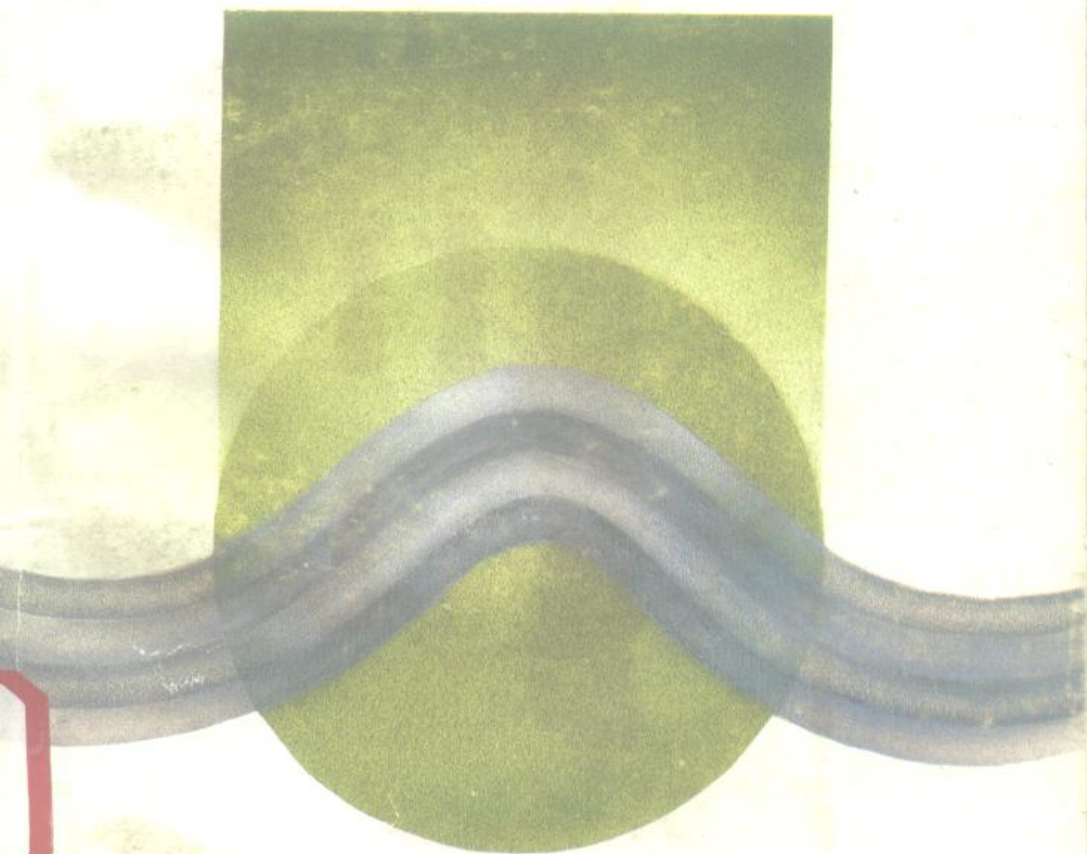


# 电子技术基础

## 模拟部分

虞光楣 主编



北京工业大学出版社

# 电子技术基础

模拟部分

主编 虞光楣

北京工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书是按照国家教委批准的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》编写的。

本书分为模拟和数字两部分出版。模拟部分包括：半导体器件的基本知识、放大电路基础、集成运算放大器、负反馈放大电路、集成运算放大器的应用、波形的发生和变换与功率电子电路，书中通过对半导体及其电路的分析，详细阐述了电子电路的基本概念、基本原理和基本分析方法，并附有一定量的电路实例、复习思考题及习题。全书结构严谨，通俗易懂，便于教师讲授和学生自学。

本书可作为高等工科大学电类专业的“电子技术基础”课教材，也可供同类专业工程技术人员参考。

### 电子技术基础——模拟部分

虞光楣 主编

※

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

※

1995年3月第1版 1995年3月第1次印刷  
787×1092毫米 32开本 15.5印张 347千字

印数：1~5000册

ISBN 7-5639-0409-3/T·38 定价：9.80元

(京)新登字212号

## 序 言

本书是参照1987年修订的《高等工业学校电子技术基础课程教学大纲》(草案)的要求,结合编者多年教学经验编写而成的。全书分两册出版。上册为模拟电子技术基础,下册为数字电子技术基础。本书可供高等工业学校电类各专业用作“电子技术基础”课程的教材,也可供有关工程技术人员自学参考使用。

编者在确定全书结构体系和精选教材内容时,首先确保把基本概念、基本原理和基本分析方法讲深讲透,以便读者举一反三。其次,为适应电子技术的迅速发展,我们注意到教材内容的更新,贯彻以集成电路为主的指导思想,为此,在模拟部分加强了以集成运放为中心的各种典型应用,数字部分则大幅度增加了中规模集成电路的应用。

为了便于教学,帮助读者自学,本书在分析问题时特别注意从物理概念上把问题讲清,删除过于烦琐的数学分析;文字上力求由浅入深,通俗易懂。每章后面都作了简明小结,提出教学要求,并附有一定数量的课外作业和思考题。因此,本教材也可用作高等工业学校非电类专业或电类专科班的教材。

本书第一、二、三章和第四章的一部分由虞光楣编写，第四、五章由陈文楷编写，第六、七章由范晓英编写。全书由虞光楣担任主编，负责组织、修改和定稿工作。

本书在编写过程中得到清华大学童诗白教授的热情指导。北京工业大学陆培新教授担任本书主审，对书稿进行了认真的审查修改，并对全书的结构体系和内容取舍提出了许多宝贵意见。编者谨致衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中必然有不少不足和错误之处，敬请批评指正。

编者

1994年12月

# 目 录

## 序 言

第一章 半导体器件的基本知识 .....	( 1 )
1.1 半导体的导电特性 .....	( 1 )
1.1.1 本征半导体 .....	( 1 )
1.1.2 杂质半导体 .....	( 5 )
1.1.3 PN 结 .....	( 8 )
1.2 半导体二极管 .....	( 13 )
1.2.1 半导体二极管的结构和种类 .....	( 13 )
1.2.2 半导体二极管的伏安特性 .....	( 15 )
1.2.3 半导体二极管的主要参数 .....	( 16 )
1.2.4 硅稳压管 .....	( 17 )
1.3 半导体三极管 .....	( 20 )
1.3.1 三极管的结构和种类 .....	( 20 )
1.3.2 三极管的电流放大作用 .....	( 22 )
1.3.3 三极管的特性曲线 .....	( 27 )
1.3.4 三极管的主要参数 .....	( 31 )
1.4 场效应管 .....	( 34 )
1.4.1 结型场效应管 .....	( 34 )
1.4.2 绝缘栅场效应管 .....	( 41 )
1.4.3 场效应管的主要参数 .....	( 46 )
本章附录 .....	( 50 )
自我检查题和习题 .....	( 56 )

第二章 放大电路基础 .....	( 62 )
2.1 概述 .....	( 62 )
2.1.1 关于“放大”的概念 .....	( 62 )
2.1.2 放大电路的性能指标 .....	( 63 )
2.2 单管共射极放大电路 .....	( 68 )
2.2.1 单管共射极放大电路的组成 .....	( 68 )
2.2.2 共射极放大电路的工作原理 .....	( 70 )
2.3 用图解法分析放大电路 .....	( 76 )
2.3.1 用图解法求放大电路的静态工作点 .....	( 76 )
2.3.2 用图解法分析放大电路的动态工作 情况 .....	( 79 )
2.3.3 放大电路的非线性失真 .....	( 83 )
2.4 用微变等效电路法分析放大电路 .....	( 85 )
2.4.1 提出微变等效电路的出发点 .....	( 85 )
2.4.2 三极管的微变等效电路 .....	( 86 )
2.4.3 利用微变等效电路分析放大电路的 动态性能指标 .....	( 92 )
2.5 射极偏置放大电路 .....	( 96 )
2.6 放大电路的三种组态 .....	( 101 )
2.6.1 共集电极放大电路 .....	( 101 )
2.6.2 共基极放大电路 .....	( 108 )
2.7 场效应管放大电路 .....	( 110 )
2.7.1 直流偏置电路和静态工作点 .....	( 110 )
2.7.2 用微变等效电路法分析场效应管 放大电路的动态性能 .....	( 114 )
2.8 多级放大电路 .....	( 120 )

2.8.1	多级放大电路的级间耦合方式	(120)
2.8.2	多级放大电路的电压放大倍数和 输入电阻、输出电阻	(126)
2.9	放大电路的频率响应	(137)
2.9.1	概述	(137)
2.9.2	三极管的高频参数和混合 $\pi$ 等效电路	(140)
* 2.9.3	单管共射极放大电路频率 特性的定量分析	(145)
2.9.4	多级放大电路的频率响应	(158)
	自我检查题和习题	(163)
	第三章 集成运算放大器	(175)
3.1	概述	(175)
3.2	差动放大电路	(178)
3.2.1	差动放大电路的组成	(178)
3.2.2	差动放大电路的静态分析	(179)
3.2.3	差动放大电路的动态分析	(180)
3.2.4	差动放大电路的四种接法	(186)
3.2.5	差动放大电路的改进	(195)
3.3	集成电流源及其应用	(199)
3.3.1	镜象电流源	(199)
3.3.2	微电流源	(200)
3.3.3	多路电流源	(202)
3.3.4	用电流源作放大电路的有源负载	(202)
3.3.5	用镜象电流源作差动放大 电路的有源负载	(203)
3.4	复合管电路	(204)



3.5	集成运放产品简介	(206)
3.6	集成运算放大器的性能指标和符号	(211)
3.6.1	主要性能指标	(211)
3.6.2	集成运放的符号和低频等效电路	(214)
	自我检查题和习题	(216)
第四章	负反馈放大电路	(223)
4.1	反馈的基本概念	(223)
4.1.1	什么是反馈	(225)
4.1.2	正反馈与负反馈	(226)
4.1.3	直流反馈与交流反馈	(230)
4.2	反馈放大电路的方块图和结构	(231)
4.2.1	反馈放大电路的方块图表示法	(231)
4.2.2	反馈放大电路的结构	(233)
4.3	负反馈放大电路的四种组态	(238)
4.4	负反馈对放大电路性能的影响	(245)
4.5	深度负反馈放大电路的近似计算	(257)
4.5.1	深度负反馈的特点	(257)
4.5.2	晶体管深度负反馈放大电路的 近似计算	(258)
4.5.3	集成运放深度负反馈放大电路的 计算	(261)
4.6	负反馈放大电路的自激振荡及 消除方法	(265)
4.6.1	产生自激振荡的原因和条件	(265)
4.6.2	用环路增益 $A_f$ 的波特图来 进行稳定判断	(267)
4.6.3	消除自激振荡的方法	(271)

自我检查题和习题 .....	( 277 )
第五章 集成运算放大器的应用 .....	( 285 )
5.1 加减运算电路 .....	( 285 )
5.1.1 加法运算电路 .....	( 286 )
5.1.2 单运放减法电路 .....	( 288 )
5.1.3 双运放减法电路 .....	( 291 )
5.1.4 差动放大电路 .....	( 292 )
5.2 积分电路和微分电路 .....	( 294 )
5.2.1 积分电路 .....	( 294 )
5.2.2 微分电路 .....	( 296 )
5.3 对数和指数运算电路 .....	( 298 )
5.3.1 对数运算电路 .....	( 298 )
5.3.2 指数运算电路 .....	( 303 )
5.4 模拟乘法器 .....	( 304 )
5.4.1 对数乘法器 .....	( 305 )
5.4.2 变跨导模拟乘法器 .....	( 307 )
5.4.3 模拟乘法器的应用 .....	( 313 )
5.5 精密交直流转换电路 .....	( 317 )
5.5.1 精密整流电路 .....	( 317 )
5.5.2 有源均值及峰值检测电路 .....	( 321 )
5.6 采样保持电路 .....	( 324 )
5.6.1 采样保持电路及功能 .....	( 324 )
5.6.2 集成采样保持器 .....	( 326 )
5.7 有源滤波器 .....	( 328 )
5.7.1 滤波器的基本概念 .....	( 328 )
5.7.2 简单的有源低通滤波器 .....	( 331 )
5.7.3 单运放二阶有源滤波电路 .....	( 336 )

5.8	电压比较器	(344)
5.8.1	简单电压比较器	(344)
5.8.2	滞回比较器	(349)
5.8.3	窗口比较器	(351)
	自我检查题和习题	(355)
第六章	波形的发生和变换	(364)
6.1	正弦波振荡电路	(364)
6.1.1	正弦振荡的条件和正弦 振荡电路分析	(364)
6.1.2	RC 正弦振荡电路	(370)
6.1.3	LC 正弦振荡电路	(375)
6.1.4	石英晶体振荡电路	(389)
6.2	非正弦波振荡电路	(393)
	自我检查题和习题	(404)
第七章	功率电子电路	(411)
7.1	功率放大电路的特点	(411)
7.2	互补功率放大电路	(415)
7.2.1	双电源乙类互补功率放大电路	(415)
7.2.2	甲乙类互补功率放大电路	(421)
7.2.3	采用单电源的互补对称 功率放大电路	(427)
7.3	集成功率放大电路的应用	(430)
7.4	直流稳压电源	(432)
7.4.1	直流稳压电路概述	(432)
7.4.2	整流滤波电路	(433)
7.4.3	稳压电路	(444)
7.4.4	集成稳压器	(460)

*7.4.5 开关稳压电源 .....	(469)
自我检查题与习题 .....	(478)
参考文献 .....	(483)

# 第一章 半导体器件的基本知识

## 内 容 提 要

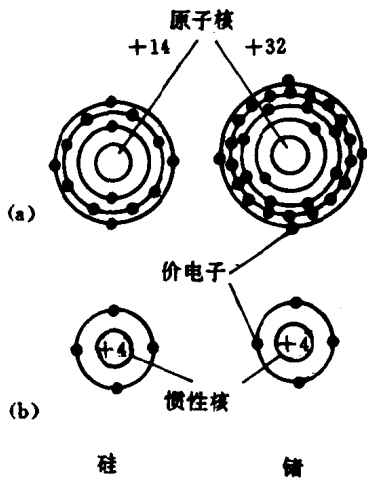
本章首先介绍半导体的导电特性，PN结的形成及其单向导电特性，然后依次介绍在电子线路中得到广泛应用的半导体二极管、三极管和场效应管的工作原理、特性和参数。关于近年发展起来的半导体集成电路，将在本书第三章和第九章介绍。

## 1.1 半导体的导电特性

### 1.1.1 本征半导体

#### 一、半导体的共价键结构

自然界的物质按其导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三类。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。硅(Si)和锗(Ge)是两种最常用的半导体材料。它们的原子序分别为14和32。也就是说，在它们原子核外层轨道上各有14个和32个电子分层围绕着原子核作旋转运动，如图1-1(a)所示。各层轨道上的电子都受到原子核的束缚。最外层轨道上的电子叫做价电子，它受原子核的束缚力最小。硅和锗都是四价元素，最外层轨道上都有四个价电子了。为了突出价电子的作用，我们采用图1-1(b)所示的简化模型分别表示硅和



(a) 原子结构 (b) 简化模型

图 1-1 半导体的原子结构

锗的原子结构。外层上四个黑圆点代表四个价电子，中央代表原子核和除价电子以外的内层电子电荷的总和，称为惯性核。

纯净不掺杂的半导体称为本征半导体。当人们把本征硅（或锗）制成单晶体时，它们的原子就按一定规律整齐排列，使原来属于某一原子的价电子为两个相邻的原子所共有，组成共价键结构，如图 1-2 所示。在共价键中，每一个价电子不仅受到本身原子核的束缚，同时还受到相邻原子核的束缚。每个硅原子的四个价电子分别与四个相邻的硅原子的一个价电子组成四对共价键，从而使每一个硅原子的最外层形成了拥有八个电子的稳定结构。

## 二、热激发使本征半导体产生两种载流子——电子与空穴

本征半导体中，共价键对价电子有很强的束缚力，每个

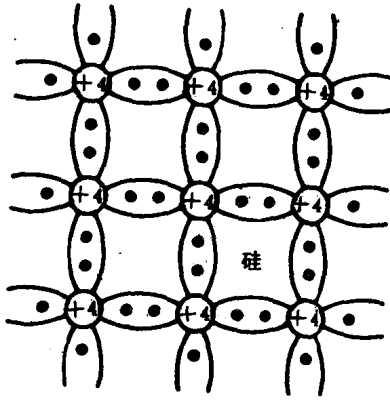


图 1-2 半导体的共价键结构

价电子同时受到相邻两个原子的原子核的共同束缚。在绝对零度 ( $-273.16^{\circ}\text{C}$ ) 时, 这些束缚电子不能挣脱共价键变为自由电子。因此, 本征半导体中, 不存在可以运载电荷的载流子, 在电场作用下不会产生电流, 故其导电能力与绝缘体一样。但在室温下, 或者在其它能量激发下, 少数价电子因获得足够的能量而脱离共价键, 变为自由电子, 如图 1-3 所示。自由电子是带负电荷的载流子, 能够在半导体中自由运动。当一个价电子脱离共键价变为自由电子的同时, 在原来共价键中就留下一个空位, 叫做空穴。中性的原子因失去一个电子而带正电, 它可能将相邻原子共价键中能量较大的价电子吸引过来填补这个空穴, 而在这个价电子原来的位置上又出现一个新的空穴。这种价电子填补空穴的运动, 其效果如同带正电的空穴沿着电子相反方向运动一样。因此, 我们可以把空穴看作是另外一种带正电荷的载流子。由此可知, 在热激发作用下, 本征半导体中同时出现了两种载流子: 带负

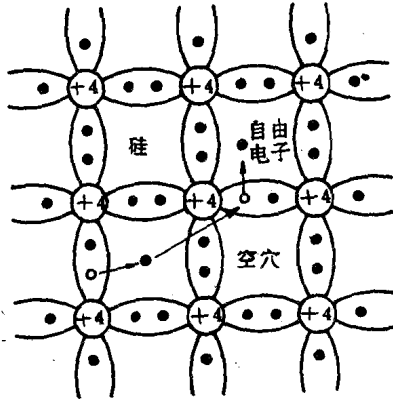


图 1-3 本征半导体的热激发

电荷的电子和带正电荷的空穴。它们总是成对出现的，所以也叫做电子空穴对。由于它们的数量相等，所带电荷的极性相反，所以，本征半导体是电中性的。

上述本征半导体因热激发而使电子与空穴成对出现的现象叫做本征激发。本征激发的同时，运动中的电子也可能跳入空穴，重新为共价键所束缚，电子与空穴同时消失，这种现象称为复合。在本征半导体中，激发与复合是一对不断进行着的矛盾运动。在一定温度下，电子和空穴对的产生与复合最终达到平衡，即单位时间内，电子空穴对的产生与复合的数量相等，从而使本征半导体中两种载流子的浓度保持不变，这个浓度称为平衡载流子浓度。当温度升高时，将打破这个平衡，有更多的价电子逸出共价键变为自由电子，同时产生空穴，使平衡载流子浓度增大，半导体的导电能力增强。可见，半导体的导电能力与温度有密切关系。

在外电场作用下，本征半导体中两种载流子都由杂乱无



载流子的运动变为有规则的定向运动：电子逆电场方向运动，空穴沿电场方向运动。虽然二者运动方向相反，但因它们所带电荷的极性也不同，所以这两种载流子运动所产生的电流方向是一致的，如图 1-4 所示。

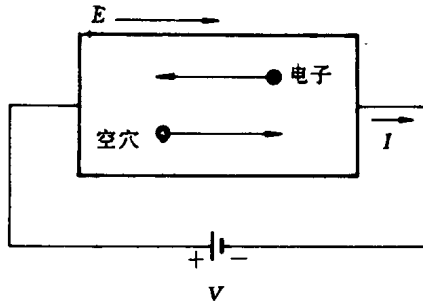


图 1-4 电场作用下的载流子漂移动动

**载流子在电场作用下产生的运动称为漂移运动**，漂移运动形成的电流称为**漂移电流**。图 1-4 说明，本征半导体在电场作用下产生的漂移电流为电子漂移电流和空穴漂移电流之和。

### 1.1.2 杂质半导体

若在本征半导体中掺入微量其它元素，将对半导体的导电能力产生巨大影响。我们把掺入的微量元素称为杂质，把掺入杂质以后的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质种类的不同，杂质半导体有 N 型半导体和 P 型半导体两种。

#### 一、N 型半导体

若在本征半导体中掺入微量五价元素，如磷、砷等，由于掺入杂质极其微量，所以它对本征硅的晶体结构影响很小，