

模拟电路

宁广安

吉林大学出版社

模 拟 电 路

宁广安 编

吉 林 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书是参照1983年成都会议制定的无线电电子学专业模拟电子线路教学大纲和1988年屯溪会议精神而编写的。全书共分八章。前五章深入地阐述了模拟电路的基本原理和分析方法,后三章系统地论述了集成运算放大器和模拟乘法器的构成原理、典型产品和应用电路,对集成电压比较器、集成功率放大器、集成和开关稳压器也作了适当的介绍,体现了双极型与单极型器件并重的原则和以集成电路为主的精神,反映了电子技术最新发展的趋势。

本书取材广泛,叙述严谨扼要,概念准确,适于用作高等院校相关课程的教材或参考书,亦可供科学技术人员参考。

2P38/L16

模 拟 电 路 宁 广 安 编

责任编辑:唐万新

封面设计:甘莉

吉林大学出版社出版
(长春市解放大路85号)

吉林省新华书店发行
吉林大学印刷厂印刷

开本: 850×1168毫米1/32

1989年12月第1版

印张: 17.25

1989年12月第1次印刷

字数: 428千字

印数: 1-1 000册

ISBN 7-5601-A418-5/TN·3

定价: 3.50元

序 言

本书是根据1983年成都会议制定的无线电电子学专业模拟电子线路教学大纲，并遵照1986年屯溪会议精神而编写的一门电子技术基础课教材。书中以单极型与双极型器件并重的原则，比较深入地阐述了模拟电路的基本原理与分析方法；并且比较系统地论述了集成运算放大器和集成模拟乘法器的基本单元电路、结构、工作原理、典型产品和应用电路，对集成电压比较器、集成功率放大器、集成与开关稳压器也作了适当的介绍，体现了以集成电路为主并适应电子技术最新发展趋势的精神。

本书是作者多年从事教学实践的一个总结。在编写过程中，既注意吸取其他书刊的长处，又提出了一些不同于其他书刊的处理方法与观点。内容比较广泛和新颖，具有以下几个主要特点：

1. 本书以器件为电路服务、分立元件电路为集成电路服务的思想体系，把器件放在相关的章节叙述，使整个教材由浅入深，紧密配合，系统性很强。这不仅适于教学，而且也便于自学。

2. 本书涉及的内容虽然比较广泛，但是各章节的叙述均简明扼要，并且力图做到概念准确、论理清晰严谨。

3. 本书在内容选择与处理方法方面，在吸取兄弟院校经验的基础上，提出一些简明而准确的分析方法和处理实际问题的技巧；对有些内容提出了新的分析观点；在介绍具体分析方法的同时，很强调一般的分析方法，以树立整体观念，培养分析与解决实际问题的能力。

4. 本书各章节不仅有小节，而且均有例题和富有启发性的思考题以及与教材内容扣得很紧的习题，以便让学生深入理解教材内容，举一反三，发挥学习的主动性与创造性。

作者在编写此书过程中，得到各位老师和朋友的宝贵指导与帮助，谨此表示深切谢意。

作者水平有限，错误与不足之处在所难免，殷切期望得到批评指正。

宁广安

1988年8月于吉林大学

本书符号说明

虽然本书所用符号较多，但是绝大部分都是通用的符号。有些特殊的符号在教材中均有说明，为了便于掌握注意下面几条规律还是必要的：

1. 直流电流与电压，用字母和脚标都是大写的符号来表示。例如， I_c, V_c 分别表示晶体管集电极的直流电流与电压。

2. 正弦电流与电压的瞬时值，用字母和脚标都是小写的符号表示。例如， i_c 与 v_c 分别表示正弦输出电流与电压。

3. 包含直流与交流两种成份的电流与电压的瞬时值或脉冲信号，用字母小写、脚标大写的符号来表示。例如， v_D 表示整流输出电压。

4. 正弦电流与电压的有效值或复频域的电流与电压，用字母大写、脚标小写的符号来表示。例如， V_i 表示正弦输入电压的有效值或复频域输入电压。

目 录

第一章 半导体二极管和三极管.....	(1)
§1.1 半导体物理基本知识.....	(1)
一、本征半导体.....	(1)
二、杂质半导体.....	(4)
思考题.....	(7)
§1.2 P-N 结	(7)
一、P-N 结的形成.....	(7)
二、P-N 结的伏安特性	(9)
三、P-N 结电容	(13)
四、P-N 结的击穿	(14)
思考题.....	(15)
§1.3 半导体二极管.....	(15)
一、二极管的基本结构.....	(15)
二、二极管的伏安特性.....	(16)
三、二极管的主要参数.....	(19)
四、稳压管.....	(20)
思考题.....	(21)
§1.4 半导体三极管.....	(21)
一、三极管的基本结构.....	(21)
二、三极管的工作原理.....	(22)
三、三极管的伏安特性.....	(27)
四、三极管的主要参数.....	(33)
思考题.....	(39)
小结.....	(39)

习题一	(40)
第二章 放大器分析基础	(44)
§2.1 放大器基本工作原理	(44)
一、共发射极放大电路的结构	(44)
二、放大器的直流通路和交流通路	(46)
三、放大管不饱和与不截止条件	(48)
思考题	(50)
§2.2 放大器的图解分析法	(51)
一、图解法步骤	(51)
二、电压放大倍数估算	(54)
三、最大不失真输出电压幅度的估算	(55)
四、波形的非线性失真	(56)
思考题	(60)
§2.3 放大器的偏置电路	(61)
一、偏置电路的任务及分析方法	(61)
二、简单偏置电路	(62)
三、电流反馈式偏置电路	(63)
四、电压反馈式偏置电路	(67)
五、温度补偿式偏置电路	(69)
思考题	(71)
§2.4 晶体管微变等效电路	(71)
一、H 参数等效电路	(72)
二、其它网络参数等效电路	(77)
三、T 型等效电路	(78)
四、混合参数 π 型等效电路	(82)
五、晶体管频率特性参数	(85)
思考题	(89)
§2.5 放大器的微变等效电路分析法	(89)
一、共发射极放大电路	(90)

二、共基极放大电路	(94)
三、共集电极放大电路	(97)
思考题	(109)
§2.6 放大器的频率特性	(109)
一、低频特性	(112)
二、高频特性	(114)
三、波特图	(117)
四、旁路电容对频率特性的影响	(119)
思考题	(128)
§2.7 场效应管放大器	(128)
一、场效应管的工作原理	(129)
二、场效应管的伏安特性	(134)
三、场效应管的参数和小信号模型	(137)
四、场效应管与双极型管比较	(140)
五、场效应管的偏置电路	(141)
六、场效应管放大电路	(145)
思考题	(153)
§2.8 多级放大器	(153)
一、级间耦合方式和静态工作点	(153)
二、增益、输入和输出电阻	(161)
三、频率特性	(165)
四、级联放大器	(167)
思考题	(173)
小结	(173)
习题二	(176)
第三章 负反馈放大器	(192)
§3.1 反馈的基本概念	(192)
一、反馈、反馈信号和反馈网络	(192)
二、直流反馈与交流反馈、正反馈与负	

反馈	(195)
三、反馈的组态	(198)
四、方块图	(200)
思考题	(205)
§3.2 负反馈对放大器性能的影响	(205)
一、对输出量的稳定	(206)
二、对增益的稳定	(206)
三、展宽通频带	(208)
四、减小非线性失真	(211)
五、负反馈放大器的输入、输出电阻	(212)
思考题	(216)
§3.3 负反馈放大器的方块图分析法	(216)
一、拆环方法	(216)
二、分析举例	(223)
思考题	(231)
§3.4 反馈放大器的稳定性	(231)
一、自激振荡的原因及条件	(231)
二、反馈放大器稳定性的判断	(233)
三、反馈放大器的相位补偿	(337)
思考题	(242)
小结	(243)
习题三	(245)
第四章 差动放大器	(252)
§4.1 差动放大器的工作原理	(252)
一、静态工作点的计算	(252)
二、小信号特性分析	(253)
思考题	(259)
§4.2 几种典型的差动放大器	(259)
一、具有公共射极电阻的差动放大器	(259)

二、具有恒流源的差动放大器·····	(262)
三、差动放大器的连接方式·····	(265)
四、电路参数不对称的差动放大器·····	(269)
思考题·····	(281)
小结·····	(281)
习题四·····	(282)
第五章 低频功率放大器 ·····	(288)
§5.1 变压器耦合单管功率放大电路·····	(288)
一、图解法分析·····	(289)
二、参数计算·····	(290)
思考题·····	(294)
§5.2 变压器耦合推挽功率放大电路·····	(294)
一、电路的基本工作原理·····	(295)
二、放大器参数计算·····	(297)
三、交越失真·····	(299)
思考题·····	(301)
§5.3 互补功率放大电路·····	(301)
一、OCL 电路·····	(301)
二、OTL 电路·····	(305)
思考题·····	(308)
小结·····	(308)
习题五·····	(309)
第六章 模拟集成电路 ·····	(314)
§6.1 模拟集成电路中的基本电路·····	(316)
一、电流源·····	(316)
二、电位移动电路·····	(322)
三、复合结构电路·····	(323)
四、有源负载·····	(328)
五、增益转移电路·····	(330)

六、射极输出电路.....	(333)
思考题.....	(339)
§6.2 集成运算放大器.....	(340)
一、概述.....	(340)
二、集成运放的主要参数.....	(343)
三、集成运放的典型电路.....	(347)
思考题.....	(365)
§6.3 集成模拟乘法器.....	(366)
一、模拟乘法器的基本概念.....	(366)
二、差动放大器的传输特性.....	(367)
三、变互导式乘法器的基本电路.....	(369)
四、集成模拟乘法器的典型电路.....	(377)
思考题.....	(384)
§6.4 其它模拟集成电路.....	(384)
一、集成电压比较器 BG307.....	(384)
三、集成功率放大器 TB4100.....	(387)
小结.....	(390)
习题六.....	(390)
第七章 模拟集成电路的应用.....	(397)
§7.1 集成运算放大器的三种基本组态.....	(397)
一、理想运算放大器.....	(397)
二、集成运算放大器的基本组态.....	(398)
三、基本运算放大器电路的误差分析.....	(402)
思考题.....	(411)
§7.2 集成运算放大器的偏置和补偿.....	(412)
一、失调补偿.....	(412)
二、相位补偿.....	(417)
思考题.....	(428)
§7.3 模拟运算电路.....	(428)

一、比例运算	(428)
二、求和运算	(431)
三、积分运算	(433)
四、微分运算	(437)
五、对数运算	(441)
六、指数运算	(443)
七、乘法和除法运算	(444)
八、变跨导乘法器运算电路	(447)
思考题	(453)
§7.4 有源滤波器	(453)
一、低通滤波器	(454)
二、高通滤波器	(459)
三、带通滤波器	(461)
四、带阻滤波器	(464)
思考题	(466)
✕ §7.5 电压比较器	(467)
一、单限电压比较器	(468)
二、滞回电压比较器	(469)
三、双限电压比较器	(472)
思考题	(477)
§7.6 信号发生器	(477)
一、文氏桥正弦波发生器	(477)
二、正交正弦波发生器	(481)
三、三角波-正弦波变换器	(483)
四、方波和三角波发生器	(484)
五、矩形波和锯齿波发生器	(486)
思考题	(488)
小结	(488)
习题七	(488)

第八章 直流电源	(498)
§8.1 整流电路.....	(498)
一、半波整流电路.....	(498)
二、全波整流电路.....	(500)
三、桥式整流电路.....	(501)
四、倍压整流电路.....	(502)
思考题.....	(503)
§8.2 滤波电路.....	(504)
一、电容滤波电路.....	(504)
二、电感滤波电路.....	(506)
三、复式滤波电路.....	(507)
思考题.....	(509)
§8.3 稳压管稳压电路.....	(509)
一、工作原理.....	(510)
二、稳压电路的参数.....	(511)
思考题.....	(513)
§8.4 晶体管串联型稳压电路.....	(513)
一、基本组成和工作原理.....	(514)
二、典型的串联型稳压电路.....	(515)
三、具有辅助电源的稳压电路.....	(516)
四、过载保护电路.....	(518)
思考题.....	(520)
§8.5 其他形式的稳压电路.....	(520)
一、集成稳压器.....	(520)
二、开关稳压器.....	(527)
思考题.....	(530)
小结.....	(530)
习题八.....	(531)
参考文献	(535)

第一章 半导体二极管和三极管

半导体二极管和三极管是用半导体材料为原料，以P-N结为结构基础制成的半导体器件。本章首先介绍半导体的导电特点，然后介绍P-N结的基本特性，在此基础上说明半导体二极管和三极管的基本工作原理，并重点讨论其伏安特性和主要参数。

§1.1 半导体物理基本知识

根据导电性能的不同，物质分为导体、半导体和绝缘体（电介质）。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。它虽然不如导体的导电性能良好，也不如电介质的绝缘性能强，但却因为它具有一些可贵的导电特性而在现代电子技术中获得了广泛的应用。

一、本征半导体

本征半导体是一种完全没有杂质和缺陷的理想半导体材料。

目前用来制造半导体器件的常用半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。我们仅以它们为例讨论本征半导体的特性。它们的原子结构如图1.1-1所示。硅和锗都是四价元素，具有四个

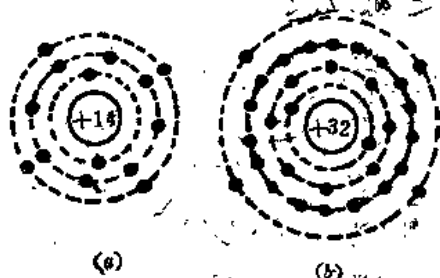


图 1.1-1

价电子。价电子受原子核的束缚较弱,容易挣脱。物质的物理和化学性能主要决定于价电子的情况。内层电子受原子核的束缚较紧,比较稳定,同原子核一起被称为“原子实”。利用原子实概念可以把硅和锗的原子结构画成简化图,如图1.1-2所示。

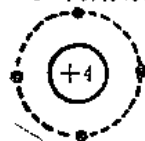


图 1.1-2

半导体器件大多数是用单晶半导体材料制成的。把硅或锗等半导体材料放入单晶炉中加工,使其原子有规则地排列就会制成单晶体。硅单晶的晶体结构如图1.1-3所示。当原子互相靠近形成晶体时,价电子不仅受原来原子核的作用,而且还受相邻原子核的作用。这样它既可以围绕自己的原子核运动,又可以围绕相邻的原子核运动。于是原来分属于各原子的价电子不再分属于各原子,而为晶体所有原子共有。这种情况,称为价电子的共有化运动。

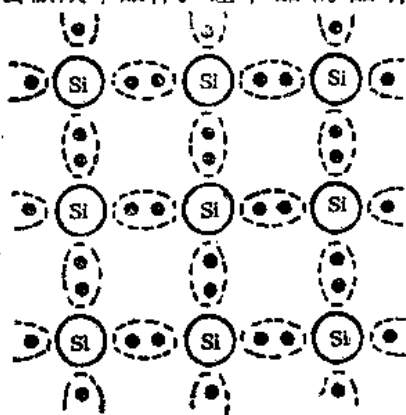


图 1.1-3

从原子间的结合方式看,两个相邻原子好象各出一个价电子为二者所共有,它们靠共有电子对结合,称为共价键结合。

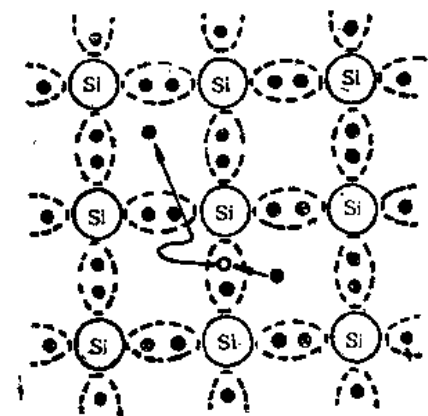


图 1.1-4

半导体材料的原子结构比较特殊,价电子即不象导体那样容易挣脱,也不象绝缘体那样束缚很紧。当形成共价键结构时,如图1.1-4所示。由于原子间的相互作

用，共价键中的价电子受束缚程度又有所减弱，即使在常温下某些价电子也能获得足够的能量（约 1eV ）从共价键中挣脱出来，成为自由电子，并同时留下个空位，称为“空穴”，在电场的作用下，自由电子作定向运动能形成电流，而空穴被附近的价电子填充又形成了新的空穴，这样价电子递补空穴，空穴也作定向运动，它相当于一个正电荷的运动，因此也能形成电流。我们把自由电子和空穴统称为载流子，并把自由电子载流子简称为“电子”，把空穴载流子简称为“空穴”。这两种载流子运动所形成的电流方向均与外电场方向一致，因此总电流等于电子电流与空穴电流之和。

在原子中电子吸收能量，从低能量状态跃迁到高能量状态（量子化的）的过程，称为激发。上述激发的特点是产生一个自由电子的同时，就会出现一个空穴，自由电子与空穴总是成对地出现，称为电子-空穴对。这种产生电子-空穴对的激发称为本征激发。自由电子与空穴总是处于不断地运动之中，当自由电子与空穴相遇时，自由电子便落入空穴，电子-空穴对便消失。这种现象称为复合。

在半导体中载流子总是不断地产生又不断地复合。如果没有其它外界影响，在一定温度下单位时间内本征激发与复合的电子-空穴对数目相等。这就是热平衡状态。在热平衡状态下单位体积内的自由电子或空穴数目（用 n_i 或 p_i 表示^①），称为本征载流子浓度。当环境温度升高时，本征激发加强，复合也随之加强，本征载流子浓度增加到新温度下的热平衡值。理论分析表明本征载流子浓度与温度有以下关系^②

$$n_i = p_i = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left[-\frac{E_{g0}}{2kT}\right] \quad 1.1-1$$

① n 是 negative 的字头，表示带负电的电子； p 是 positive 的字头，表示空穴； i 是 intrinsic 的字头。

② 见参考文献C136页。