍数和输入、输出阻抗	49
2.6 放大电路的分类	51
第 3 章 低频小信号放大电路	55
3.1 RC 耦合放大电路的基础	55
3.1.1 RC 耦合放大的基本电路	55
3.1.2 电容的作用	56
3.1.3 用等效电路分析	58
3.1.4 最佳工作点的求法	60
3.2 频率特性和电容	61
3.2.1 信号频率和放大倍数	61
3.2.2 低频段放大倍数降低的原因	62
3.2.3 高频段放大倍数降低的原因	67
3.3 两级 RC 耦合放大电路	67
3.3.1 多级放大电路的放大倍数	67
3.3.2 两级 RC 耦合放大电路	68
3.4 射极跟随器放大电路	71



3.4.1 射极跟随器	71
3.4.2 射极跟随器的电压放大倍数	72
3.4.3 射极跟随器的输入、输出电阻	73
3.5 其他小信号放大电路	74
3.5.1 直接耦合放大电路	74
3.5.2 变压器耦合放大电路	76
第 4 章 负反馈放大电路	79
4.1 负反馈放大电路的原理	79
4.1.1 正反馈和负反馈	79
4.1.2 负反馈放大电路的原理	80
4.1.3 负反馈放大电路的特点	81
4.2 实际的负反馈放大电路	85
4.2.1 负反馈放大电路的分类	85
4.2.2 电流负反馈放大电路	86
4.2.3 电压负反馈放大电路	88
4.3 双重负反馈放大电路	90
4.3.1 局部反馈和多级反馈	90
4.3.2 双重负反馈放大电路	91
第 5 章 功率放大电路	97
5.1 功率放大电路	97
5.1.1 集电极损耗	97
5.1.2 散热的重要性	98
5.1.3 失真	99
5.1.4 A,B,C 类放大	99
5.2 A 类功率放大电路	100
5.2.1 A 类功率放大电路的特点	100
5.2.2 动态特性	101
5.2.3 失真	104



5.3 B类推挽功率放大电路	106
5.3.1 工作原理	106
5.3.2 交叉失真	106
5.3.3 动态特性	106
5.4 达林顿连接	109
5.5 SEPP 电路	111
第 6 章 高频放大电路	113
6.1 高频放大电路的基本事项	113
6.1.1 高频放大电路	113
6.1.2 理想的频率特性	114
6.1.3 用作高频晶体管的条件	114
6.2 单调谐电路	116
6.2.1 调谐电路的特性	116
6.2.2 利用中心抽头的阻抗变换	118
6.3 中和电路	119
6.4 AGC 电路	120
6.4.1 AGC	120
6.4.2 反向自动增益控制	121
6.4.3 正向自动增益控制	121
6.5 各种高频放大电路	122
6.5.1 中频放大电路	122
6.5.2 宽频带放大电路	123
6.6 高频功率放大电路	125
6.6.1 C类放大的偏置	125
6.6.2 输出波形的失真	125
第 7 章 振荡电路	127
7.1 振 荡	127
7.1.1 颤噪效应	127

7.1.2	将放大电路的输出返回到输入	127
7.1.3	振荡条件	129
7.1.4	放大器有时容易产生振荡	130
7.1.5	振荡的定义	131
7.2	振荡电路的分类	132
7.3	LC 振荡器(调谐型)	133
7.3.1	集电极调谐型振荡器	133
7.3.2	基极调谐型振荡器	135
7.3.3	发射极调谐型振荡器	135
7.4	LC 振荡器(三元件型)	136
7.4.1	哈脱莱振荡器	138
7.4.2	科耳皮兹振荡器	139
7.5	RC 振荡器的振荡原理	140
7.5.1	维恩电桥式振荡器的原理	140
7.5.2	移相式振荡器的振荡原理	142
7.6	实际的 RC 振荡器	144
7.7	晶体振荡器	147
7.7.1	晶体振子	147
7.7.2	需要调整的晶体振荡器	151
7.7.3	无需调整的晶体振荡器	152
7.8	特殊振荡器	154
7.8.1	负阻振荡器的振荡原理	154
7.8.2	音叉振荡器	155
7.9	信号发生器	155
7.9.1	单片信号发生器	155
7.9.2	使用锁相环的信号发生器	157
第 8 章	调制电路	161
8.1	调 制	161
8.1.1	电信方式和调制	161



8.1.2 电信的种类和调制	162
8.2 调制的分类	163
8.2.1 调 幅	163
8.2.2 调 频	163
8.2.3 调 相	164
8.3 调幅波的性质	165
8.3.1 调幅波的数学式表示	165
8.3.2 调幅波的频谱和占用频带宽	166
8.3.3 调幅波的功率	168
8.4 调幅电路	169
8.4.1 非线性电路和线性电路	169
8.4.2 非线性调制电路的作用	170
8.4.3 线性调制电路的作用	172
8.5 单边带调制电路	176
8.5.1 单边带	176
8.5.2 单边带调制的原理	177
8.5.3 平衡调制器的作用	177
8.5.4 环形调制器的作用	179
8.6 调幅发射机	182
8.6.1 发射机的分类和电话发射机的构成	182
8.6.2 振荡部分的作用	184
8.6.3 功率放大部分的作用	184
8.6.4 调制部分的作用	185
8.7 调频波、调相波	186
8.7.1 调频波的数学表达式	186
8.7.2 调相波的数学表达式	188
8.7.3 调频波和调相波的比较	189
8.7.4 调频波、调相波的边带波和带宽	190
8.8 调频电路	193
8.8.1 直接调频方式	193



8.8.2 使用电抗晶体管的调频电路	196
8.8.3 由调相形成的等效调频电路	199
8.9 调相电路	201
8.9.1 阿姆斯特朗调相	201
8.9.2 由矢量合成形成的调相	203
8.9.3 锯齿波调制	204
8.10 调频发射机	207
8.10.1 调频通信的特征	207
8.10.2 调频发射机的构成和性能	207
8.10.3 各部分的作用	208
第 9 章 解调电路	211
9.1 解 调	211
9.1.1 解 调	211
9.1.2 解调的种类	211
9.1.3 外差检波	213
9.2 调幅解调电路	214
9.2.1 元件的特性和使用范围	214
9.2.2 非线性解调电路的作用	215
9.2.3 线性解调电路的作用	217
9.3 单边带解调电路	224
9.3.1 单边带波的解调方法	224
9.3.2 单边带波解调的工作原理	225
9.4 外差检波	226
9.4.1 外差检波的原理	226
9.4.2 超外差接收法	227
9.5 调幅接收机	230
9.5.1 超外差接收机的构成和连接图	230
9.5.2 高频放大部分的作用	232
9.5.3 变频器的作用	232



9.5.4 中频放大部分的作⽤	233
9.5.5 检波部分、低频放大部分的作⽤	234
9.5.6 AGC 电路的作⽤	235
9.6 调频、调相的解调原理	235
9.7 调频、调相的解调电路	236
9.7.1 参差调谐鉴频器	236
9.7.2 福斯特-西利鉴频器	237
9.7.3 比例检波器	239
9.7.4 鉴相器	240
9.8 调频解调电路	241
9.8.1 差动峰值检波电路	241
9.8.2 积分检波电路	242
9.8.3 脉冲计数检波电路	245
9.8.4 PLL 检波电路	246
9.9 调频接收机	247
9.9.1 调频接收机的组成	247
9.9.2 高频端	248
9.9.3 中频放大器、调频检波器	250
 第 10 章 集成放大电路	253
10.1 集成电路的基础	253
10.1.1 集成电路的构造	253
10.1.2 集成电路的种类	253
10.2 集成电路内部的特殊电路	254
10.2.1 电平移动电路	255
10.2.2 直流恒流电路	255
10.2.3 差动放大电路	255
10.3 运算放大器的基本事项	257
10.3.1 运算放大器的特性	257
10.3.2 运算放大器中所⽤的术语	258

10.3.3	虚短路	259
10.3.4	基本放大电路	259
10.4	运算放大器的应用电路实例	261
10.4.1	前置放大器	261
10.4.2	均衡放大器	262
10.4.3	功率放大器	263
第 11 章	电源电路	265
11.1	整流电路和滤波电路的工作原理	265
11.1.1	整流电路	265
11.1.2	平滑滤波电路	268
11.2	电压调整电路的使用方法	270
11.2.1	降压型稳压电路	271
11.2.2	过电流保护电路	272
11.2.3	3 端子调节器	272
11.3	理解开关稳压器	273
11.3.1	非隔离型 DC-DC 变换器	273
11.3.2	隔离型 DC-DC 变换器	278
11.3.3	开关元件的电功率损失	280
11.4	进行安全设计的方法	280
11.4.1	安全规范	280
11.4.2	PL 预防对策	281

第 1 章

半导体基础

本章介绍 pn 结、半导体二极管、半导体三极管、场效应管和可控硅等半导体器件, pn 结是构成半导体器件的基础。半导体二极管和半导体三极管是电子技术中最基本的半导体电子器件,掌握它们的基本结构、工作原理、特性和主要参数是学习电子技术和分析电子电路的基础。在此基础上,介绍了一些特殊用途的二极管,如稳压二极管、发光二极管、光敏二极管和变容二极管等。

1.1 半导体基础知识

半导体是固有电阻率 ρ 介于导体 (conductor, $10^{-8} \Omega \cdot \text{m} < \rho < 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$) 和绝缘体 (insulator, $10^4 \Omega \cdot \text{m} < \rho < 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$) 之间,其相对温度 ρ 的变化率 $d\rho/dT$ 呈负值¹⁾ 的物体。本节中,将概述本征半导体和非本征半导体的导电特性。

1.1.1 本征半导体

在这里,我们以硅 (silicon) 为例来说明。硅原子如图 1.1 所示,在原子结构中最外层轨道上有四个电子 (我们称其为价电子,硅为四价原子),这些价电子在单晶体结构中,排列成图 1.2 所示的无论哪个原子核都拥有 8 个电子的共价键 (也称为电子对结合, electron pair bond) 结构。我们把这种半导体称为本征

1) 导体 $d\rho/dT > 0$; 绝缘体 $d\rho/dT < 0$ 。

半导体(intrinsic semiconductor)。

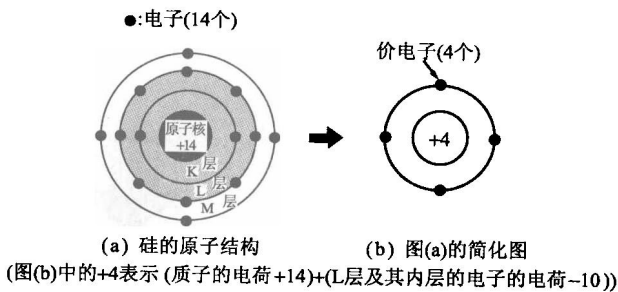


图 1.1 硅原子的原子结构模型

硅的结晶在绝对零度(0K, -273°C)的时候,价电子没有能力脱离共价键的约束,而全部被束缚在原子核周围。在这种情况下,晶体中没有自由电子,半导体是不导电的。但是,硅的结晶体在加热(参见注 1.1)或者光照(参见注 1.2)的作用下,价电子因受热激发而获得足够的能量,价电子便能脱离共价键的束缚离开原子核成为自由电子。图 1.3 演示了这一过程。在图中,如果 X 位置上的价电子脱离共价键的束缚而形成自由电子(free electron) X',同时在这原来的共价键中留下一个空位,成为“空穴”(hole)。这样就产生了自由电子和空穴组成的“对”(称为电子空穴对,electron-hole pair),自由电子和空穴称为载流子(carriers)。

在一定温度下,载流子(p 为空穴, n 为电子, $p=n=n_i$)的浓度 $n_i(1/\text{m}^3)$

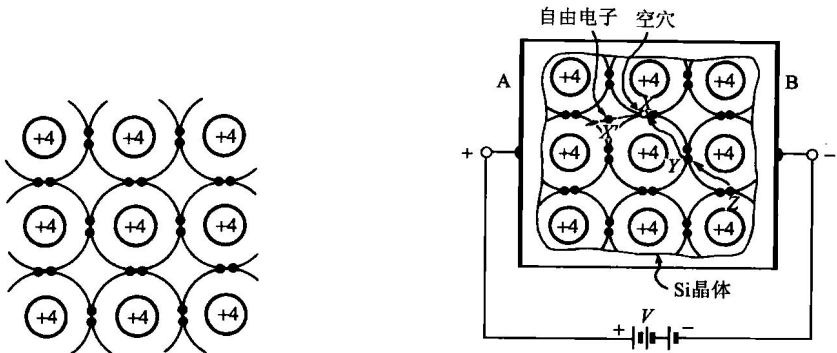


图 1.2 硅晶体中共价键的
二维结构示意图

图 1.3 空穴和自由电子的
产生和移动



如下式所述(参见注 1.1):

$$n_i = A_0 T^{3/2} e^{-W_g/2kT}, \quad A_0 \approx 4.9 \times 10^{21} \left(\frac{m_e m_h}{m^2} \right)^{3/4} \quad (1.1)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数 ($8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$); T 为绝对温度 (K); W_g 为破坏共价键所需要的能量, 又称为禁带宽度 ($W_g = W_{g0} - \gamma T$, 硅的禁带宽度为 $W_{g0} = 1.21 \text{ eV}$, $\gamma = 3.6 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$); m_e 和 m_h 分别表示电子和空穴的有效质量; m 为自由空间中的电子的质量。

自由电子在结晶体中运动的时候, 会和空穴发生再结合 (recombination), 这个过程可以用下式来表示:

$$\text{束缚在原子核周围的电子} \rightleftharpoons \text{空穴} + \text{自由电子} \quad (1.2)$$

式中, “ $\rightarrow$ ” 表示发生; “ $\leftarrow$ ” 表示再结合。

1.1.2 非本征半导体

在本征半导体中掺入 (doping) 杂质就称为非本征半导体 (extrinsic semiconductor)。非本征半导体主要有 n 型半导体 (n-type semiconductor) 和 p 型半导体 (p-type semiconductor) 两种。

1. n 型半导体

在本征半导体中掺入五价元素 (例如, 砷 As) 就成了 n 型半导体。添加的杂质原子被称为施主原子 (donor)¹⁾。图 1.4 表示了硅晶体中加入施主原子的结构示意图。因为施主原子含有五个价电子, 其中的四个和硅原子结合形成共价键, 多余的一个价电子处在共价键之外, 称为过剩电子 (excess electron)。原子核对这个过剩电子的束缚力较弱, 因此就可以自由移动。n 型半导体由于加入了五价杂质, 因此产生自由电子外, 存在电子空穴对的自由电子 (两者合起来称为多数载流子, 参见注 1.3) 和密度为 p_n 的空穴 (少数载流子, 脚标 n 表示 n 型半导体, 参见注 1.4)。图 1.5 表示了在外加电压作用下 n 型半导体的电子和空穴的移动方向。

1) 关于 donor: 源于拉丁语的 donare (给予), 有捐赠者, 捐赠物之意。后述的 acceptor 为接纳者, 接纳物之意。

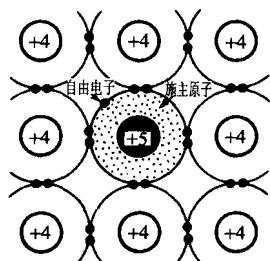


图 1.4 n 型半导体的晶体结构模型图

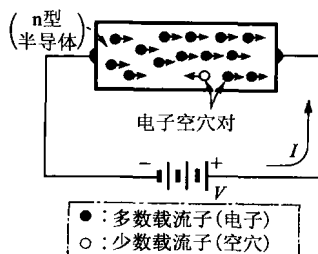
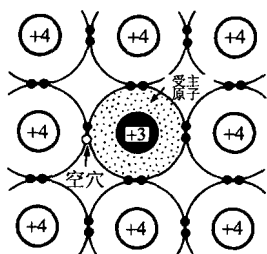


图 1.5 n 型半导体中的载流子移动

2. p 型半导体

在本征半导体中掺入三价元素(例如, 钙 Ga)就成了 p 型半导体。添加的

图 1.6 p 型半导体的
晶体结构模型图

杂质原子被称为受主原子(acceptor)。图 1.6 表示了
在硅晶体中加入施主原子的结构示意图。如图所示,
受主原子的三个价电子和硅原子形成共价键后, 出现
了一个空穴。p 型半导体由于加入了三价杂质, 因此
产生空穴之外, 还存在因热能产生的电子空穴对的空
穴(两者合起来称为多数载流子, 参见注 1.5)和密度
为 n_p (参见注 1.6)的电子(少数载流子, 脚标 p 表示 p
型半导体)。

3. 半导体的导电特性

设半导体的横切面为 A , 长度为 L , 电阻率(resistivity)为 ρ , 那么半导体的
电阻 R 可以用下式表示:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.3)$$

$$\rho = \frac{1}{q(p\mu_h + n\mu_e)} \quad (1.4)$$

式中, p 和 n 分别表示空穴和电子的浓度($1/\text{m}^3$); μ_h 和 μ_e 分别表示空穴和电子
的移动速度($\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{S}$); q 表示电子所带电荷($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, 参见注 1.7)。

【例题 1.1】 试求在 27°C 下的硅晶体中的载流子密度 n_i 和电阻率 ρ 。其
中, $\mu_e = 0.13 (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{S})$, $\mu_h = 0.05 (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{S})$, $m_e = 0.2m$, $m_h = 0.56m$, $W_g =$
 $W_{g0} - \gamma T$ ($W_{g0} = 1.21 \text{eV}$), $\gamma = 0.36 \times 10^{-5} \text{eV/K}$, $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。

【解答】 $n_i = 4.9 \times 10^{21} \times (0.112)^{3/4} \times (300)^{3/2} \times e^{-1.175/1.72 \times 10^{-2}}$