

电子技术

—— 模拟电路部分 ——

黄重高 牟 真 编
范振铨 蒋道凯

一机部部属高等院校试用教材

1981.12

内 容 提 要

本书是参照教育部 1980 年颁发的电工学教学大纲(机械类 150 学时)中有关模拟电路部分的要求编写的,内容包括:半导体二极管及整流技术、晶体管交流放大器、场效应管、晶体管正弦波振荡器、直流放大器与集成运算放大器、可控硅元件及其应用。书中各章附有思考题和习题。

本书责任编辑 萧鸿猷

一机部部属高等院校电工学协作组

前 言

本书是根据教育部颁发的电工学教学大纲(机械类150学时)中有关模拟电路部分的要求,由第一机械工业部电工学协作组织编写,作为部属高等院校有关专业的试用教材。

编写过程中,本书注意了总结教学实践经验。

在取材上,力图使读者在其他参考书不足的情况下,通过本书的学习,能达到大纲规定的要求。

在叙述方法上,采取“提出问题、定性分析、定量分析、小结归纳”的方式,以期达到便于自学的目的。

本书由沈阳机电学院电工学教研室编写。执笔者为:蒋道凯(第一、六章)、牟真(第二章多级放大器以前部分)、黄重高(第二章负反馈以后部分及第四章)、范振铨(第三、五章)。主审为:上海机械学院方德政、叶章光、陈离,陕西机械学院许开君、吴之玲、夏道智、王炳富。

本书脱稿后经过两次会议审稿,第一次审稿会议于1981年4月在沈阳召开,参加单位为湖南大学、上海机械学院、合肥工业大学、东北重型机械学院、太原重机学院、哈尔滨电工学院、甘肃工业大学和沈阳机电学院。第二次审稿会议于1981年10月在长沙召开,参加单位除上述院校外还有河北机电学院、佳木斯农机学院。

第二次审稿会议后,由电工学协作组建议,沈阳机电学院指定黄重高、牟真根据第二次审稿会议的意见,对全书负责改写、局部修改和定稿。改写和修改完毕后,又由上海机

械学院、湖南大学联合作了第三次审稿后定稿。

本书在编写过程中，各兄弟院校对原稿作了认真的审阅，上海机械学院方德政付教授、湖南大学萧鸿猷同志提出了许多宝贵意见，协作组在此表示感谢。

本书成稿仓促，修改工作过于紧迫，因此疏漏错误之处在所难免，恳切希望使用本书的老师 and 同学们不吝批评指正。

协 作 组

1981年12月

目 录

第一章 半导体二极管及整流电路

第一节 半导体的导电特性	(1)
一、本征半导体	
二、杂质半导体	
第二节 PN 结及其导电特性	(9)
一、PN 结的物理结构	
二、PN 结的导电特性	
第三节 半导体二极管	(13)
一、半导体二极管的伏安特性曲线	
二、半导体二极管的主要参数	
三、半导体二极管结构简介	
第四节 半导体二极管的应用—— 基本整流电路	(18)
第五节 单相全波整流电路	(22)
一、使用两个二极管的单相全波整流电路	
二、单相桥式整流电路	
第六节 三相桥式整流电路	(28)
第七节 滤波电路	(33)
一、电容滤波器 (C 滤波器)	
二、电感滤波器 (L 滤波器)	
三、复式滤波器	

第八节 稳压管及简单稳压电路	(40)
一、硅稳压二极管 (齐纳二极管)	
二、最简单的稳压电路	
思考题与练习题	(48)

第二章 晶体管交流放大器

第一节 概述	(52)
第二节 晶体三极管	(54)
第三节 晶体管的特性曲线	(61)
一、输入特性曲线	
二、输出特性曲线	
第四节 晶体管的主要参数	(69)
一、电流放大系数	
二、极间反向电流	
三、极限参数	
四、晶体管的参数与温度的关系	
第五节 晶体管的工艺结构及特点简介	(74)
一、合金管	
二、平面管	
第六节 晶体管基本放大电路	(75)
一、放大电路的工作原理	
二、放大电路中各元件的作用	
三、基本放大电路的改进与电路的习惯画法	
第七节 放大电路的近似计算	(85)
一、放大器直流量的计算	
二、放大器交流量的计算	

第八节 放大电路的图解分析法	(90)
一、输入端口伏安关系的图解分析	
二、输出端口伏安关系的图解分析	
第九节 放大电路的微变参数等效电路分析法	(104)
一、晶体管的线性模型	
二、晶体管的 h 参数微变等效电路	
三、用 h 参数微变等效电路分析法 计算晶体管电路	
第十节 静态工作点的稳定	(118)
一、晶体管参数的变化对静态工作点的影响	
二、稳定静态工作点的放大电路	
第十一节 阻容耦合多级放大器	(130)
一、放大倍数	
二、多级放大器的输入电阻与输出电阻	
三、多级放大器的频率响应	
第十二节 放大器中的负反馈	(143)
一、反馈的概念与极性	
二、反馈的方式	
三、负反馈对放大器性能的影响	
四、反馈方式的选择	
第十三节 射极输出器	(170)
一、电路	
二、电路分析	
三、射极输出器的应用	
第十四节 变压器耦合单管功率放大器	(181)
一、功率放大电路的特点	

二、变压器耦合单管功率放大电路	
第十五节 乙类推挽功率放大器简介	(1)
第十六节 互补对称电路	(194)
一、工作在乙类的基本互补对称电路	
二、互补对称电路的其它形式	
思考题与练习题	(207)

第三章 场效应管

第一节 结型场效应管简介	(227)
一、结构	
二、栅源电压对漏极电流的控制作用	
三、结型场效应管的放大作用	
第二节 绝缘栅场效应管	(230)
一、绝缘栅场效应管的结构和符号	
二、 N 沟道增强型 MOS 管的工作原理与特性	
三、 N 沟道耗尽型 MOS 管的工作原理与特性	
第三节 场效应管的主要参数和使用注意事项	(239)
一、直流参数	
二、交流参数	
三、使用注意事项	
四、场效应管与晶体管的比较	
五、场效应管基本放大电路	
思考题	(244)

第四章 晶体管正弦波振荡器

第一节 振荡器的组成与振荡的条件…………… (246)

一、由反馈产生自激振荡

二、振荡的平衡条件

第二节 LC 正弦波振荡器…………… (253)

一、变压器反馈式 LC 振荡器

二、电感三点式振荡器

三、电容三点式振荡器

四、JG₂—10 型接近开关电路分析

第三节 RC 正弦波振荡器…………… (260)

一、电路

二、RC 串并联网络的选频特性

三、RC 振荡器的工作原理

四、具有负反馈的 RC 桥式振荡电路

思考题与练习题…………… (268)

第五章 直流放大器与集成运算放大器

第一节 直流放大器与直接耦合中的新问题… (272)

一、静态电位的配合问题

二、零点漂移问题

第二节 直接耦合放大器中静态电位的配置… (277)

一、降低前级的静态集电极电位

二、提高后级的静态基极电位

三、NPN 型管与 PNP 型管的组合电路

第三节 基本差动放大电路	(280)
一、基本差动放大电路的工作原理	
二、差动放大电路的工作原理	
第四节 典型差动放大电路	(286)
一、电路的工作原理	
二、电路的定量分析	
第五节 具有恒流源的差动放大器与差动放 大器的输入输出方式	(295)
一、具有恒流源的差动放大器	
二、差动放大电路的输入输出方式	
第六节 集成运算放大器	(299)
一、集成电路简介	
二、集成运放的特点	
三、BG301 型集成运放的电路分析与 接线端的说明	
四、集成运放的主要参数	
第七节 集成运放的输入方式	(311)
一、反相输入	
二、同相输入	
三、双端输入	
第八节 集成运放的基本应用	(319)
一、比例运算	
二、加减法运算	
三、积分运算	
四、微分运算	
第九节 串联型稳压电路	(326)
一、典型串联型稳压电路	

二、串联型稳压电路的改进	
三、集成稳压电路	
思考题与练习题	(334)

第六章 可控硅元件及其应用

第一节 可控硅元件	(339)
一、可控硅元件的结构与工作原理	
二、可控硅的伏安特性与控制极特性	
三、可控硅的主要参数	
第二节 具有电阻性负载的单相半波可控整流电路	(347)
第三节 具有感性负载的单相半波可控整流电路	(350)
第四节 单相桥式可控整流电路	(353)
一、电阻性负载	
二、电感性负载	
第五节 可控硅元件的保护	(358)
一、可控硅的过电流保护	
二、可控硅的过电压保护	
第六节 单结晶体管触发电路	(360)
一、单结晶体管	
二、单结晶体管的自振荡电路	
三、单结晶体管的同步振荡及触发电路	
第七节 晶体管触发电路	(368)
第八节 可控硅交流调压	(370)
思考题与练习题	(372)

附录

- 附录一 半导体器件型号命名方法
- 附录二 常用半导体器件的参数
- 附录三 电阻器、电容器的标称系列值

第一章 半导体二极管及整流电路

按照管路结合的编排精神，本章内容包括半导体二极管、整流电路、滤波器、稳压管和简单稳压电路等几个组成部分。

在介绍二极管以前，对半导体的物理知识先做了简要的叙述。其中大部分内容应该是物理中已经学过的，这里加添的新知识不多。因此学习时应注意与已学知识的联系。

对于半导体二极管、稳压管两种电子器件，学习的注意力应主要放在器件的端口特性上，要理解它们的伏安特性曲线所显示的规律。在稳压管中介绍了动态电阻与器件的等效电路。这对二极管也是适用的。因此应将这部分内容与二极管也联系起来。

整流电路部分介绍了几种常用的整流电路，内容包括电路的工作原理，以及电路的输出电压、整流管工作电流、整流管工作电压的初步的定量分析、滤波器是作为整流电路的一个环节来介绍的。

稳压电路部分只介绍了稳压电路，内容包括稳压原理和稳压元件参数的选定。

第一节 半导体的导电特性

在电子电路中大量使用的晶体三极管、二极管、集成电路等器件都是用半导体材料制成的。为了学习这些器件，

首先应该对半导体材料的物理性能有所了解。因此，这里先就半导体的物理知识作一简要复习。

半导体在导电性能方面介于导体与绝缘体之间。然而这并不是它引起人们重视的原因。半导体材料之所以得到了广泛的应用，主要原因是它的导电机理与导体、绝缘体迥然不同，因而半导体有着一些独特的电性能。

宇宙间的各种物质都是由原子构成的，原子又是由一个带电的原子核与一定数目的带负电的电子所组成。电子分布在不同的壳层上，围绕原子核作不停的旋转运动。最外层的电子叫做价电子，它们不仅决定物质的化学性质，而且也决定了物质的导电性能，因此价电子是我们分析的主要对象。原子的内部结构通常用图1-1所示的模型来表示。由于我们的注意力主要集中在价电子上，因此在画模型图时，一般都略去内层电子而只画出价电子。

物体是由大量的原子组成的，这些原子之间存在着相互的作用，因此出现了与原子单独存在时不同的情况。对于晶体物质来说，原

子按一定的规则整齐地排列着，相邻的原子靠得很近，价电子受到相邻的原子核的吸引而不再属于某一个原子。它们在某一瞬间可以在甲原子周围运动，下一瞬间则可能转移到丙原子周围。这就是说：晶体的价电子可以在整个晶体中运动。这种现象叫做“电子共有化”。

导体与绝缘体的不同在于：在外电场中，导体的价电子

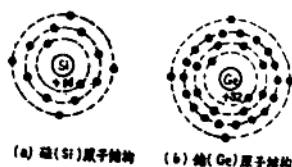


图1-1 硅、锗原子结构平面示意图

不仅能在各原子间作不规则的运动，而且能够在外电场作用下作定向运动。通常我们将这种电子叫做自由电子。导体之所以能够导电就是因为它的价电子是自由电子的缘故^①。而晶体绝缘物质，虽然价电子也因“共有化”可以在各原子间运动，但都不能在外电场作用下作定向运动。我们称这种电子为束缚电子。绝缘物质之所以不能导电就是因为它的价电子是束缚电子，而没有自由电子的缘故^②。

一、本征半导体

用来制作晶体管等器件的半导体材料都要先加工成单晶体。这种纯净的，晶体结构完整的半导体叫做本征半导体。

本征半导体的价电子在绝对零度($T=0^{\circ}K$) 和没有外界激发的条件下，都是束缚电子，这种情况与绝缘体相似。在这种条件下，本征半导体的价电子比较容易因外界的激发而成为自由电子。例如，温度升高到室温时，一部分价电子就会受到热激发而成为自由电子，从而使本征半导体具有一定的导电性。其它如光的照射，强烈的电场，磁场的影响也可能使束缚的价电子受到激发成为自由电子。这些被激发而形成的自由电子的数目与激发条件有着密切的关系，因此本征

① 这里仅指固态导体而言

② 从能带理论来说，导体的价电子是处于导带之中，因此价电子获得外电场提供的能量可以产生定向运动而形成电流；绝缘体的价电子是处于满带之中，而且禁带很宽，外电场提供的能量如果不是很大，价电子就不能跃迁到空的能级。在外电场不是很强的条件下，价电子就不能产生定向运动，因此不能导电。

半导体的电阻率随外界的激发条件（如温度、光照等）的不同而不同。这是半导体导电性能的一个重要特征。

半导体的导电机理与性能还存在另外的特征。现从常用的硅、锗材料为例来进行说明。硅和锗都是四价元素，每个原子都具有四个价电子，原子与原子之间依靠共价键结合成与金刚石相同的晶格结构，如果将空间晶格用平面图来表示，则可画成图1-2(a)的样子。可以看出在这种晶格结构中，每个硅原子周围有四个最靠近的原子，在两个邻近的原子中间有两个共有的价电子，它们形成了共价键。这相当于

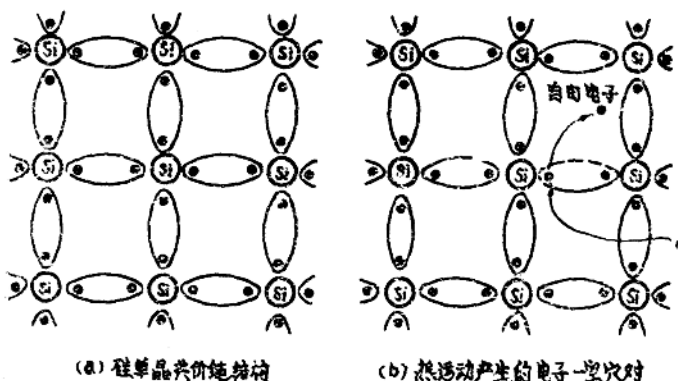


图1-2 硅晶体的结构与电子空穴对的产生

每个原子周围存在8个价电子，因此这是最稳定的状态。由于价电子的共有化运动，这些价电子可以在各原子间运动。但这种运动只形成各原子间价电子的交换，每个原子周围仍保持着8个价电子，故共价键仍是完整无缺的。

当某些价电子受到激发成为自由电子后，共价键就出现了缺陷。缺陷使原子失去电中性而带正电，我们将这个使原子带正电的空位称为“空穴”。可以想象，每有一个束缚电

子变为自由电子，必然同时出现一个空穴。因此在本征半导体中自由电子与空穴总是成对出现的，如图1-2 (b)。

由于价电子的共有化运动，空穴随时都有可能被附近的束缚电子填充而消失，但在填充空穴的束缚电子的原来位置上必然又出现一个新的空穴。这相当于空穴有了位置的移动。因此，价电子的共有化，不仅使价电子可以在整个晶体间运动，而且，也使空穴可以在整个晶体间运动。这些运动，如果只是由热运动所引起的，那么就完全是杂乱无章的。

如果将本征半导体放在外电场中，束缚电子填充空穴的运动就将出现“定向”的趋势：某些束缚电子在原来的无规则的运动上将迭加逆电场方向的运动去填充空穴，结果形成了一些束缚电子的定向运动，而产生电流。

这样在本征半导体中，就出现了两种电子的定向运动：一种是自由电子的运动，一种是束缚电子运动，本征半导体中的电流就是这两种电子定向运动形成的。

分析这两种电子的运动造成的影响，可以看出：在外电场作用下，自由电子全部作定向运动，因此自由电子越多，半导体的导电性能就越好，电阻率就越少；而束缚电子中只有能够填充空穴的才能作定向运动，因此影响半导体电性能的不是束缚电子而是空穴的多少，空穴越多，能够作定向运动的束缚电子也越多，半导体的导电性能就越好。因此，我们在讨论半导体的导电机构时常常以自由电子与空穴作为讨论对象。可以认为，在半导体中存在着两种能够定向运动形成电流的带电粒子：一种是带负电的自由电子，另一种则是带正电的空穴。这两种能够形成电流的带电粒子统称为载流子。在外电场作用下，自由电子逆电场方向作定向运动，空