

内 容 简 介

本书是在谢嘉奎主编,谢洪福、金宝琴编写的《电子线路(线性部分)》第二版的基础上,根据一九八七年国家教委批准公布的《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》修订而成。全书由晶体二极管的基本特性、晶体三极管的基本特性、场效应管的基本特性、放大器基础、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其基本应用电路和放大电路的频率响应七章组成。各章后附有大量习题和部分答案。

本书对第二版的内容作了进一步的压缩和删减,在保证基本内容的前提下,压缩了分立元件电路,增加了MOS集成电路。全书篇幅比第二版压缩四分之一强。

本书可作为高等学校电子、通信等类专业“线性电子线路”或“低频电子线路”课程的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书经高等学校工科电工课程教学指导委员会电子线路课程教学指导小组委托北京航空学院张凤言副教授审阅。

本书责任编辑 张培东

(京) 112号

高等学校教材

电 子 线 路

[线 性 部 分]

谢嘉奎 金宝琴 谢洪福 编

•

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

文 字 六 〇 五 厂 印 装

•

开本850×1168 1/32 印张13.125 字数330 000

1979年2月第1版 1988年10月第3版

1991年11月第5次印刷

印数 27 863—42 874

ISBN 7-04-001109-3/TN·95

定价 4.30 元

第三版前言

《电子线路(I)(II) 课程教学基本要求》由工科电工课程教学指导委员会审订通过,经国家教委批准,已于一九八七年初正式公布。这个文件规定了电子、通信等类专业本科学生必须达到的合格要求,它是制订教学计划和教学大纲的依据,也是修改本教材的依据。

对照《电子线路(I)(II) 课程教学基本要求》对第二版中要求过高、讨论过细的内容作了进一步的压缩和删减。同时,为了适应集成电路的发展,在保证基本内容的前提下,进一步删除了已由相应集成电路取代的分立元件电路,适当增加了MOS集成电路的内容,并对部分章节的体系进行了必要的调整。

与第二版比较,全书篇幅压缩四分之一强。除了第四和第七两章以外,其余各章的体系基本不变,但内容上均有不同程度的增删。其中,压缩和精简的内容有:半导体物理基础知识,晶体二极管、三极管内部载流子运动的定量分析以及负反馈放大器的分析方法等。适当增加的内容有:集成电路中的版图知识,MOS集成运算放大器以及集成比较器等。

第四章为放大器基础。在这一章中,删除了T型等效电路,并按物理模拟的方法建立混合 Π 型等效电路。同时,以集成电路中的基本组成电路为主要线索,建立了新的体系,压缩和精简了有关阻容耦合放大器及其偏置电路、放大电路中的噪声以及多级放大器等内容,适当增加有源负载单管放大器等内容。

第七章为放大电路中的频率响应,它是由第二版的第七、第八和第九三章的内容组合而成的,着重介绍频率响应的分析方法、低通和带通放大器及其稳定性以及相位补偿等基本内容。在这一章

中，较大幅度精简和压缩的内容有：频率响应的极零点分析方法，分立元件的小信号谐振放大器等。同时，较系统地介绍了集成宽带放大器。

此外，在本修订版中，还删除了电子管及其基本放大电路的附录。

本书由谢嘉奎主编，在谢嘉奎主持下，通过广泛的调查研究，共同确定了本版的修改大纲。其中，第一到第五各章由谢嘉奎修订，第六、第七两章及各章习题由金宝琴修订，在习题的增删和题解方面冯军做了大量的工作。最后谢嘉奎对各章进行了文字润饰和定稿。

本版由北京航空学院张凤言副教授审阅，他提出了许多宝贵的意见。南京工学院无线电工程系电子线路教研组全体同志，根据他们的教学实践对本版的修订提出了具体的意见。广大读者和兄弟院校教师对本版的修订提出了宝贵的建议。

我们对上述同志表示深切的谢意。恳请对本书继续提出批评和指正。

编 者

1987年10月

第二版前言

电子线路是指含有晶体管、场效应管等电子器件,并且能实现某种特定电功能的电路。它广泛应用于各种电子设备中。

电子线路的种类繁多。但是,在无线电技术类专业的教学计划中,作为主要技术基础课程的电子线路仅限于讨论集中参数的放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路以及相应的半导体器件。至于脉冲电路、数字电路、分布参数电路则分别划归“脉冲与数字电路”和“微波技术”等课程介绍。此外,在学习电子线路课程时,应有电路、信号和线性系统分析的基础。

“电子线路”课原先是作为一门大课开设的,这对于统一安排教学内容是有利的。南京工学院无线电工程系电子线路编写组于一九七九年编写出版的《电子线路》就是根据这种安排编写的。但是,这样一门大课的学时过多,在安排教学计划时十分不便。因此,在一九八零年春修订的无线电技术类专业参考性教学计划中,将这门大课分成两门课程。同年又在高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组的会议上,审订了《电子线路(I)(II)教学大纲》(草案),并提出了两门课程可按工作频率高低分成“低频电子线路”和“高频电子线路”;也可按电子器件工作特点及其分析方法上的不同分成“线性电子线路”和“非线性电子线路”。本书就是根据这个大纲,对原来的《电子线路》第一册、第二册和第五册部分内容进行改编而成的。与第一版比较,这第二版的变动较大,各章节几乎都重新改写过。全书篇幅压缩约三分之一。

在修订过程中,广泛听取了本院及兄弟院校教师和学生的意见,并根据教学实践的经验和教训,对第一版中某些要求过高、讨论过细或内容重复的部分作了压缩或删减,还对第一版中的内容

安排作了合理的调整。各章都新增了习题。希望这样的变动能够加强基本概念和基本分析方法,便于教学。

在教材体系的处理上,本书是按照半导体器件、基本放大电路、频率响应及稳定性三个相对独立的单元顺序安排的。半导体器件单元包括晶体二极管、晶体三极管和场效应管三章,着重讨论三种半导体器件的内部物理过程,并在此基础上介绍它们的外特性及相应的直流参数。基本放大电路单元包括放大器基础、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其线性应用三章,着重讨论各种基本放大电路(包括三种基本组态电路、组合电路、集成运算放大器电路等)的组成原理、分析方法、性能特点以及反馈在放大器中的应用等问题。在讨论这些问题时,没有涉及放大器的频率响应及稳定性,而将这部分内容集中放在第三单元中讨论。第三单元包括放大电路的频率响应、负反馈放大器的频率响应和小信号谐振放大器三章,着重介绍频率响应的复频域分析方法,基本放大电路的频率响应特性以及反馈对频率响应的影响,并且在此基础上讨论稳定性及相位补偿技术。建立这样的教材体系,便于逐步引出放大器的基本概念和基本分析方法,比较符合循序渐进、由浅入深的教学规律,也便于抓住共性问题,精选内容,减少重复。

在教材内容的处理上,与第一版比较,作了如下的重大修改。

半导体物理基础知识是了解各种半导体器件工作原理及其外特性的前提。这部分内容历来有两种不同的讲法。第一版中采用能级能带模型的讲法,这种讲法比较严密,可以解释各种物理现象,但是,需要涉及更多的近代物理知识。由于本课程的学时有限,采用这种讲法的教学实践效果总是不很理想。考虑到本课程讲解半导体器件的目的仅限于更好地了解晶体二极管、晶体三极管和场效应管的工作原理及其外特性,因此,一九八零年审订的教学大纲中建议采用共价键模型的讲法。本书采用共价键模型,用经典的电学知识讲清半导体器件中的基本物理过程。

晶体管的小信号等效电路可以有各种模型。其中,有的是从晶体管固有的物理特性引出来的;有的是从网络观点引出来的。但是它们本质上都是非线性器件在增量基础上进行线性化处理的结果。因此,本书从这个本质出发,将第一版中分散在各章节的等效电路集中在第四章中讨论,着重介绍了混合 Π 型和 H 参数两种常用的等效电路,并以混合 Π 型等效电路作为分析各种小信号放大器的基本模型。

噪声是放大器的固有特性。但是,考虑到噪声的深入讨论已超出了本课程的范围。因此,本书仅在第四章中介绍了噪声系数的概念,删去了第一版中噪声系数及其测量一章。

放大器中的负反馈历来是教学中的一个难点。本书针对第一版中对这个问题讨论过细、过繁、重点不突出的缺点,从讲清反馈的基本概念和基本分析方法出发,对这部分内容重新作了改写。其中,反馈网络的负载效应改由网络的观点进行处理,以突出其内涵的规律性。

本书将第一版中分散在各章讨论的频率响应及稳定性集中在一个单元中讨论,并统一将放大器看作为一个线性系统,采用复频域的分析方法。由于严格分析放大器的频率响应是十分繁琐的,一般都必须借助计算机进行近似数值分析。因此,本书在处理这部分内容时,尽量避免繁琐的数学演算,力求采用近似的工程分析方法,并从中引出具有实际意义的概念和结论。

为了照顾部分院校的需要,将第一版第五册中的电子管及其电路一章进行压缩和删减,作为本书的附录。

本书是按约 100 课内总学时数而编写的。根据我们的教学实践,建议学时分配如下:半导体器件单元为 22~24 学时;基本放大电路单元为 42~44 学时;频率响应及其稳定性单元为 30~32 学时。在使用这些学时数时,我们主张课堂讲授的学时数最好少一些,留一部分内容让学生自学,或采用习题课和课堂讨论的形式指

导学生学习,培养他们独立学习的能力。

“线性电子线路”是一门实践性较强的技术基础课。许多理论概念必须通过实践才能获得更清晰的了解,在实践中积累丰富经验就能更主动地学好理论。因此,在学习本课程时必须高度重视实验环节,坚持理论联系实际的原则。

我们主张教材只能起到主要参考书的作用。在满足教学大纲所规定基本内容的前提下,教师可以有自己的教学体系和阐明问题的方法,不要受一本教材的束缚,还应指导学生多看些书,这样才能促进教学质量的提高。

本书由谢嘉奎主编。在谢嘉奎主持下,共同拟定了改编的指导思想及各章的改编大纲。由谢洪隍编写第一、二、三、四、六和附录各章,金宝琴编写第五、七、八、九各章。在整个编写过程中,谢洪隍还协助对全书进行修改和文字加工,最后由谢嘉奎定稿。

本书的部分习题是从南京工学院无线电工程系电子线路习题集编写组所编《电子线路习题集》中选取的。

本书由北方交通大学蒋焕文副教授主审,北京工业学院俞宝传教授复审,他们都提出了许多宝贵的修改意见。这些意见对本书的编写帮助很大,在此谨向他们致以衷心的感谢。

我们还要向广大读者、兄弟院校和本院的教师致以衷心的感谢,他们对第一版提出的批评和建议,以及对第二版提出的希望和要求,都对这次改编有很大帮助。

限于水平,本书仍可能有不少不妥和错误之处,恳请读者提出批评。

编 者

1983年9月

第一版前言

一九七零年我们编写了《电子线路》讲义，作为我院无线电技术类专业的试用教材。在此基础上，根据一九七七年全国高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上“电子线路”小组讨论修订的编写大纲作了较大的修改和补充，编写成本书。

根据编写大纲的要求，本书加强了以下两个方面的内容：第一，半导体器件的工作原理；第二，同一类型电路的共同物理本质及其分析方法。电子线路所涉及的分析方法主要有非线性电路的各种近似分析方法和反馈电路的分析方法。

由上述考虑，本书不按工作频率的高低来分类，而按分析方法相同的电路归类，例如小信号放大电路、功率放大电路、正弦波振荡电路、频率变换电路等，以便联系对比，讲清电路的物理本质和分析方法。同时还注意介绍各种新的电路技术，使学生开阔思路。

我们期望，通过本书的学习，学生能掌握电子线路的分析方法，较深刻地认识各种电路的物理本质，这样，他们才能适应电子技术迅速发展的需要。

本书的编写组由谢嘉奎、陈永彬、陈笃信担任主编，成员有：吴林如、林福华、祝宗泰、李潜生、陈子敏、谢洪贍、彭沛、邹家驊。其中陈笃信、谢洪贍、林福华、陈子敏还做了大量的具体工作。

北京工业学院俞宝传教授担任本书的主审，进行了认真细致的审阅，并提出了许多宝贵的意见。

北京工业学院、华中工学院、成都电讯工程学院、西安交通大学、华南工学院、重庆大学、浙江大学、北方交通大学、北京航空学院、国防科学技术大学、合肥工业大学、大连工学院、大连海运学院、上海科技大学、南京邮电学院、南京航空学院、清华大学、中国

科学技术大学等有关同志参加了本书的审稿会议，他们也都提出了宝贵的意见。

在编写本书时，我院吴伯修教授进行了指导。在教材中还引用了我院田良、沈永朝、詹宏英、周文兴、周寿根等同志编写的讲义。

成都电讯工程学院魏志源同志为本书编写了“负反馈放大器的另一种分析方法”的附录。

我们对上述单位和个人表示深切谢意。

限于编者的水平，本书对分析方法的介绍还不够系统；各种具体电路的工作过程及工程设计方法的介绍还嫌太多。此外，还有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

南京工学院无线电工程系

《电子线路》编写组

1979年1月

目 录

第一章 晶体二极管的基本特性	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 半导体物理基础知识	1
1-2-1 本征半导体	2
1-2-2 杂质半导体	5
1-2-3 载流子在电场作用下的漂移运动	8
1-2-4 载流子在浓度梯度作用下的扩散运动	10
§ 1-3 PN 结.....	11
1-3-1 动态平衡下的 PN 结	12
1-3-2 PN 结的伏安特性	15
1-3-3 PN 结的击穿特性	21
1-3-4 PN 结的电容特性	23
1-3-5 晶体二极管的伏安特性	26
*§ 1-4 特种二极管	29
习题	34
参考文献	37
第二章 晶体三极管的基本特性	38
§ 2-1 概述	38
§ 2-2 晶体三极管的工作原理	39
2-2-1 内部载流子的传输过程	39
2-2-2 晶体三极管各极电流与结电压的关系	44
§ 2-3 晶体三极管的伏安特性曲线	47
2-3-1 共基极伏安特性曲线	48
2-3-2 共发射极伏安特性曲线	52
§ 2-4 集成工艺	60

2-4-1 集成工艺的标准流程	61
2-4-2 集成元器件	65
习题	74
参考文献	77
第三章 场效应管的基本特性	79
§ 3-1 结型场效应管	79
3-1-1 JFET 的工作原理及相应的伏安特性	80
3-1-2 JFET 的集成工艺	86
§ 3-2 绝缘栅场效应管	87
3-2-1 N沟道增强型 MOSFET	88
3-2-2 其它类型 MOSFET	93
3-2-3 MOSFET的集成工艺	96
§ 3-3 场效应管和晶体三极管的比较	99
习题	100
参考文献	104
第四章 放大器基础	105
§ 4-1 放大器的基本概念	106
4-1-1 放大的原理和实质	106
4-1-2 小信号放大器的分析方法	110
§ 4-2 晶体三极管的小信号等效电路	115
4-2-1 混合 Π 型等效电路	116
4-2-2 H 参数等效电路	121
4-2-3 等效电路参数之间的相互转换	124
§ 4-3 基本组态电路的性能	126
4-3-1 放大器的性能指标	126
4-3-2 共发射极放大电路	133
4-3-3 共基极和共集电极放大电路	139
4-3-4 组合放大电路	143
4-3-5 场效应管放大电路	145

§ 4-4 差分放大电路	149
4-4-1 电路特点	149
4-4-2 性能特点	151
4-4-3 大信号特性	164
§ 4-5 放大器的偏置电路	167
4-5-1 偏置电路的热稳定性	168
4-5-2 分压式偏置电路	170
4-5-3 恒流源偏置电路	172
4-5-4 场效应管放大器的偏置电路	177
§ 4-6 多级小信号放大器	178
4-6-1 级间耦合方式	179
4-6-2 共电耦合	181
4-6-3 多级放大器的增益	183
§ 4-7 放大器的噪声	185
4-7-1 起伏噪声的来源及其性质	186
4-7-2 放大电路中噪声的计算	190
4-7-3 放大器的噪声系数	192
习题	197
参考文献	214
第五章 放大电路中的负反馈	215
§ 5-1 反馈放大器的基本概念	215
5-1-1 反馈放大器的基本关系式	215
5-1-2 四种类型负反馈放大电路	217
5-1-3 反馈类型的判别	219
§ 5-2 负反馈对放大器性能的影响	222
5-2-1 输入电阻	222
5-2-2 增益及其稳定性	223
5-2-3 输出电阻	226
5-2-4 失真和噪声	229
§ 5-3 负反馈放大器的性能分析	231

附录：用网络的观点导出拆环的分析方法	239
习题	243
参考文献	256
第六章 集成运算放大器及其基本应用电路	257
§ 6-1 概述	257
§ 6-2 集成运算放大器电路	260
6-2-1 集成运放中的输入级	260
6-2-2 F 007集成运放电路	263
§ 6-3 MOS集成运算放大器电路	267
6-3-1 MOS 集成运放的基本单元电路	268
6-3-2 MOS 集成运放电路举例	279
§ 6-4 集成运算放大器的基本应用电路	281
6-4-1 集成运放的理想化条件	281
6-4-2 反相和同相放大器	283
6-4-3 集成运放的运算误差	289
6-4-4 电压比较器	293
习题	299
参考文献	308
第七章 放大电路的频率响应	310
§ 7-1 概述	310
§ 7-2 复频域分析方法	311
7-2-1 传递函数和极零点	311
7-2-2 系统的波特图	313
7-2-3 上限频率	319
7-2-4 负反馈对系统频率特性的影响	322
§ 7-3 单级放大器的频率特性	327
7-3-1 晶体三极管的频率参数	327
7-3-2 共发射极放大电路的频率特性	329
7-3-3 共集电极和共基极放大电路的频率特性	336

§ 7-4 集成宽频带放大器	341
7-4-1 组合电路宽带放大器	342
7-4-2 负反馈宽带放大器	343
§ 7-5 负反馈放大器的稳定性	355
7-5-1 判别稳定性的准则	355
7-5-2 集成运放的相位补偿技术	359
§ 7-6 小信号谐振放大器	367
7-6-1 概述	367
7-6-2 采用集中选频的小信号谐振放大器	369
7-6-3 采用分散选频的小信号谐振放大器	375
习题	381
参考文献	390
名词索引	391

第一章 晶体二极管的基本特性

§ 1-1 概 述

晶体二极管广泛用于各种电子设备中,它是一种由PN结构成的电子器件。PN结是由P型半导体和N型半导体有机结合而形成的,图1-1-1为其内部结构示意图及相应的电路符号。其中,接到P型半导体的引线称为正极;接到N型半导体的引线称为负极。

P型和N型半导体都是杂质半导体,它们是在本征半导体材料中掺入某种特定元素而形成的。因此,为了掌握PN结的单向导电性,就必须首先了解本征半导体、杂质半导体以及有关的半导体物理基础知识。

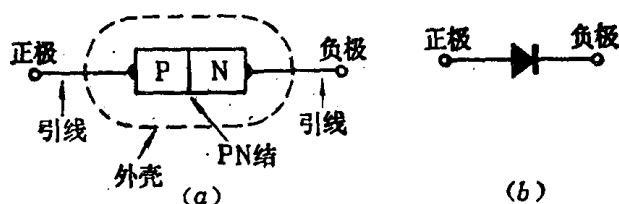


图 1-1-1 晶体二极管内部结构示意图(a)及相应的电路符号(b)

§ 1-2 半导体物理基础知识

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,它的电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。在自然界中属于半导体的物质很多,而用来制造半导体器件的材料则主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。其中硅用得最广泛;而在微波频段,主要采用砷化镓。

1-2-1 本征半导体

大家知道,原子是由带正电荷的原子核和分层围绕原子核运动的电子组成。其中,处于最外层的电子称为价电子,元素的许多物理和化学性质都与价电子有关。硅和锗的原子模型结构分别如图 1-2-1(a)和(b)所示。它们都有四个价电子,同属于四价元素。为了简化起见,常常把内层电子和原子核看作一个整体,称为惯性核,惯性核的周围是价电子。显然,硅和锗的惯性核模型是相同的,它们的惯性核都带有四个正的电子电荷量($+4q$),如图 1-2-1(c)所示。

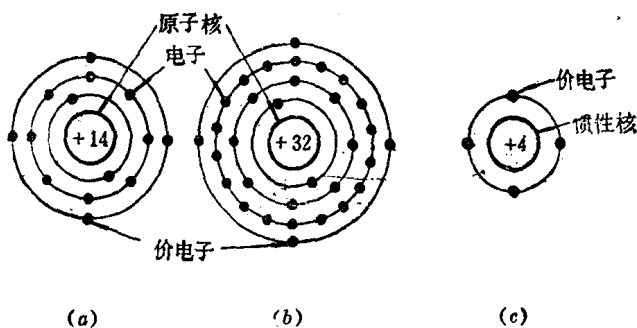


图 1-2-1 硅和锗的原子结构模型
(a)硅 (b)锗 (c)简化模型

硅和锗都是晶体,它们的原子都是有规则地排列着,并通过由价电子组成的共价键把相邻的原子牢固地联系在一起。共价键就是相邻两个原子各拿出一个价电子作为共用电子对而形成的相互作用力。因此,硅和锗中的每个原子均和相邻四个原子构成四个共价键。如图 1-2-2 所示。整块晶体内部晶格排列完全一致的晶体称为单晶。硅和锗的单晶称为本征半导体,它是制造半导体器件的基本材料。

一块本征半导体,在热力学温度 $T = 0 \text{ K}$ (开尔文) 和没有外界影响的条件下,它的价电子均束缚在共价键中,不存在自由运动的

电子。但当温度升高或受到光线照射时,某些共价键中的价电子从外界获得足够的能量,从而挣脱共价键的束缚,离开原子而成为自由电子,同时,在共价键中留下了相同数量的空位,这种现象称为本征激发。

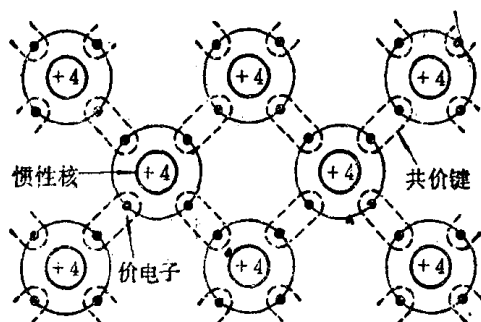


图 1-2-2 硅和锗的共价键结构示意图

当共价键中留下空位时,邻近共价键中的价电子就很容易跳过去填补这个空位,这样,空位便转移到邻近共价键中去;而后新的空位又被其相邻的价电子填补。这种过程持续进行下去,就相当于一个空位在晶体中移动,如图 1-2-3 所示。由于带负电荷的价电子依次填补空位的作用与带正电荷的粒子作反方向运动的效果相同,因此,可以把空位看作带正电荷的粒子,并把它称为空穴。可见,半导体借以导电的载流子比导体多了一种空穴,换句话说,半导体是依靠自由电子和空穴两种载流子导电的物质。本征激发产生的两种载流子总是成对出现的。

图 1-2-4 为硅和锗晶体的价电子能带图。图中,价带是被价电子所占据的能带,导带是挣脱了共价键束缚的自由电子所占据的能带,它们之间的禁带则是不能被电子所占据的能带。能带图的纵坐标表示电子能量,用 E 表示,单位为 eV (电子伏特),表示一个电子降落 1 V 电位时外力反抗电场力所作的功。可见,本征激发就是获得大于禁带宽度 E_g 能量的价电子从价带到导带的跃