

国外电子与通信教材系列

# 电子学原理

Electronics Concepts: An Introduction

[美] Jerrold H. Krenz 著

马爱文 赵霞 彭力 等译

何福友 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

当今,电子学与微电子学领域的相互渗透,使电子技术所涵盖的内容更加广泛。本书正是通过讲述电子学概念及其适当的应用,使读者加深对电子学的理解和基本原理的掌握。

本书内容包括:电子技术在各个领域的应用、半导体二极管及其电路、晶体三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、集成运算放大电路及直流电源等6部分。书中通过对各种半导体器件及其电路的分析,系统地阐述了电子学中的基本概念、基本原理和基本分析方法,介绍了电路实例,并附有一定数量的例题和习题,非常利于学习和实践运用。

本书可作为高等工科院校通信类、电子类专业的基础课程教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition published by The Syndicate of the Press of the University of Cambridge, England. Copyright © Cambridge University Press 2000.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2002.

本书中文简体专有翻译出版权由Cambridge University Press 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号:图字:01-2001-2157

### 图书在版编目(CIP)数据

电子学原理/(美)克伦茨(Krenz, J. H.)著;马爱文等译. -北京:电子工业出版社, 2002.5  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Electronics Concepts: An Introduction

ISBN 7-5053-7588-1

I. 电... II. ①克... ②马... III. 电子学 IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第029118号

责任编辑:王春宁

印刷者:中国科学院印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787 × 1092 1/16 印张:24.25 字数:621千字

版 次:2002年5月第1版 2002年5月第1次印刷

定 价:36.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077

# 前 言

今天的电子学和微电子学领域包含了大量的知识和实践,因此在教学过程中必须限定基本课程中涉及的主题,以避免仅仅成为大量电子电路和系统的百科全书式的目录。为了理解电子学,需要掌握一些着重强调的概念。作者的目的是用学生和教师都易于接受的方法来讲述电子学概念及其适当的应用,这是掌握一般概念及理解其限制条件的根本。本书的做法是讲好一定数量的主题,而不是包括粗略的大范围的主题,因为后者留给人们的只是一个数量巨大的词汇表。

本书内容非常充实,远远超出了电子学课程一学期的授课量。另外,本书需要读者有很好的线性电路的应用知识和对微积分学与物理学的正确理解。虽然有关材料的复杂性有所增加,但本书在选材方面很灵活。作者试图给出足够的说明材料,不仅说明做什么,而且说明特定电路是如何应用的。大部分章节都有详细解答的例题,这些解答使用了分析和计算机仿真两种方法。另外,本书还引用了大量的参考文献,使有兴趣的学生能在一个特定主题中学到更多的知识。

本书开篇第1章很有特色,这一章对许多电子系统进行了概述。它使学生的学习任务更加有趣,并引入了有关信号的概念。信号是用电子电路来处理的,电子电路的发展是为了满足特定的需要。同时,电子系统的进步依赖于当时可用电子器件的性能。本书是自上而下和自下而上方法的结合,考虑到了系统以及理解器件所需的基本物理概念。

本书是从电路理论课程中只讨论简单电路模型( $v=iR$ 等)适用的双端线性器件的一个过渡。尽管对于电路理论很少需要对模型及模型所代表的器件加以区分,但对于电子器件却不能这样。在电子学原理中,学生逐渐学习到每个器件所使用的模型的作用。特定模型的使用与器件所在电路的特性以及所加信号有关。对学生来说,带有非线性器件和三端(有时四端)器件电路的处理是概念上的显著飞跃。

第2章讨论了半导体结型二极管,包括对半导体物理特性的简单定性讨论。虽然人们认为深入学习半导体物理特性的知识非常重要,但作者认为这最好在同期和后续的理论课程学习中完成。电子学原理讨论的是由于电位的差异引起的电子和空穴的运动,从而为直观地理解半导体器件提供了一个基础。本章介绍了负载线、二极管特性方程及用于对二极管特性进行近似的各种二极管模型,讨论了光电电池和发光二极管的基本原理以及重要的应用。

第3章介绍了双极结型晶体管。首先讨论场效应器件的确有一定的吸引力,因为场效应器件的模型比双极结型晶体管简单。然而,双极结型晶体管是结型二极管的直接扩展,并且这种晶体管在做演示实验时更加方便。从宏观上强调了对分立半导体器件的理解,以及对与在放大和开关电路中使用器件有关的概念的理解。

第4章简单定性地讨论了MOSFET器件的物理特性,并介绍了其宏观表现的分析表达式。虽然包括了以小信号工作情况为基础的模拟电路的工作情况,但本章的主线是数字电路。对于采用适合于集成电路的器件结构的逻辑门,确定了其静态和动态工作情况。在双稳态电路之后,讨论了半导体存储器。

第5章的主题是运算放大器及负反馈。这里强调了运算放大器电路的负反馈性质,因为基本电路中经常使用的“理想运放”通常掩盖了运放电路的负反馈性质。负反馈虽然增加了复杂性,但可看出对没有反馈的电路有许多改进。同时也应强调,如果负反馈使用不当将会发生不合需要的结

果。本章突出了使用运放的模拟设计技术。

第6章的主题是关于电子电路的电源,讨论了整流器、滤波器、电子调整器和电池。关于这些器件的知识对于几乎所有的电子系统设计都是必要的,这些内容经常在基本电子学课程中被忽略。如果省略电子调整器一节,本章可以紧跟在第2章之后。

附录A中关于集成电路的制造把我们带到了本书所强调的电子电路之外。它使我们看到了制造过程中用到的物理和化学技术以及器件的实际物理结构和尺寸。附录B为设计过程,进行了几个简单电子电路的设计。每一步都有说明,这样学生就能理解设计的基本原理。

本书自始至终都使用了计算机仿真。我们假定每个学生都熟悉SPICE,即在线性电路课程中用到过它(如果没有,有大量的参考书可用)。所有版本的SPICE都一样,在所有仿真例题中都包括电路文件。虽然本书使用的是Probe(MicroSim)图形,但使用其他程序可以得到类似的解答。

本书包括了要求用分析方法求解的问题和要求用计算机仿真方法求解的问题。书中的问题和仿真比一学期课程所用的要多很多,这样,教师可以根据不同的学期进行不同的安排,并减少前几课的解答。计算机仿真只限于那些可在个人计算机上用学生版PSPICE程序运行的电路。书中还包含了自由发挥的设计练习。

每章中与理论直接相关的实验可以在World Wide Web上查找:

<http://www.cup.org/titles/66/0521662826.html>

实验使用的是便携式文件格式(扩展名为.pdf),以便于下载和打印。有详细的实验步骤来指导学生进行测量和观察,要求教师做的工作已降到最少量,当然也可以把实验部分作为课堂演示。

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 电子系统：一个世纪的发展历程 .....     | 1  |
| 1.1 电子器件：概述 .....              | 2  |
| 1.1.1 二极管 .....                | 2  |
| 1.1.2 真空三极管 .....              | 3  |
| 1.1.3 晶体管和集成电路 .....           | 5  |
| 1.2 无线通信：新的时代 .....            | 6  |
| 1.2.1 电子调谐 .....               | 7  |
| 1.2.2 真空管电路 .....              | 8  |
| 1.2.3 超外差式接收机 .....            | 9  |
| 1.3 电报和电话：广域连接 .....           | 10 |
| 1.3.1 电报 .....                 | 10 |
| 1.3.2 基本电话系统 .....             | 11 |
| 1.3.3 模拟电话信号 .....             | 12 |
| 1.3.4 数字电话系统 .....             | 13 |
| 1.4 电视：时间相关的可视图像 .....         | 14 |
| 1.4.1 模拟电视 .....               | 15 |
| 1.4.2 阴极射线管显像器 .....           | 16 |
| 1.4.3 摄像机设备 .....              | 17 |
| 1.4.4 数字电视 .....               | 19 |
| 1.5 电磁频谱：多种用途 .....            | 21 |
| 1.5.1 频谱 .....                 | 21 |
| 1.5.2 雷达 .....                 | 22 |
| 1.5.3 通信卫星 .....               | 24 |
| 1.6 计算机：数百万晶体管的组合 .....        | 25 |
| 1.6.1 逻辑电路 .....               | 26 |
| 1.6.2 计算机的基本框架 .....           | 28 |
| 1.6.3 存储器 .....                | 30 |
| 1.7 集成电路：器件尺寸缩小，复杂性提高 .....    | 33 |
| 1.8 参考文献 .....                 | 35 |
| 1.9 习题 .....                   | 37 |
| 1.10 计算机仿真 .....               | 42 |
| 第 2 章 半导体结型二极管：现代电子技术的基础 ..... | 44 |
| 2.1 电子和电导：基础知识回顾 .....         | 44 |
| 2.2 半导体：电子和空穴的作用 .....         | 48 |

|              |                             |            |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 2.2.1        | 本征半导体 .....                 | 50         |
| 2.2.2        | n 型半导体 .....                | 51         |
| 2.2.3        | p 型半导体 .....                | 52         |
| 2.3          | 结型二极管：典型的半导体器件 .....        | 55         |
| 2.3.1        | 内部电位分布 .....                | 57         |
| 2.3.2        | 外部电压的作用 .....               | 58         |
| 2.4          | 结型二极管：端特性 .....             | 59         |
| 2.4.1        | 二极管电流 .....                 | 59         |
| 2.4.2        | SPICE 模型 .....              | 62         |
| 2.5          | 二极管电路：如何处理非线性元件 .....       | 64         |
| 2.5.1        | 负载线 .....                   | 65         |
| 2.5.2        | 迭代法 .....                   | 66         |
| 2.5.3        | SPICE 求解 .....              | 67         |
| 2.6          | 结型二极管建模：近似模型 .....          | 72         |
| 2.6.1        | 理想二极管开关模型 .....             | 72         |
| 2.6.2        | 二极管恒压降模型 .....              | 74         |
| 2.6.3        | 折线模型 .....                  | 74         |
| 2.7          | 光电池：光 - 半导体的相互作用 .....      | 79         |
| 2.7.1        | 光子 .....                    | 79         |
| 2.8          | 发光二极管和激光二极管：光通信 .....       | 85         |
| 2.8.1        | 发光二极管 .....                 | 85         |
| 2.8.2        | 发光二极管的应用 .....              | 85         |
| 2.9          | 参考文献 .....                  | 92         |
| 2.10         | 习题 .....                    | 94         |
| 2.11         | 计算机仿真 .....                 | 103        |
| <b>第 3 章</b> | <b>双极结型晶体管：有源电子器件 .....</b> | <b>106</b> |
| 3.1          | 共基极组态：物理描述 .....            | 109        |
| 3.2          | 共射极组态：同样器件的不同用法 .....       | 114        |
| 3.2.1        | 等效电路 .....                  | 114        |
| 3.2.2        | 传输特性 .....                  | 115        |
| 3.2.3        | SPICE 仿真模型 .....            | 117        |
| 3.3          | 共射极等效电路：求解晶体管电路 .....       | 123        |
| 3.3.1        | 基极偏置电路 .....                | 123        |
| 3.3.2        | 发射极电阻 .....                 | 125        |
| 3.3.3        | 射极输出电压 .....                | 127        |
| 3.4          | 数字逻辑电路：静态和动态特性 .....        | 133        |
| 3.4.1        | 晶体管的工作区 .....               | 133        |
| 3.4.2        | 电容负载 .....                  | 134        |
| 3.4.3        | 逻辑系列 .....                  | 137        |
| 3.4.4        | 晶体管 - 晶体管逻辑 .....           | 140        |

|              |                                  |            |
|--------------|----------------------------------|------------|
| 3.5          | 放大电路：小信号特性 .....                 | 144        |
| 3.5.1        | 模拟信号 .....                       | 144        |
| 3.5.2        | 电容耦合 .....                       | 145        |
| 3.5.3        | 小信号等效电路 .....                    | 147        |
| 3.5.4        | 混合 p 型晶体管模型 .....                | 148        |
| 3.6          | PNP 晶体管：补偿器件 .....               | 154        |
| 3.6.1        | 对称补偿 .....                       | 157        |
| 3.7          | 参考文献 .....                       | 162        |
| 3.8          | 习题 .....                         | 162        |
| 3.9          | 计算机仿真 .....                      | 173        |
| 3.10         | 设计练习 .....                       | 175        |
| <b>第 4 章</b> | <b>金属氧化物场效应晶体管：另一种有源器件 .....</b> | <b>178</b> |
| 4.1          | 电场感应载流子：MOSFET 器件的物理特性 .....     | 181        |
| 4.1.1        | SPICE 模型 .....                   | 185        |
| 4.2          | 共源等效电路：应用 .....                  | 189        |
| 4.2.1        | 共源放大器 .....                      | 190        |
| 4.2.2        | 源极跟随放大器 .....                    | 192        |
| 4.3          | MOSFET 逻辑门：基本考虑 .....            | 200        |
| 4.3.1        | 基本的逻辑反相器 .....                   | 202        |
| 4.3.2        | MOS 管反相门 .....                   | 203        |
| 4.4          | 集成逻辑门电路：不需要电阻 .....              | 207        |
| 4.4.1        | 增强型负载 .....                      | 208        |
| 4.4.2        | 衬底偏置 .....                       | 209        |
| 4.4.3        | 耗尽型负载 .....                      | 211        |
| 4.5          | 互补的金属氧化半导体逻辑门：能量效率逻辑系列 .....     | 215        |
| 4.5.1        | P 沟道 MOSFET 器件 .....             | 216        |
| 4.5.2        | CMOS 的反相门 .....                  | 218        |
| 4.5.3        | CMOS 逻辑门 .....                   | 221        |
| 4.6          | 逻辑存储器：存储兆字节的基础 .....             | 224        |
| 4.6.1        | MOSFET 双稳态电路 .....               | 225        |
| 4.6.2        | 触发存储元件 .....                     | 226        |
| 4.6.3        | 存储阵列 .....                       | 227        |
| 4.6.4        | 动态存储阵列 .....                     | 229        |
| 4.7          | 参考文献 .....                       | 234        |
| 4.8          | 习题 .....                         | 235        |
| 4.9          | 计算机仿真 .....                      | 244        |
| 4.10         | 设计练习 .....                       | 246        |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 负反馈及运算放大器</b> .....  | 248 |
| 5.1 负反馈：关键概念 .....            | 250 |
| 5.1.1 分贝表示法 .....             | 252 |
| 5.1.2 减小失真 .....              | 253 |
| 5.1.3 负反馈对放大电路其他性能的改善 .....   | 256 |
| 5.2 稳定性：不是所有放大器都具有 .....      | 261 |
| 5.2.1 放大器的相移 .....            | 262 |
| 5.2.2 稳定性 .....               | 265 |
| 5.3 运算放大电路分析：基本思路 .....       | 271 |
| 5.3.1 理想运算放大器 - 输入端虚短 .....   | 272 |
| 5.3.2 运算放大器的局限性 .....         | 275 |
| 5.4 预加重和去加重电路：设计举例 .....      | 283 |
| 5.4.1 预加重电路 .....             | 283 |
| 5.4.2 去加重电路 .....             | 284 |
| 5.4.3 设计 .....                | 285 |
| 5.4.4 SPICE 证明 .....          | 287 |
| 5.5 宽带放大器：设计举例 .....          | 288 |
| 5.5.1 单级放大器 .....             | 289 |
| 5.5.2 两级放大器 .....             | 290 |
| 5.5.3 三级放大器 .....             | 290 |
| 5.5.4 最终设计 .....              | 291 |
| 5.5.5 SPICE 验证 .....          | 293 |
| 5.6 参考文献 .....                | 296 |
| 5.7 习题 .....                  | 296 |
| 5.8 计算机仿真 .....               | 302 |
| 5.9 设计练习 .....                | 305 |
| <b>第 6 章 电源</b> .....         | 307 |
| 6.1 整流器 .....                 | 308 |
| 6.1.1 半波整流器 .....             | 308 |
| 6.1.2 全波整流器 - 带中间抽头的变压器 ..... | 310 |
| 6.1.3 全波整流 - 桥式整流器 .....      | 311 |
| 6.2 滤波器：减小负载电压的波动 .....       | 316 |
| 6.2.1 电容滤波器 - 半波整流器 .....     | 316 |
| 6.2.2 电容滤波器 - 全波整流器 .....     | 318 |
| 6.2.3 非理想变压器 .....            | 320 |
| 6.3 齐纳二极管稳压器：改善输出电压 .....     | 325 |
| 6.4 稳压器：近乎理想的电源 .....         | 330 |
| 6.4.1 基本的运算放大器稳压器 .....       | 330 |
| 6.4.2 带齐纳二极管基准电压的稳压器 .....    | 332 |
| 6.4.3 使用带隙基准电压的稳压器 .....      | 333 |



|             |                          |            |
|-------------|--------------------------|------------|
| 6.4.4       | 开关式稳压器 .....             | 337        |
| 6.5         | 电池：一种越来越重要的电子能源 .....    | 338        |
| 6.6         | 参考文献 .....               | 342        |
| 6.7         | 习题 .....                 | 342        |
| 6.8         | 计算机仿真 .....              | 349        |
| 6.9         | 设计练习 .....               | 351        |
| <b>附录 A</b> | <b>集成电路的制造 .....</b>     | <b>352</b> |
| A.1         | 集成电路晶体管 .....            | 352        |
| A.2         | 制造过程 .....               | 355        |
| A.3         | 小结 .....                 | 358        |
| A.4         | 参考文献 .....               | 358        |
| <b>附录 B</b> | <b>设计过程 .....</b>        | <b>359</b> |
| B.1         | 双极结型晶体管电路（第 3 章） .....   | 359        |
| B.2         | 金属氧化物场效应晶体管（第 4 章） ..... | 363        |
| B.3         | 负反馈和运算放大器（第 5 章） .....   | 366        |
| B.4         | 电源（第 6 章） .....          | 368        |
| B.5         | 参考文献 .....               | 371        |

# 第1章 电子系统：一个世纪的发展历程

电子系统塑造了我们的日常生活。家庭中有大量的电子产品：收音机、电视机、录像机、高保真音响、便携式摄像机、盒式录音机及CD唱机、电话应答机、微波炉及个人计算机。虽然不是很明显，但复杂的电子产品控制了我们大部分的生活，例如，微处理器控制着我们的汽车。我们使用的电话系统，其功能是用电子设备放大和传输话音信号。利用微波或光纤与卫星的结合，我们的交谈可以传遍整个世界。从一个机场到另一个机场的安全飞行依赖于电子雷达系统，电子传感器和计算机可以使现代喷气式飞机“飞”起来。现代医疗工作依靠非常复杂的电子诊断和监控系统。此外，如果没有电子通信及信息处理系统，商业和工业部门将无法工作。无处不在的显示器昭示着我们正处于一个新的电子世界。

电子学改善了我们的生活，但有时也使生活变得更糟糕。虽然我们一直与世界上发生的事情保持着不变的联系，但也处于难以想像的武器破坏力的危害之中，而武器的破坏力依赖于电子学的进步。不管是为了设计和使用电子系统，还是为了指引电子系统的发展方向，对电子学的理解都是必不可少的，这样它们才能服务于人类生活条件的改善。

有人说，要想前进，必须知道自己的位置。20世纪是电子时代——直到1900年才出现现在称之为电子的器件。现代意义的术语“电子学”，直到1930年才开始使用（Süsskind 1966）。本章作为介绍性章节，从对电子器件的简要概括开始，接着讨论了无线系统：无线电。电子器件首先在收音机中得到应用，1904年发明了真空二极管，1906年发明了三极管。不仅无线电通信比真空管的发明早将近10年，而且，20世纪的前10年大部分系统都没有使用真空管。毫不夸张地说，真空管可以称为无线电通信的一场革命，它导致了连续发射信号和高灵敏度与选择性接收机的产生。随着真空管1913年在电话中的第一次应用，它就成了电话系统中的一个重要器件。真空管放大器和多路传输电路的使用，使长途电话业务得到了极大的扩展。20世纪后半期出现的晶体管和集成电路使得发展数字系统成为可能。随着这种发展，电话交换和传输系统又一次得到显著的提高。

一方面，电子设备的发展依赖于基础物理学原理的知识：真空中电子的行为及其与其他物质间的相互作用。另一方面，需要不断地开发电子器件以满足认知的需求。电子器件的特征决定了哪些应用能够实现。1.4节讨论的电视机，说明了电子设备的发展和专用集成电路之间的相互联系。模拟电视系统在20世纪30年代发展起来，在40年代后期进入商用。在20世纪剩余的时间里，电视都是基于这种模拟系统，惟一的进步是引入了彩色信息分载体。20世纪末数字系统发展了起来，它与模拟系统完全不同，并与其不兼容。虽然从传输方面看数字系统效率更高，但是所需的信号处理非常复杂。如果没有20世纪80年代发展起来的、用于编码和解码的超大规模集成电路（VLSI），就不可能有数字电视。

电磁频谱（1.5节）用于各种收音机、电视机及其他通信设备。虽然早期的雷达系统可以追溯到20世纪30年代，但是第二次世界大战促进了这项技术的快速发展。人们发明了能够传输和检测超高频信号（ $f > 1000 \text{ MHz}$ ）的新电子器件。20世纪60年代第一次发射的通信卫星也依赖于这种超高频（微波）器件。

数字电路导致了计算的革命。早期的计算机，直到20世纪60年代中期左右还依赖于真空管电

路。在今天看来,这些计算机不仅处理能力小,而且由于真空管可靠性的限制,频繁发生死机。固态器件不仅导致了可靠性的大幅度提高,而且使得拥有更高计算能力的机器成为可能。借助于超大规模集成电路,桌面计算机具有了10年前只有大型主机才能达到的计算能力。

不用说,除了这些讨论之外,电子器件和电路在许多其他应用中也已经很常见。功率电子学依赖于电子开关器件和电路。应用电子系统可以有效地完成频率电压转换以及交流变直流和直流变交流的转换。在医用电子学中,各种电子传感器电路与计算机系统一起发展起来,用来处理和显示数据。更进一步,电子系统,如心脏起搏器,已经很好地增进了机体的功能。依靠简单微处理器的电子传感和控制系统,其应用范围从可编程恒温器到汽车点火和燃料系统。涉及大规模计算能力的、更复杂的传感和控制系统已经应用于自动制造系统。虽然对这些的讨论及其应用已经超出了本章的范围,但应该认识到,不同的系统经常采用类似的电子器件和电路。为了理解最简单和最复杂的电子系统,有必要知道基本概念和本文主题。

## 1.1 电子器件: 概述

约翰·安布罗斯·弗莱明爵士(Pierce 1950; Shiers 1969)在英国制造出热离子阀,又称真空管。该管依据所谓的爱迪生效应,电流由灯泡中的热灯丝产生。通过用热灯丝附近装有电极的灯泡进行的一系列试验,弗莱明推断出电流为阴极电荷所致。我们现在知道,电流是由于热灯丝发射的电子被电极收集形成的。在某种程度上,该电流只由电子产生,到电极的电流是单方向的;在高真空度的管子中,不会形成相应于正电荷运动的电流。

### 1.1.1 二极管

弗莱明阀包括一个热灯丝(相当于灯泡中炽热的灯丝),该灯丝由外加电池所产生的电流加热。发射的电子由灯丝周围的屏极收集(图1.1)。尽管实际电流是由于电子从电极向屏极的移动产生的,但是屏极电流 $i_p$ 习惯上为正值,因为电流定义为正电荷的假定移动方向。正的屏极电压吸引电子,所以电流增加,反之负的屏极电压排斥电子,产生极小的电流或零电流。这种非线性作用导致了电流只有一个方向( $i_p \geq 0$ )。对于有效正电压,排空良好的管电流基本为零。

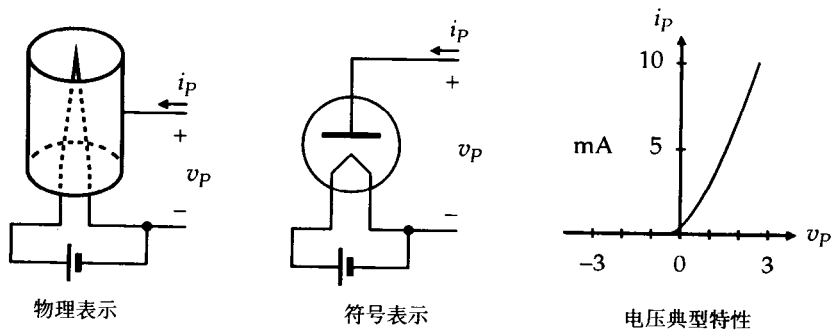


图 1.1 真空二极管及典型特性曲线

大约与弗莱明发明真空管的同时,Greenleaf W.Pickard正在试验一种点接触型的半导体检波器(Douglas 1981)。该器件可被看做现代固态器件的前身。除了Pickard制造的使用硅的检波器之外,

Henry H.C.Dunwoody 在 1906 年开发出了使用碳化硅的类似检波器。直到 20 世纪 50 年代引入面接触型结型半导体二极管以前，点接触型二极管得到了极大的应用。

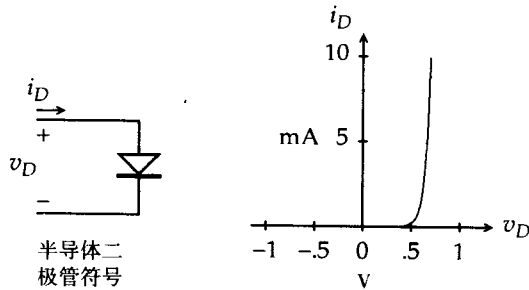


图 1.2 半导体二极管及典型特性曲线

与真空管一样，半导体二极管具有非线性特性（图 1.2）。二极管电流  $i_D$  随二极管电压  $v_D$  的增加而迅速增加（对于理想二极管，可以看出电流与电压成指数关系）。二极管的整流特性，即单向导电性，首先应用于无线信号的检波。检波问题推动了真空管和半导体二极管的发展。图 1.3 所示为使用典型调幅载波信号的基本无线电接收机。虽然早期通信系统的载波频率通常为 50 kHz 到 100 kHz，但是现在的无线广播波段包含了载波频率为 540 kHz 到 1600 kHz 的信号。对于开-关系统（连续波或称 CW），载波信号被简单地固定为开和关以形成点和划线。而对于调幅（AM），载波信号的幅度随被调制信号的变化而变化。例如由话筒产生的声音信号。

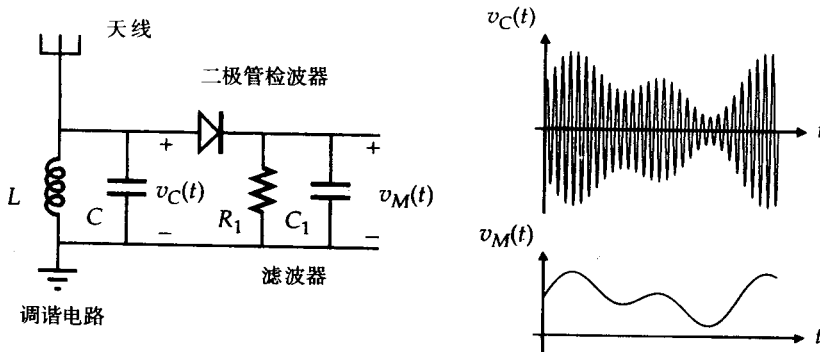


图 1.3 基本二极管无线电检波器

应该注意的是，载波频率的周期通常远小于被调制信号能感觉到的变化时间。在无线电接收机中，天线接收到的能量耦合到调谐电路，理想情况下，调谐电路去掉其他所有与载波频率不同的信号。接着用检波二极管把载波信号  $v_C(t)$  转换为单极信号。如电路所示，电容  $C_1$  可以平滑检出信号。如果没有这个电容，信号将类似于  $v_C(t)$  的上半部。

### 1.1.2 真空三极管

从影响来说，进入电子时代的第二个显著进步是，Lee De Forest 在弗莱明的真空二极管中加入了控制电极，或称栅极。这导致了真空三极管的产生。图 1.4 所示是它的实际器件示意图，因为有三个电极，所以被称为三极管。第三个电极，即栅极，是一个环绕在管中灯丝周围的笼子状金属丝结构。外加的栅极电位控制着管中的屏极电流。

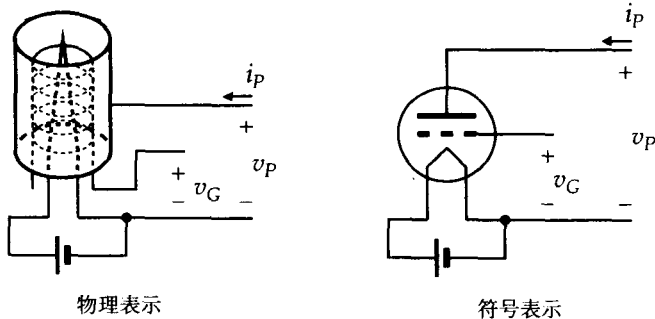


图 1.4 真空三极管

正常情况下，栅极处于负电位（相对于灯丝而言），这使得它倾向于排斥热灯丝发射出的电子。在给定屏极电压  $v_p$  的情况下（图 1.5），栅极电位越负，屏极电流越小。因为负的栅极电位排斥电子，所以栅极电流基本为零（在真空度不好的真空管中，因为电离的电子撞击空气分子而产生正离子，所以栅极会产生微小的电流。虽然 De Forest 的早期管子中栅极电流很明显，但后来真空度良好的管子中，栅极电流可忽略不计）。因为栅极电流基本为零，所以，栅极电路所消耗的功率接近于零。这里显示了真空三极管的价值，其栅极电压不仅控制着屏极电流和电压，而且控制所需的功率基本为零。它不是永动机（屏极电流需要电源），但是，对大部分应用来说，这是又一件好事！

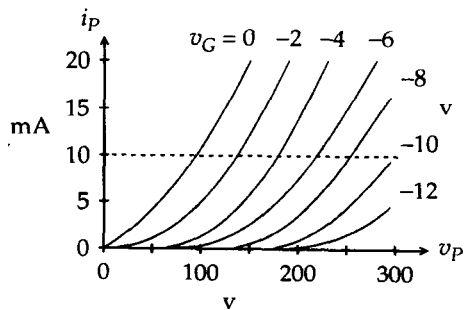


图 1.5 典型真空三极管的特性曲线

为了说明真空三极管的效用，考虑图 1.5 中的典型特征曲线，设管中灯丝和屏极间的直流电流为  $10 \text{ mA}$  ( $i_p = 10 \text{ mA}$ )。对于特殊值的栅极电压，屏极电压对应于栅极电压曲线与  $10 \text{ mA}$  坐标线（图 1.5 中的虚线）的交点。例如，栅极电压为  $-4 \text{ V}$  时，屏极电压为  $180 \text{ V}$ ，栅极电压为  $-6 \text{ V}$  时，屏极电压为  $220 \text{ V}$ ，依次类推。这样就得到图 1.6 中的转移特性曲线。特别重要的是，栅极电压相对较小的变化会引起屏极电压相当大的变化。图 1.6 中特性曲线的斜率约为  $-20$ 。这表明栅极电压变化  $1 \text{ V}$  将引起屏极电压变化  $-20 \text{ V}$ 。负号表明增加引起减小。因此该电路的电压增益约为  $20$ 。

De Forest 的第一个真空三极管用于检测无线电信号（代替图 1.3 中的二极管）；最初将其称为振荡阀。然而，因为真空三极管既能检测无线电信号又具有放大能力，所以，该管很快得到广泛的应用，其中包括产生无线电信号。

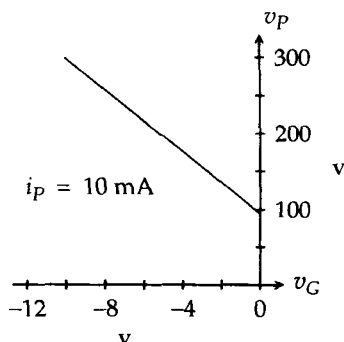


图 1.6 图 1.5 三极管的转移特性曲线

### 1.1.3 晶体管 and 集成电路

晶体管，作为固态器件，在大部分电子应用中代替了真空管，但不是全部。图 1.7 为现代金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 的代表符号和典型特性曲线。对该器件来说，自由电子由 MOSFET 半导体器件的源极 (Source) 流向其漏极 (Drain)。与真空管栅极方式类似，自由电子形成的电流由 MOSFET 器件的门电位控制。和三极管栅极电流一样，门 (Gate) 电流基本为零。不过自由电子不是由热灯丝而是由掺杂半导体产生，因而成为一种更高效的器件。还有，典型 MOSFET 所需的电压电平远小于典型真空管电路。除 MOSFET 器件以外，双极结型晶体管 (BJT) 也广泛应用于现代电路中。在 1948 年点接触型晶体管发明后不久，就开发出了锗双极结型晶体管。随着 20 世纪 50 年代硅生产技术的发展，到 20 世纪 60 年代在大部分应用领域都有锗和硅晶体管取代真空管的趋势。然而，正是集成电路的出现对电子系统产生了最深远的影响，最初在一个半导体晶片上集成了十几个晶体管。有人把这种影响称为一场革命 (Noyce 1977)。

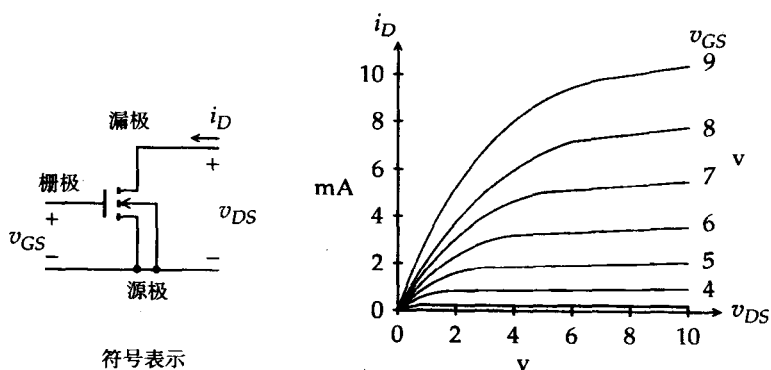


图 1.7 金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)

真空管通常在一个玻璃封装中只包含一个、两个或者可能三个电子器件。这些电路一般放置在一个底盘上，底盘上有带弹簧的插座用于固定真空管。这使得真空管具有易替换性——出于频繁更换的需求。插座与其他器件之间的连接靠手工焊线完成。像电阻、电容这样的小器件经常直接用其引脚支撑以形成器件之间的连接。

即使是 20 世纪 50 年代出现的最早期的商用晶体管也比他们所取代的真空管更可靠。因此，晶体管可用导线与电路直接相连，而无需插座。这导致了印刷电路板的产生，印刷电路板是在酚基上

粘合铜箔导体。晶体管及其他器件直接置于印刷电路板上,与铜箔的电气连接由浸焊完成。因为晶体管比真空管小得多,而且消耗的功率相当少,这使更高的器件集成度成为可能。

批量生产迅速发展起来,在此过程中,一个半导体晶片上同时安装几个晶体管。然后把晶片切割为单个的晶体管,引出引脚,最后把晶体管按应用要求进行封装。在装配过程中,单个晶体管经过测试,去掉不合格品。随着生产技术的进步,高性能器件的产量大幅增加。

回顾过去,现在显然要问:为什么要把半导体晶片中的单个晶体管分离出来,为什么没有一种工艺使器件在电气上彼此隔离(而不是通过切割来分离它们),然后器件可以在半导体晶片上互连接在一起,以形成我们现在所说的集成电路。这一想法在20世纪50年代末期得到了实现(Meindl 1977)。事情往往就是这样,许多独立工作的人都参与到了最早期的集成电路开发之中。然而,人们常常把集成电路的“发明”归功于Jack Kilby(Kilby 1976)。他在1958年演示了用锗晶体管手工装配的移相振荡器和触发器。电阻由合适的掺杂半导体组成,而电容则利用了反偏置的半导体结。该演示证明了这一想法的可行性,因而得到迅速的应用。

## 1.2 无线通信:新的时代

真空三极管最早应用于无线通信。它的发明者Lee De Forest把这个管自称为振荡阀——一种检测无线或收音机信号的器件(题外话,应该注意到Lee De Forest的自传题目是无线电之父,但这一称呼并没有得到广泛的认可)。电子器件和无线电的紧密联系是20世纪前半期特征。美国的有关专业组织是1912年成立的无线电工程师学会。直到1963年,该组织与电气工程师学会合并为电气与电子工程师学会(IEEE)的时候,“无线电”一词的命名才被取消。

麦克斯韦方程是电磁理论的核心,它为无线通信即无线电提供了基础。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦在库仑、奥斯特、安培、亨利、法拉第和高斯等人工作的基础上提出了这一著名的方程。通过一系列的实验观察和理论推断,亨瑞·鲁道夫·赫兹证明了麦克斯韦方程的有效性。赫兹在1892年发表了第一篇关于电动力学文章“Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft”(D. E. Jones的英译文题目为电磁波)。1894年赫兹死后,Oliver Joseph Lodge关于赫兹研究的演讲为更广泛的理解电磁原理提供了背景。Lodge和Ferdinand Braun为谐振思想的发展做出了贡献,并说明了把发送和接收系统调谐为同一频率的重要性(Aitken 1976, Jolly 1975, Kurylo和Süsskind 1981, McNicol 1946)。与此同时,把麦克斯韦方程转化为现在的应用形式要归功于Oliver Heaviside(Nahin 1988, 1990)。

早期电磁实验所遇到的难题是如何找到合适的高频信号检波器。早期的检波器是金属屑检波器,基本上是一个装满松散金属屑的小玻璃管。该器件依靠填充物的阻抗非线性特性工作。对于小电流,填充物阻抗很大,而对于大电流,填充物粘结在一起,使得阻抗变得很小。大电流过后,为了恢复高阻抗,需机械敲击粘着物。在接收端电磁信号产生的变化电流使金属屑粘结。这一结果可由与金属屑检波器相连的低压直流电路检测到。Edouard Branly制造出许多不同的金属屑检波器,并且因为把金属屑检波器命名为无线电导体而成为第一个使用术语“无线电”(本文中)的人。

1895年马可尼优化组装了合适的仪器,并证明了它可用于信号通信(Jolly 1972, Masini 1995)。因为意大利政府对他的新通信方式不感兴趣,马可尼来到英国,在这里得到英国邮政部的认可。马可尼认识到了无线电报的商业重要性,他申请了专利并创立了马可尼无线信号公司(Marconi Wireless Signal Company)。技术进展十分迅速,1901年就成功地发送了穿越大西洋的信号。

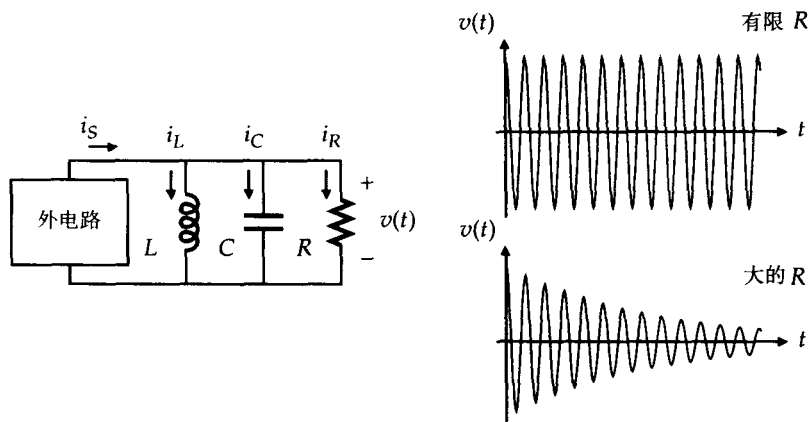


图 1.8 谐振电路

### 1.2.1 电子调谐

调谐是无线电通信的一个重要方面；即使电路在特定信号频率下实现最优响应。这一般可由图 1.8 所示的并联电感-电容电路来实现。电阻  $R$  是为了补偿电路损失（电感中的阻抗）和与电路相连的天线的能量辐射。早期的无线电发射是利用间隙放电产生的脉冲电流使电路开始电压振荡。考虑电路已经被启动且为零时的情况。这表明各器件的电流之和一定为零，如下式所示：

$$i_S(t) = i_L + i_C + i_R = 0$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int v \, dt, \quad i_C = C \frac{dv}{dt}, \quad i_R = \frac{v}{R} \quad (1.1)$$

这两个方程可以合并，再求微分得到信号的二阶微分方程：

$$\frac{1}{L} \int v \, dt + C \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} = 0$$

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{LC} = 0 \quad (1.2)$$

对于没有损失的理想电路 ( $R \rightarrow \infty$ )，微分方程的有效解为等幅振荡电压。如下所示：

$$v(t) = V_m \cos \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.3)$$

这样，该无损失电路一旦被外加电流激活。其电压将无休止地振荡下去。

对于有损失的电路 ( $R$  有限)，将发生以下阻尼振荡：

$$v(t) = V_m e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} + \left(\frac{1}{2RC}\right)^2} \quad (1.4)$$

最早期的无线电发射使用放电脉冲电流。现代发射机（电台和电视台、民用波段收发机、蜂



窝电话等)基本上也是依据同样原理,但在每个振荡周期都用电子起振电路提供脉冲电流的电路除外。

在起振电流消失之后,电路是如何保持振荡的呢?为了回答这个问题,我们必须回忆一下电感和电容的储能特性。设  $e_c$ 、 $e_L$  分别为电容和电感所存储的瞬间能量,则:

$$e_C = \frac{1}{2} C v^2, \quad e_L = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1.5)$$

考虑理想情况 ( $R \rightarrow \infty$ ) 时电压幅值不变 (式 (1.3)), 则:

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{1}{L} \int v dt = \frac{V_m}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t \\ e_L &= \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{\omega_0^2 L} \sin^2 \omega_0 t = \frac{1}{2} C V_m^2 \sin^2 \omega_0 t \quad \text{因为 } \frac{1}{\omega_0^2} = LC \end{aligned} \quad (1.6)$$

电路中总能量  $e_c + e_L$  为定值:

$$e_C + e_L = \frac{1}{2} C V_m^2 = \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{\omega_0^2 L} \quad (1.7)$$

可以看到,当电容存储能量为最大时,电感存储能量为零,反之亦然(图 1.9)。

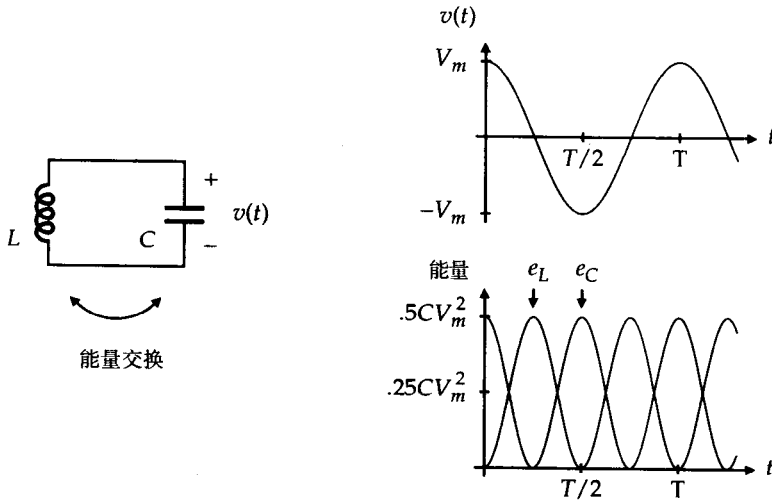


图 1.9 谐振电路的能量交换

实际上,电路中电容和电感的能量互相交换。对于有限阻值的电路来说,电能被电阻逐渐消耗;也就是,电能转换为热能(如果电阻为天线的等效结果,则辐射掉)。

## 1.2.2 真空管电路

随着真空管的发明,真空三极管得到极大的改进,大量的电子电路的开发大大地增进了管子的功效。1912年阿姆斯特朗再生式电路的发明及增加电路增益的正反馈的使用,增加了接收机的灵敏度。例如,利用阿姆斯特朗的再生原理,有可能只用一个真空管(或晶体管)就建立一个短波接