

高等学校试用教材

# 电 工 学

(冶金地质矿业类专业用)

下 册

东北工学院编  
孙 骆 生 主 编



高等教育出版社

高等学校试用教材

# 电 工 学

(冶金地质矿业类专业用)

下 册

东北工学院编

孙骆生主编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是1977年10月〈高等学校工科基础课教材座谈会〉确定编写的，作为冶金、地质、矿业类120学时〈电工学〉的试用教材。

本书分两册出版。下册包括整流电路、晶体管放大电路、晶体管振荡器、数字集成电路、可控硅元件及其应用、非电量的电测法和电子管电路简介，书后附有常用电子器件型号和参数的附表。每章均附有小结和习题及习题答案。

本书也可供电工技术人员参考。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日，上级同意恢复“高等教育出版社”；本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校试用教材

## 电 工 学

(冶金地质矿业类专业用)

下 册

东北工学院编

孙骆生 主编

•

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

•

开本 850×1168 1/32 印张 12.5 字数 300,000

1979年4月第1版 1984年2月第7次印刷

印数 73,051—79,300

书号 15010·0139 定价 1.30元

# 前 言

本书是1977年10月教育部召开的高等学校工科基础课教材座谈会上确定编写的冶金、地质、矿业类专业电工学课程试用教材。内容包括电路、电机、电子技术三部分。为了适应我国社会主义现代化要求和满足自动控制、电子技术方面飞速发展的需要，电路部分增加了网络理论、非正弦和过渡过程等内容。电机部分内容作了一定的简化，较多地增加了电子技术的内容，其中适当反映了场效应管、集成电路、数字技术和程序控制等新技术。

为了加强基础理论，在电路和电子技术部分加强了有关内容。为了便于教学和培养分析问题的能力，教材中尽可能编写了较多数量的例题和实例，每章都编有小结和习题，并附有习题答案。为了扩大知识面，作为学习后续课程及实际工作的参考，编写内容略为广泛，这部分冠以“\*”号。可不列为教学计划内容。由于冶金、地质、矿业类专业要求差别较大，重点也各不一致，教学时宜根据不同专业的教学实际，恰当取舍内容，不能强求一律。

本书编写工作，上册由中国矿业学院电工教研室负责，第一、三、四章由丁钟旦、第二章由王纪春、第五、六、七、八、九章由刘惠鹏、第十章由戴鸿仪四同志分别编写。下册由东北工学院电工学教研室负责，第十一、十五章由孙骆生、第十二章由孙骆生、第十三、十六、十七章由吴铁坚、第十四章由刘学勤四同志分别编写。丁钟旦、孙骆生二同志分别为上、下册主编。全书由中南矿冶学院电工学教研室负责主审，由王翰霖、曾式梅、刘学勤、赵阜南、杨欣荣和黄芳草等同志参加审稿。根据审稿会议要求和主审单位安排，最后，由刘学勤、杨欣荣二同志复审。

参加本书审稿会的有中南矿冶学院、北京钢铁学院、广东矿冶学院、阜新矿业学院、山西矿业学院、武汉地质学院、成都地质学院、湖南大学、湘潭大学、湖北建筑工业学院等有关单位。他们对本书的编写工作提出了许多宝贵的修改意见，我们在此表示衷心感谢。

由于我们思想水平不高，业务理论知识有限，书中缺点错误一定不少，希读者给予批评指正，以便修改提高。

编 者

一九七八年十月

## 主要符号说明

### 一、符号(尽量采用国际通用符号)

$A, a$	阳极; 电流单位(安培)
$B$	磁感应强度
$C$	电容
$CP$	时钟脉冲
$D$	二极管; 场效应管漏极
$DTL$	二极管-晶体管逻辑集成电路
$D_z$	稳压管
$d$	位移; 距离
$E, e$	直流电动势, 电动势瞬时值
$E_c, E_a$	集电极电源, 阳极电源
$F, \tilde{F}$	电容单位(法拉); 反馈系数, 反馈系数的复数符号
$f, f_0$	频率, 振荡频率
$G$	场效应管栅极; 可控硅门极; 发电机
$g, g_1, g_2, g_3$	电子管栅极, 控制栅极, 帘栅极, 抑制栅极
$g_m$	跨导
$HTL$	高抗干扰逻辑集成电路
$i, I, \tilde{i}, I_m, \dot{I}$	电流的瞬时值和有效值(或直流电流), 交流电流的瞬时值、幅值及复数符号
$I_{CBO}, I_{CRO}$	晶体管集-基极和集-射极反向漏电流
$I_{CM}$	晶体管集电极最大允许电流
$I_{DSS}$	场效应管饱和电流
$I_F$	可控硅正向电流有效值
$I_{FE}$	可控硅允许的正向电流有效值
$I_{FAV}$	可控硅额定通态平均电流
$I_{F0}$	可控硅正向电流平均值
$I_{ib}$	线性组件输入偏置电流
$I_P, I_V$	单结晶体管峰点电流和谷点电流
$I_{ZM}$	稳压管最大稳定电流

$K$	阴极; 电压放大倍数; 应变片灵敏度
$\dot{K}, \dot{K}_o, \dot{K}_r$	电压放大倍数的复数符号, 开环和闭环电压放大倍数
$k$	变压器原付线圈匝数比; 电阻单位千欧简写
$L$	电感; 负载; 长度
$M$	互感; 电动机; 电阻单位兆欧简写
$N$	电子型半导体; 线圈匝数
$p, P$	功率的瞬时值和平均值; 空穴型半导体
$P_{CM}$	晶体管集电极最大允许耗散功率
PFV	可控硅正向重复峰值电压
PRV	可控硅反向重复峰值电压
$Q$	静态工作点; 品质因数; 电量
$r, R$	电阻
$r_o$	真空三极管内阻
$R_{GS}$	场效应管输入电阻
$R_L$	负载电阻; 交流等效负载电阻
$S$	面积; 电导单位西门子
$T$	晶体管; 周期; 温度
TTL	晶体管-晶体管逻辑集成电路
$t, t_a$	时间; 温度, 二极管反向恢复时间
$t_{on}, t_{off}$	晶体管的开启时间和关闭时间
$u, U, \tilde{u}, U_m, \dot{U}$	电压的瞬时值, 直流电压, 交流电压的瞬时值、幅值及复数符号
$U_{be}, U_{ce}$	晶体管基-射极电压和集-射极电压
$U_b, U_c, U_e$	晶体管基极电位、集电极电位及射极电位
$U_{CES}$	晶体管饱和管压降
$BV_{CEO}$	晶体管集-射极反向击穿电压
$BV_{DS}, BV_{GS}$	场效应管最大漏-源极电压和栅-源极电压
$u_g$	电子管栅极电压; 可控硅门极触发电压
$U_{RM}$	整流元件承受的最大反向电压
$U_P$	场效应管夹断电压; 单结晶体管峰点电压
$U_T$	场效应管开启电压
$U_V$	单结晶体管谷点电压

$U_{op}, U_{ei}$	TTL 的开门电平和关门电平
$X, \dot{X}$	电抗; 信号源, 信号的复数符号
$Z$	阻抗
$\alpha$	可控硅和闸流管的控制角
$\beta(h_{fe})$	晶体管共射极电流放大系数, 可控硅逆变角
$\delta$	衰减系数; 间隙长
$\varepsilon$	应变; 介电系数
$\eta$	效率; 单晶体管的分压比
$\theta$	可控硅和闸流管的导通角
$\mu$	电子管放大系数; 导磁系数; 电容单位微法简写
$\rho$	电阻系数
$\sigma$	应力
$\tau$	时间常数
$\Phi$	磁通量
$\varphi$	相角差
$\omega$	角频率

二、脚注(用英文字母, 上述符号作脚注者不重复)

$b$	基极 如 $U_{bb}$ (单晶体管两基极间电压)
$c$	集电极 如 $R_c$ (集电极电阻); $i_c$ (集电极电流)
$e$	发射极 如 $c_e$ (射极旁路电容)
$F$	正向; 反馈 如 $\dot{X}_f$ (反馈信号)
$H$	霍耳效应 如 $E_H$ (霍耳电动势)
$in$	输入 如 $U_{in}$ (输入信号电压)
$j$	PN 结 如 $c_j$ (PN 结电容)
$l$	线值 如 $U_l$ (线电压)
$os$	失调 如 $U_{os}$ (线性组件的输入失调电压)
$out$	输出 如 $i_{out}$ (输出信号电流)
$R$	反向 如 $I_R$ (反向电流)
$s$	石英; 饱和 如 $Z_s$ (石英晶体振荡器等效阻抗); $I_{cs}$ (集电极饱和电流)
$Z$	稳压管 如 $U_z$ (稳压管稳定电压)
max	最大值 如 $I_{cmax}$ (集电极电流最大值)
min	最小值 如 $U_{cemn}$ (管压降最小值)



# 目 录

<b>第十一章 整流电路</b> .....	1
第一节 半导体二极管.....	1
一、半导体二极管的单向导电性.....	1
二、半导体二极管中的 $PN$ 结.....	2
三、半导体二极管的伏安特性和参数.....	8
四、 $PN$ 结的反向击穿.....	10
五、二极管的开关特性.....	12
第二节 单相整流电路.....	15
第三节 三相整流电路.....	19
一、三相半波整流电路.....	19
二、三相桥式整流电路.....	21
第四节 滤波电路.....	24
一、电容滤波.....	24
二、电感滤波.....	28
三、 $\Pi$ 型滤波.....	29
第五节 硅稳压管和简单稳压电路.....	32
一、硅稳压管.....	32
二、硅稳压管稳压电路.....	34
三、稳压管和限流电阻的选择.....	35
* 第六节 二极管波形变换电路.....	37
一、二极管削波电路.....	37
二、稳压管削波电路.....	40
三、二极管波形箝位电路.....	42
小 结.....	45
习 题.....	47
<b>第十二章 晶体管放大电路</b> .....	48
第一节 晶体三极管.....	48
一、晶体三极管的外形、结构和命名.....	48

二、晶体三极管的放大作用 .....	51
三、晶体三极管的主要参数 .....	54
四、晶体三极管的特性曲线和三种工作状态 .....	57
五、晶体三极管的开关特性 .....	60
第二节 交流电压放大器 .....	63
一、单管放大电路的工作原理和分析方法 .....	64
二、静态工作点的稳定 .....	82
三、多级电压放大电路 .....	87
第三节 负反馈放大电路 .....	93
一、负反馈放大电路的基本联接形式 .....	93
* 二、负反馈放大电路的类型判别和特性 .....	101
三、负反馈放大电路的一般表达式和分析方法 .....	103
第四节 场效应管放大器 .....	105
一、场效应管的结构和特性 .....	106
二、场效应管的主要参数和等效电路 .....	110
三、场效应管放大器 .....	111
第五节 交流功率放大器 .....	113
一、单边功率放大器 .....	115
二、推挽功率放大器 .....	120
* 三、无输出变压器的功率放大器 .....	123
第六节 直流放大器 .....	125
一、多级单端式直接耦合放大器 .....	126
二、直流差动放大器 .....	129
* 三、调制式直流放大器 .....	136
第七节 直流稳压电源 .....	141
一、串联型稳压电源的基本工作原理 .....	141
二、最简单的带负反馈放大电路的稳压电源 .....	142
* 三、采用复合管和带差动放大电路的稳压电源 .....	145
四、稳压电源的主要技术指标 .....	147
第八节 运算放大器和线性集成电路 .....	148
一、运算放大器的基本工作原理 .....	148
二、运算放大器的主要运算功能 .....	151
* 三、线性集成电路简介 .....	156

* 四、运算放大器的应用举例·····	163
小 结·····	167
习 题·····	169
<b>第十三章 晶体管振荡器·····</b>	<b>175</b>
第一节 振荡器的基本工作原理·····	175
一、关于振荡的基本概念·····	175
二、振荡的条件与稳定·····	176
第二节 <i>LC</i> 振荡器·····	179
一、变压器反馈的 <i>LC</i> 振荡器·····	179
二、电感反馈的 <i>LC</i> 振荡器·····	181
三、电容反馈的 <i>LC</i> 振荡器·····	182
* 四、 <i>LC</i> 振荡器应用举例——晶体管接近开关·····	184
* 第三节 <i>RC</i> 振荡器·····	187
一、 <i>RC</i> 移相式振荡器·····	187
二、桥式 <i>RC</i> 振荡器·····	188
* 第四节 石英晶体振荡器·····	192
一、石英晶体的压电效应及等效电路·····	192
二、串联振荡器·····	195
三、并联振荡器·····	196
小 结·····	197
习 题·····	197
<b>第十四章 数字集成电路·····</b>	<b>199</b>
第一节 概述·····	199
第二节 逻辑代数的基本原理·····	200
一、基本逻辑运算和门电路·····	201
二、逻辑代数式的化简·····	209
三、逻辑代数的应用·····	211
第三节 二极管-晶体管逻辑电路 ( <i>DTL</i> 电路)·····	213
第四节 晶体管-晶体管逻辑电路 ( <i>TTL</i> 电路)·····	216
一、电路组成·····	216
二、工作原理·····	218
第五节 <i>TTL</i> 电路的电压传输特性和参数·····	219
第六节 集成电路触发器·····	222

一、 $R-S$ 触发器 .....	222
二、 $D$ 触发器 .....	228
三、 $J-K$ 触发器 .....	231
* 第七节 单稳态触发器、鉴幅器和多谐振荡器 .....	235
一、积分型单稳态触发器 .....	235
二、微分型单稳态触发器 .....	237
三、多谐振荡器 .....	237
四、鉴幅器 .....	239
第八节 计数器 .....	241
一、二进制计数器 .....	241
二、十进制计数器 .....	245
第九节 译码器 .....	248
第十节 数字的显示 .....	250
第十一节 寄存器 .....	253
一、寄存器 .....	253
二、移位寄存器 .....	255
* 第十二节 电子简易程序控制系统简介 .....	257
一、电子程序控制系统的分类 .....	258
二、具有步进器的计数式程序控制系统 .....	259
小 结 .....	262
<b>第十五章 可控硅元件及其应用</b> .....	264
第一节 可控硅元件的结构、特性和参数 .....	265
一、可控硅的构造和工作原理 .....	265
二、可控硅的伏安特性 .....	268
三、可控硅元件的型号和参数 .....	269
四、可控硅的保护 .....	272
第二节 单相可控整流电路 .....	274
一、带电阻负载时的工作情况 .....	274
二、带感性负载时的工作情况 .....	278
三、负载中具有反电动势时的工作情况 .....	281
第三节 单相可控整流的触发电路 .....	282
一、单结晶体管的结构和特性 .....	283
二、单结晶体管自振荡电路 .....	286

三、可控整流的单结晶体管触发电路	287
第四节 三相可控整流电路	289
第五节 可控整流电路应用举例	294
一、主回路	296
二、控制回路	296
第六节 可控硅交流调压	299
一、单相交流调压	299
二、三相交流调压	301
* 第七节 可控硅逆变电路	303
一、发电机-电动机组中的能量转换和逆变过程	303
二、可控硅有源逆变电路的工作原理	304
三、绕线式异步电动机的串级调速	307
* 第八节 可控硅无触点开关	309
一、交流可控硅开关	310
二、直流可控硅开关	312
小 结	313
习 题	314
* 第十六章 非电量的电测法	316
第一节 概述	316
第二节 阻抗变换器	317
一、电阻变换器	317
二、电感变换器	321
三、电容变换器	327
第三节 电动势变换器	330
一、热电偶温度变换器	330
二、霍耳元件-霍耳电动势变换器	331
第四节 变换元件	332
一、光敏元件	332
二、压敏元件	336
三、气敏元件	337
* 第十七章 电子管电路简介	339
第一节 真空二极管整流电路	339
一、真空二极管	339

二、真空二极管整流电路	344
第二节 电子管放大电路	344
一、三极管及其放大电路	344
二、五极管及其放大电路	350
三、多级放大器	353
四、电子管功率放大器	354
第三节 电子管 $LC$ 振荡器	354
一、电子管振荡器的基本工作原理	355
二、电子管 $LC$ 振荡器的自给负栅偏压	356
三、并联供电的 $LC$ 振荡器	357
四、电子管 $LC$ 振荡器的几种反馈方式	357
第四节 充气管	359
一、充气二极管	359
二、闸流管	360
附表一 常用半导体二极管的型号和主要参数	364
附表二 常用晶体三极管的型号和主要参数	369
附表三 普通可控硅的参数及各种单相可控整流电路的比较	376
附表四 常用真空二极管和放大管的型号和主要技术数据	382

# 第十一章 整流电路

通常，电力网供给的是交流电，而在科学实验和工业生产中，常常要用直流电。这就要求把交流电变换为直流电。本章讲的就是用来实现这种变换的整流电路。

在整流电路中必须有整流元件，以前用电子管和离子管，从六十年代起已广泛采用半导体二极管。本章讲的是后一种元件及用它组成的整流电路。应当指出，半导体二极管除作整流元件外，还有其它多种用途，本章亦作适当介绍。

## 第一节 半导体二极管

### 一、半导体二极管的单向导电性

半导体二极管所以能用作整流元件，关键在于它具有单向导电性。

每个二极管都有两个电极，一为正极，一为负极，其外形如图 11-1。在电路图中，二极管的代表符号如图 11-2 所示，文字符号

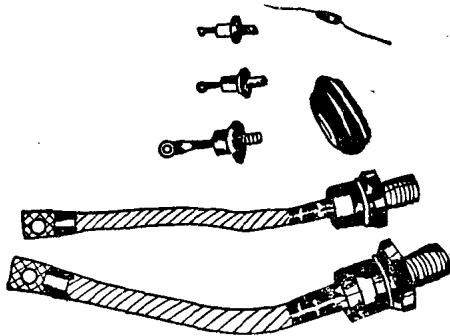


图 11-1 各种整流二极管的外形

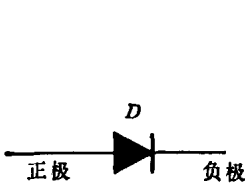


图 11-2 晶体二极管的符号

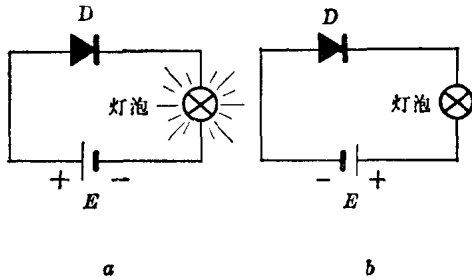


图 11-3 二极管单向导电性实验

用  $D$  表示。

二极管的单向导电性,可以通过下述实验进行观察。实验电路由干电池、小灯泡和二极管串联组成,如图 11-3 所示。把二极管的正极接电池正端,负极经过灯泡接到电池负端,见图 11-3  $a$ ,使二极管的正极电位高于负极电位,或者说使二极管受正向电压作用,则小灯泡发光,表明二极管导通。反之若把二极管正极接电池负端,负极经过灯泡接到电池正端,见图 11-3  $b$ ,使负极电位高于正极电位,即受反向电压作用,则灯泡不亮,表明二极管不导通。

上述现象表明,二极管具有单向导电性,导电方向从正极到负极,在这个方向上的电流叫做正向电流。当然,它的单向导电性是有条件的,如果反向电压超出了规定数值,也会有较大的反向电流从负极流向正极。就是在规定的许可反向电压范围内,二极管的反向电流也不为零,只不过它与正向电流相比数值很微小。换句话说,半导体二极管对正向电流的电阻(称为正向电阻)很小,而反向电阻则很大。

为了说明半导体二极管单向导电性的物理本质,下面简单介绍它内部的  $PN$  结。

## 二、半导体二极管中的 $PN$ 结

硅和锗的单晶体是常用的半导体材料,其原子的最外层轨道



上有四个价电子，每个价电子又为相邻的一个原子所共有，两个原子间的这种结合叫做共价键。在一定条件(如一定的温度和光的照射)下，共价键中的束缚电子，有的会吸收一定能量而冲破键的束缚，成为自由电子，这个过程叫做激发。被冲破的键，少了一个电子，或者说出现了一个电子的空位，叫做空穴，呈正电性。在外界因素作用下，空穴很容易为附近另一共价键的电子移过来填补，从而又在移出电子的键上出现空穴。每填补一个空穴，便在附近出现另一个空穴，如此连续进行，表现为空穴的移动。如有外电场作用，空穴将顺着电场方向移动，相当于正电荷的定向运动。这样形成的电流，叫做空穴电流。

上面的叙述表明，在硅和锗这一类半导体中存在两种导电机构——自由电子(以后简称电子)和空穴。两者所带电荷符号相反，在外电场作用下的移动方向也相反。于是，流过半导体中的电流，是电子流和空穴流的总和，电子和空穴统称为半导体中的载流子。

在半导体中，自由电子如果同空穴相遇，可能放出原来吸收的能量而填补到空穴中去，这种过程叫做复合。每一次复合，都有一个电子和一个空穴同时消失。

在结构完整和高度纯净的半导体中，电子和空穴总是成对出现，彼此数目完全相等，两种导电机构同时产生，又同时参加导电，这样的半导体叫做本征半导体。它只有很少量的载流子，接近于绝缘体，不能简单地用来制造半导体器件，而要先掺入适当的杂质。

如在纯净的硅或锗中掺入适量的三价元素(如硼、铝、镓等)，其空穴载流子的数目将相应增加，自由电子的数目仍然极少。这种半导体主要靠空穴导电，叫做空穴型半导体，简称P型半导体。换句话说，P型半导体中的多数载流子为空穴。应当指出，因掺入三价原子而引起空穴数目的增加，并不使整个半导体带电，即仍呈