

邮电中等专业学校试用教材

# 电子电路 I

长春邮电学校 编

人民邮电出版社



73.76

314

二

邮电中等专业学校试用教材

# 电 子 电 路

上 册

长春邮电学校 编



人 民 邮 电 出 版 社

1109186

## 内 容 提 要

本书详细地讨论了半导体器件、晶体管电路的基本原理和基本电路的分析方法。并结合邮电通信、电子设备，进行了具体分析。本书结合各章的特点，提供了思考题、习题和小结，供师生参考。

电子电路共分三册。本书（上册）共分十二章，包括：晶体二极管和整流电路；晶体三极管和静态特性；晶体管放大电路基本分析方法；晶体管前置放大电路；晶体管功率放大电路；负反馈放大电路；晶体管高频等效电路；晶体管振荡电路；晶体管直流放大电路；直流稳压电源；晶体管逆变器电路；场效应管和放大电路。

本书是适用于邮电中等专业学校的教学用书。

## 电 子 电 路

### 上 册

长春邮电学校 编

\*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

\*

开本：787×1092 1/32 1979年10月 第一版

印张：17 16/32 页数：280 1980年7月河北第2次印刷

字数：402千字 印数：76,001—86,000册

统一书号：K15045·总2327—无681

定 价：1.35元

## 前 言

本书是邮电中等专业学校教学用书。为适应新形势下邮电教育事业发展的需要,1978年,我们组织部分邮电学校分工编写微波、载波、市内电话、线路、电报、电源、综合电信和邮政机械等八个专业所用的基础课和专业课的教学用书,并将陆续出版,以应各邮电中等专业学校教学急需。

编好教材,是提高教学质量的关键。我们组织编写本教材时,力求以马列主义、毛泽东思想为指导,努力运用辩证唯物主义的观点阐明科学技术的规律,内容上注意了少而精,尽量反映科学技术的新成就。由于编写、审定的时间仓促,又没有经过教学实践的检验,书中会有不少缺点和错误。希望有关教师和同学在使用过程中,把发现的问题提供给我们以便修改提高。

邮电部人事教育局

一九七八年十二月

## 编 者 的 话

本书是通信各专业共同的基础课。在学过数学、电工有关章节之后便可讲授。

由于本书是照顾所有的通信专业需要而写的，内容较多。所以可以根据不同的通信专业实际需要内容进行精选，讲授也可以有所侧重，以适应所设专业的教学大纲。

本书（上册）共十二章，其中第一、二、三、六、十、十一章由林哲民同志执笔，第四、五、十二章由王植槐同志执笔，第七、八、九章由朱德育同志执笔。全书由林哲民统编，并经四川省邮电学校郭笃俊、程经华二位老师审核定稿。

1979.1

# 目 录

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| <b>第一章 晶体二极管和整流电路</b> ..... | ( 1 )   |
| 内容提要.....                   | ( 1 )   |
| 第一节 半导体基本知识.....            | ( 1 )   |
| 第二节 $PN$ 结和它的单向导电性 .....    | ( 13 )  |
| 第三节 晶体二极管.....              | ( 21 )  |
| 第四节 晶体二极管整流电路.....          | ( 30 )  |
| 第五节 整流的滤波电路.....            | ( 40 )  |
| 第六节 倍压整流电路.....             | ( 60 )  |
| 第七节 整流器件的串并联.....           | ( 63 )  |
| 本章小结.....                   | ( 65 )  |
| 复习思考题.....                  | ( 71 )  |
| 习题.....                     | ( 71 )  |
| <b>第二章 晶体三极管和静态特性</b> ..... | ( 75 )  |
| 内容提要.....                   | ( 75 )  |
| 第一节 晶体三极管的结构.....           | ( 75 )  |
| 第二节 晶体管共发射极电路的电流分析.....     | ( 77 )  |
| 第三节 晶体管共发射极静态特性曲线.....      | ( 84 )  |
| 第四节 晶体管的主要参数.....           | ( 92 )  |
| 第五节 晶体三极管简易测试.....          | ( 108 ) |
| 本章小结.....                   | ( 110 ) |
| 复习思考题.....                  | ( 112 ) |
| 习题.....                     | ( 113 ) |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| <b>第三章 晶体管放大电路基本分析方法</b> ..... | ( 114 ) |
| 内容提要.....                      | ( 114 ) |
| 第一节 放大电路的估算法.....              | ( 114 ) |
| 第二节 放大电路的图解分析法.....            | ( 121 ) |
| 第三节 影响放大器工作的几个因素.....          | ( 135 ) |
| 第四节 晶体管的偏置电路.....              | ( 139 ) |
| 第五节 晶体管 $h$ 参数和等效电路.....       | ( 148 ) |
| 第六节 放大电路的等效电路计算法.....          | ( 158 ) |
| 本章小结.....                      | ( 169 ) |
| 习题.....                        | ( 171 ) |
| <b>第四章 晶体管前置放大电路</b> .....     | ( 176 ) |
| 内容提要.....                      | ( 176 ) |
| 第一节 晶体管放大器特性指标.....            | ( 178 ) |
| 第二节 阻容耦合放大级.....               | ( 187 ) |
| 第三节 变压器耦合放大器.....              | ( 215 ) |
| 第四节 晶体管放大器的噪声.....             | ( 228 ) |
| 本章小结.....                      | ( 233 ) |
| 习题和思考题.....                    | ( 236 ) |
| <b>第五章 晶体管功率放大电路</b> .....     | ( 238 ) |
| 内容提要.....                      | ( 238 ) |
| 第一节 功率放大级特点.....               | ( 238 ) |
| 第二节 单边甲类功率放大电路.....            | ( 240 ) |
| 第三节 乙类推挽功率放大电路.....            | ( 247 ) |
| 第四节 大功率管的保护.....               | ( 257 ) |
| 第五节 无变压器功率放大电路.....            | ( 262 ) |
| 第六节 复合管及其应用.....               | ( 265 ) |
| 本章小结.....                      | ( 270 ) |

|                                                |         |
|------------------------------------------------|---------|
| 习题和思考题                                         | ( 271 ) |
| <b>第六章 负反馈放大电路</b>                             | ( 273 ) |
| 内容提要                                           | ( 273 ) |
| 第一节 负反馈放大电路基本概念                                | ( 273 ) |
| 第二节 负反馈对放大器性能的影响                               | ( 282 ) |
| 第三节 电流串联负反馈电路                                  | ( 294 ) |
| 第四节 电压串联负反馈电路                                  | ( 301 ) |
| 第五节 射极输出器                                      | ( 305 ) |
| 第六节 电流并联负反馈电路                                  | ( 311 ) |
| 第七节 电压并联负反馈电路                                  | ( 313 ) |
| 第八节 混合负反馈放大电路                                  | ( 315 ) |
| 第九节 低频放大器的自激振荡                                 | ( 325 ) |
| 本章小结                                           | ( 328 ) |
| 复习思考题                                          | ( 329 ) |
| 习题                                             | ( 331 ) |
| <b>第七章 晶体管高频等效电路</b>                           | ( 336 ) |
| 内容提要                                           | ( 336 ) |
| 第一节 晶体管共发射极混合 $\pi$ 型等效电路                      | ( 336 ) |
| 第二节 晶体管共基极 $h$ 参数等效电路                          | ( 347 ) |
| 本章小结                                           | ( 352 ) |
| 习题                                             | ( 353 ) |
| 〔附〕 晶体管 $f_{\beta}$ 、 $f_T$ 、 $f_{\alpha}$ 的推导 | ( 353 ) |
| <b>第八章 晶体管振荡电路</b>                             | ( 356 ) |
| 内容提要                                           | ( 356 ) |
| 第一节 振荡器的工作原理                                   | ( 356 ) |
| 第二节 三端式振荡电路                                    | ( 363 ) |
| 第三节 LC 振荡器频率的稳定性                               | ( 368 ) |



|                      |         |
|----------------------|---------|
| 第四节 电容三端式振荡电路的改进     | ( 371 ) |
| 第五节 石英晶体振荡器          | ( 375 ) |
| 第六节 $RC$ 振荡器         | ( 379 ) |
| 本章小结                 | ( 387 ) |
| 复习思考题                | ( 389 ) |
| <b>第九章 晶体管直流放大电路</b> | ( 390 ) |
| 内容提要                 | ( 390 ) |
| 第一节 直流放大器的特殊问题       | ( 390 ) |
| 第二节 差动放大器            | ( 396 ) |
| 第三节 差动放大器的改进         | ( 404 ) |
| 本章小结                 | ( 407 ) |
| 复习思考题                | ( 409 ) |
| <b>第十章 直流稳压电源</b>    | ( 410 ) |
| 内容提要                 | ( 410 ) |
| 第一节 硅稳压二极管           | ( 410 ) |
| 第二节 硅稳压管的稳压电路        | ( 417 ) |
| 第三节 简单串联型晶体管稳压电路     | ( 431 ) |
| 第四节 带有放大环节的稳压电路      | ( 446 ) |
| 第五节 串联型直流稳压电源的改进电路   | ( 456 ) |
| 第六节 直流稳压电源的保护措施      | ( 468 ) |
| 第七节 具有放大环节稳压电路的设计    | ( 471 ) |
| 本章小结                 | ( 481 ) |
| 习题                   | ( 483 ) |
| <b>第十一章 晶体管逆变器电路</b> | ( 486 ) |
| 内容提要                 | ( 486 ) |
| 第一节 逆变器一般概念          | ( 486 ) |
| 第二节 晶体三极管逆变器电路       | ( 487 ) |

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| 第三节 小功率可控硅.....             | ( 495 ) |
| 第四节 可控硅逆变器.....             | ( 500 ) |
| 本章小结.....                   | ( 508 ) |
| 复习思考题.....                  | ( 509 ) |
| <b>第十二章 场效应管和放大电路</b> ..... | ( 510 ) |
| 内容提要.....                   | ( 510 ) |
| 第一节 结型场效应管.....             | ( 510 ) |
| 第二节 绝缘栅场效应管.....            | ( 518 ) |
| 第三节 场效应晶体管使用常识.....         | ( 524 ) |
| 本章小结.....                   | ( 525 ) |
| 复习思考题.....                  | ( 526 ) |
| 附表.....                     | ( 527 ) |

# 第一章 晶体二极管和整流电路

## 内 容 提 要

本章主要介绍两部分内容，第一部分介绍晶体二极管的特性和它的重要用途（例如整流等用途）。为了理解和分析晶体管特性，首先介绍半导体基本知识。用硅和锗的晶体结构，引出电子和空穴两种不同的载流子；根据所掺不同的杂质，可分为 $N$ 型和 $P$ 型半导体；由 $P$ 型和 $N$ 型半导体所形成的 $PN$ 结的内部物理过程，说明 $PN$ 结的单向导电特性。

第二部分将介绍半波、全波、桥式和倍压整流电路。在滤波部分也要介绍电容滤波、电感滤波、 $L$ 型滤波、 $\pi$ 型滤波。对上述的这些电路除了作定性分析之外，也简单的介绍定量估算的方法。

## 第一节 半导体基本知识

晶体二极管、晶体三极管、场效应管、可控硅等都是用半导体材料做成的。所以这类管子又称为半导体管，或称半导体器件。因此，首先必须对半导体的特性作些简单的介绍：

### 1. 半导体基本特点

什么叫半导体呢？半导体这一名称是根据它的导电性能而

1109186

• 1 •

决定的。在日常生活和生产实践中，大家都知道铜、铁、铅、锡、铝等金属材料是很容易导电的，我们把它们称为导体。而塑料、橡胶、陶瓷、玻璃等物质却很不容易导电的，我们把它们称为绝缘体。在自然界中，实际上还有一类物体（如硅、锗、硒以及一些金属氧化物等），它们的导电能力比绝缘体强而比导体弱，我们把这类物体称为半导体。

大家知道，我们常用电阻率( $\rho$ )来表示一种物体的导电性能。电阻率( $\rho$ )是代表长1厘米，横截面积1厘米<sup>2</sup>的物体电阻，其单位是欧姆·厘米。显然，一个物体的电阻率越小，表示该物体的导电性能越好。图1—1示出了一般物体的导电性能的概况。由图可以知道半导体的电阻率大约在 $10^{-3}$ 到 $10^8$ 欧姆·厘米之间。

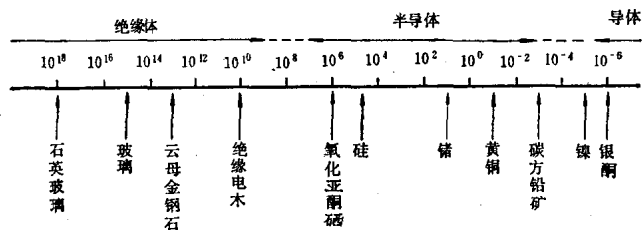


图 1—1 各种物体的电阻率（单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ）

半导体之所以获得广泛应用，主要是由于它具有如下的重要特性：

### (1) 杂质对半导体导电能力的影响

什么是杂质？在纯净的半导体中掺入微量的其它元素，这些微量元素就是杂质。

实践证明，金属导体对杂质很不敏感。例如在金属中即使掺入千分之一的杂质元素，其导电能力变化极微（一般是掺入

杂质后，其导电能力下降)。但是，在半导体中只要掺入百万分之一的杂质元素，则导电能力产生显著增长。例如在纯单晶硅中掺入百万分之一的硼，硅的电阻率就从 $0.214 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 下降到 $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右，几乎变化了一百万倍。如果掺入百万分之一的磷，硅的电阻率也有类似的变化。利用这一特性，人为地在纯锗或纯硅中掺入适当的杂质，就可以制成各种晶体管。

## (2) 热敏特性

半导体导电能力随温度上升而按照指数规律急剧地上升。例如硅的导电能力，在 $200^\circ\text{C}$ 比在 $20^\circ\text{C}$ 时增强几千倍。

与此相反，金属的导电能力随温度上升而直线下降。

从电阻率的角度来谈，半导体的电阻率具有负的温度系数，即半导体的电阻率随温度上升而下降。而金属的电阻率具有正的温度系数，即温度愈高则电阻率愈大。图1—2表示

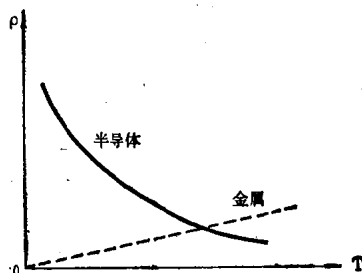


图 1—2  $\rho$  和  $T$  的关系

电阻率 $\rho$ 随绝对温度 $T$ 而变化的情况〔注〕。

利用半导体的热敏特性可以制成热敏电阻、热敏二极管等。

## (3) 光敏特性

如果光线照射到半导体上时，则半导体的导电能力就会明显地增强，我们把这种特性叫做光敏特性。例如半导体材料硫化镉在一般灯光照射下，比不照射时的导电能力增强几十倍甚

注： $T = 273 + t$ ，单位为 $^\circ\text{K}$ 。

至几百倍。一般说来，照射的光愈强，半导体的导电能力就愈显著地增加。利用这一特性可以制造各种光敏器件。

半导体除了具有以上特点外，它的导电性能还受磁场、电场、湿度及气压等的影响而改变，这里就不再叙述了。

## 2. 物质的原子结构

世界上所有的物质都表现出千差万别的特性，其根本原因就在于物质内部结构的不同。比如一般物体由于它们的原子或分子结构不同，因而它们的物理和化学性能也就不相同。半导体也是这样，它所以具有许多独特的性能这与它的内部结构是分不开的。

也就是说，世界上所有的物体都是由原子构成的。那么，什么是原子呢？简单说来，原子是由带正电的原子核和带负电的电子所组成，电子分几层围绕原子核作不停的运动。由于原子核所带的正电量和电子所带的负电量相等，故在一般情况下整个原子是中性的。

由于原子核和电子具有异性电荷，所以它们之间有相互吸引作用。同时又由于电子围绕原子核作不停地高速旋转，则它具有一定的动能，因此它不至于被吸到原子核上，并且与原子核保持着一定的距离。这就是所说的电子轨道半径。

事实证明，不同原子的电子数是不相同的，而电子在原子中的轨道又是有规律的。例如硅原子，它的原子核带14个电子电量的正电，而它的外围有14个电子按照一定的规律分布在三层电子轨道上。第一层有两个电子，第二层有八个电子，第三层有四个电子。锗原子的原子核带32个电子电量的正电，而它的外围有32个电子按照一定的规律分布在四层电子轨道上。第一层两个电子，第二层八个，第三层十八个，最外层也是四个

电子。硅和锗原子的结构如图1—3(a)和(b)所示。

内层电子离原子核较近,受原子核吸引力强,它与原子核结成较稳定的整体,称为原子实,而硅和锗的原子实的带电量都是 $+4$ 。

最外层的电子离原子核最远,受原子核的束缚力最小。不同元素之间的化学反应,正是由这外层电子同别的原子交换,这在化学上把外层电子称为价电子。硅和锗最外层都具有四个价电子,因而锗和硅都叫做四价元素,其原子结构可以用图1—3(c)所示的简化图来表示。

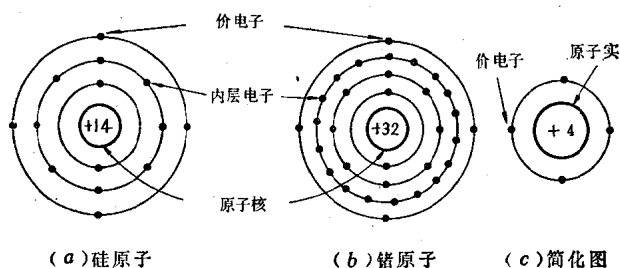


图 1—3 硅和锗原子结构示意图

大家熟悉的金属铜是两价元素。它的原子最外层有两个价电子,如图1—4(a)所示。大量铜原子结合成金属铜时,各原子的价电子一方面受自身原子核的束缚,而且还与周围相邻的原子发生联系。比较起来,金属材料的最外层价电子很容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子,如图1—4(b)所示。这些自由电子不是某一原子所独有的,而是整块金属所共有的。由于金属含有大量的自由电子,它们在外加电场的作用下,自由电子将作定向移动而形成电流,这就是金属导电的实质。

相反,绝缘材料中,原子的外层电子受原子核的束缚力很大,很不容易挣脱出来,因此形成自由电子的机会非常小。绝

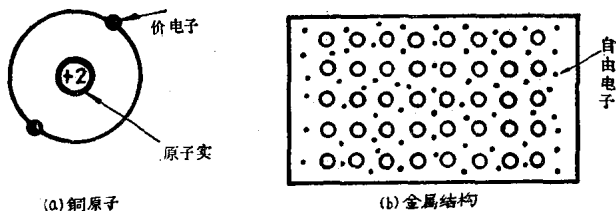


图 1—4 铜原子和金属结构示意图

绝缘材料原子结构的这一特点就决定了它的导电性能很差。

那么，半导体锗或硅原子中的价电子处于什么状态呢？为什么它的导电能力介于导体和绝缘体之间呢？为了解决这些问题，下面先介绍本征半导体，然后再介绍杂质半导体。

### 3. 本 征 半 导 体

不含杂质的半导体叫做本征半导体。化学元素硅(Si)和锗(Ge)是典型的本征半导体。这种半导体也称为纯净半导体或元素半导体。硅和锗等半导体材料都是晶体结构，因此用这种材料做成的半导体管又叫做晶体管。

普通一块晶体是由许许多多小晶粒组成的。而每个晶粒内部的原子是有规律的，并且按照一定的几何图案排列着。但应该指出，在一般情况下，晶粒内的原子排列虽然是整齐的，但从整块晶体来说，每个晶粒的方向（叫做取向）彼此不同，故原子的排列还是无规律的，不整齐的，这叫做多晶体。一般多晶体不能用来做晶体管。因此要把多晶体经过加工提炼成单晶体。单晶锗和单晶硅是制造晶体管的主要材料。

由上所述可以知道，所谓晶体就是指原子按一定的几何图案有规则排列的那些物体。用图 1—5 表示硅或锗晶体结构模型，图(a)是立体模型图；图(b)是图(a)的平面模型示意



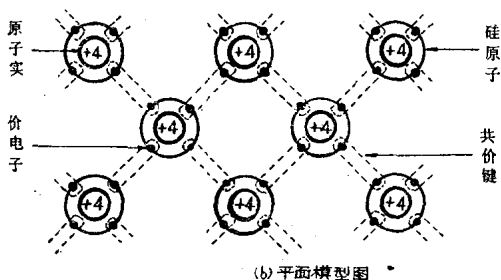
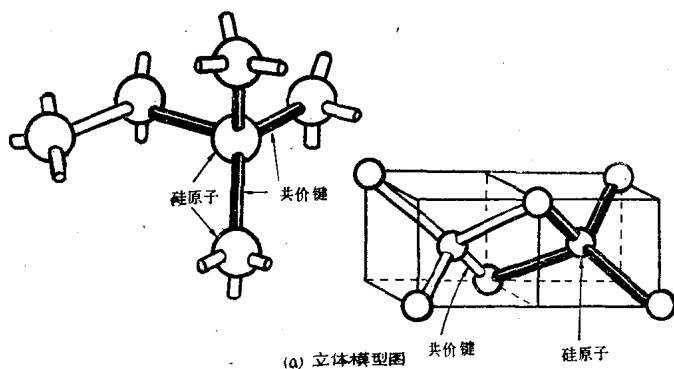


图 1—5 硅、锗晶体结构模型

图。

当硅、锗等半导体材料制成单晶体时，其原子排列就由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态，如图1—5(b)所示出的硅晶体。其中原子之间的距离都是相等的，约为 $2.35 \times 10^{-4}$ 微米。每个原子最外层有四个价电子，它们不仅受自身原子核的束缚，而且与周围四个原子发生关系。这时，每相邻两个原子之间都共有一对电子，叫“共有”电子对，“电子对”中的任何一个电子，一方面围绕自己原子核运动，另一方面也出现在相邻原子所属的轨道上，这种运动方式形成了联系两个原子的