

高等学校教学参考书

电子技术

清华大学自动化系编



人民教育出版社

高等学校教学参考书

电子技术

清华大学自动化系编



重 印 说 明

本书是一九七四年根据当时教学的需要编写的。自出版以来，接到许多读者来信或来访，对读者给予的鼓励及提出的修改意见，在此表示感谢。

为了满足广大读者的要求而再次印刷。这次重印只对原版中个别地方做了一些更正。

本书以常用的半导体管放大电路、线性集成电路和直流稳压电路为主，对于整流和振荡电路也作了适当的叙述，可供教学参考和自学阅读之用。关于脉冲数字电路方面的内容可参阅我校编写的《晶体管脉冲电路与数字集成电路》（人民邮电出版社，1977年9月版）等书。

欢迎读者对于本书中的缺点错误提出修改意见。

编 者

1978年6月

目 录

第一章 放大电路的基本概念与分析方法	1
第一节 半导体二极管与三极管	2
(一) 半导体的基本特性	2
(二) PN 结	4
(三) 半导体二极管	6
(四) 半导体三极管	9
第二节 放大电路的组成	23
(一) 应用电路举例	23
(二) 输入信号为直流电压时的情况	24
(三) 输入信号为交流电压时的情况	26
(四) 电路的简化	28
(五) 三种接法	28
(六) 耦合方式	30
第三节 放大电路的基本分析方法	32
(一) 静态工作点	33
(二) 直流负载线	37
(三) 交流负载线	45
(四) 三极管工作在饱和区与截止区时的情况	50
(五) 失真及其改进措施	53
(六) 三极管的等效电路	60
(七) 放大倍数	63
(八) 影响放大倍数的因素	68
(九) 放大电路的输出输入特性	71
第四节 射极输出器	74
(一) 电路特点	74
(二) 放大电路输入输出电阻的概念	75
(三) 反馈的基本概念	83
(四) 射极输出器的分析	87
第五节 静态工作点的稳定措施	
第六节 单管放大电路元件参数的选择	
(一) 三极管的极限参数	

(二) 设计举例	106
本章小结	110
思考题	114
第二章 交流放大器与正弦波振荡器	116
第一节 交流放大器的用途	116
第二节 多级交流放大电路	117
(一) 级间耦合	117
(二) 放大倍数	120
(三) 频率特性	122
(四) 多级放大电路静态工作点的安排	124
第三节 功率放大器	124
(一) 功率放大器的特点	124
(二) 单管功率放大电路	126
(三) 乙类推挽功率放大电路	134
(四) 功率放大管的散热问题	142
第四节 具有负反馈的交流放大电路	142
第五节 正弦波振荡器	146
(一) 概述	146
(二) 振荡条件	147
(三) LC 并联谐振回路	150
(四) LC 振荡电路	155
(五) RC 振荡电路	160
第六节 阅图练习	167
(一) 电解电容测量仪	167
(二) 手提式扩音器	169
(三) 电子接近开关电路	171
第七节 交流放大器的调试	173
本章小结	179
思考题	182
第三章 直流放大器	184
第一节 直流放大器的用途	184
一、直流放大器的主要问题	186
(一) 级间耦合	187
(二) 零点漂移	195

第三节 差动式放大电路	197
(一) 零点漂移与放大倍数	198
(二) 典型对称差动式放大电路的分析	200
(三) 对称式电路的改进措施	206
(四) 单端输出差动式放大电路	209
第四节 互补电路与复合管电路	212
(一) 互补电路	212
(二) 复合管电路	214
第五节 具有负反馈的直流放大电路	215
第六节 调制型直流放大器	222
(一) 调制型直流放大器的组成	222
(二) 调制器	223
(三) 解调器	227
第七节 阅图练习	230
第八节 直流放大电路元件参数的选择	234
(一) 一般原则	234
(二) 设计举例	236
第九节 直流放大器的装配与调试	240
[附] 场效应管简介	244
本章小结	245
思考题	247
第四章 线性集成电路及其应用(运算放大器)	248
第一节 概述	248
第二节 运算放大器的基本性能	255
(一) 比例运算与变号运算	255
(二) 积分运算	256
(三) 微分运算	258
(四) 输入电阻与输出电阻	259
(五) 输入接线方式	261
(六) 对运算放大器的要求	264
第三节 集成电路器件简介	265
第四节 线性组件及其使用方法	268
(一) BG 301	268
(二) BG 305	27
(三) 线性组件的粗测	

(四) 自激振荡的抑制	284
(五) 线性组件的保护措施	286
第五节 阅图练习	288
(一) 磁性材料 $B-H$ 曲线的测试电路	288
(二) 直流电动机转速的自动调节	290
(三) 光电比色高温计的运算电路	293
本章小结	296
思考题	298

第五章 直流稳压电源

第一节 稳压电路的组成	299
第二节 整流与滤波电路	302
(一) 整流电路	302
(二) 滤波电路	311
(三) 整流滤波电路设计举例	316
第三节 硅稳压管稳压电路	320
(一) 硅稳压管	320
(二) 稳压原理	322
(三) 稳定度与内阻	325
(四) 改进措施	328
(五) 设计举例	329
(六) 射极输出型稳压电路	332
第四节 串联型稳压电路	334
(一) 基本电路	335
(二) 改进措施	342
(三) 设计举例	343
第五节 过电流保护电路	353
(一) 反馈限流型过流保护电路	353
(二) 反馈截止型过流保护电路	355
第六节 串联型稳压电路的调试	362
第七节 开关型稳压电路	366
(一) 调宽型稳压电路	366
(二) 变换型稳压电路	368
第八节 阅图练习	371
(一) 辅助电源用倍压整流式的串联型稳压电路	371
(二) 低压大电流串联型稳压电路	373

第一章 放大电路的基本概念 与分析方法

内 容 提 要

本章主要讲放大电路的基本分析方法。考虑到在教学过程中,有可能出现先学交流放大电路,或先学直流放大电路等情形,因此本章把放大电路中具有共同性的一些基本概念和分析方法先作一概括的叙述,以增强其它各章的独立性。

这一章以单管放大电路为主,把单管交流放大、直流放大和射极输出电路结合在一起,介绍半导体二极管、三极管特性,放大电路组成,静态工作点,负载线,失真,放大倍数,输入输出电阻,反馈,以及电路元件选择等基本知识。考虑到电子技术课的特点,如果能把单管电路的分析方法基本掌握,学习后面的复杂电路就会容易得多,所以这里对单管电路叙述得详细一些。

随着我国社会主义革命和社会主义建设的蓬勃发展,电子技术在工农业生产、国防建设以及人们日常生活中的应用日益广泛。广大工农兵群众在毛主席提出的“抓革命,促生产,促工作,促战备”的方针指引下,在利用电子技术进行技术革命和技术革新方面,正在不断取得新的成果。

实践证明,有很多物理量,例如温度、压力、速度、位移等等,都可以通过变换、放大等环节予以量测和控制。这里所要着重讨论的,是利用半导体器件所组成的几种常用的放大电路以及它们的零点和应用。

第一节 半导体二极管与三极管

(一) 半导体的基本特性

在实践中,我们知道铜线是导电的,而铜线外面包着的一层塑料皮是不导电的,可见物体的导电能力有所不同。

自然界中的物质,根据它们的导电能力强弱,分为导体(例如银、铜、铝等金属)、绝缘体(例如橡胶、塑料、陶瓷等)和半导体(例如硅、锗、硒等)。导体的导电能力很强,绝缘体的导电能力很弱,而半导体的导电能力则介于导体和绝缘体之间。

为什么物质有这种导电能力上的差别呢?其根本原因在于不同的物质,其内部的特性不同。我们知道,所有的物质都是由原子构成的,而原子又由带正电的原子核和带负电的电子所组成。在原子中,电子在原子核引力的作用下,分层地围绕原子核旋转。离原子核远一些的电子所受的吸引力较小,在外界因素作用下(例如加热),比较容易挣脱原子核的束缚,而成为“自由电子”。这种可以自由行动的电子,在外电场作用下,产生定向运动而形成电流。习惯上规定电流的方向与电子运动的方向相反,即电流沿某一方向流动相当于电子流沿相反方向流动。如果某一物质中自由电子很多,其导电能力就强,这种物质就是导体,一般金属都属于导体。反之,如果某一物质中自由电子很少,其导电能力就很弱,这种物质就是绝缘体,有些非金属材料就属于绝缘体。半导体的情况介于二者之间。

一般纯净的半导体(称为本征半导体)材料,譬如硅(或锗)单晶,其导电性能是很差的,近于绝缘体。但是,如果在这些半导体材料中掺入少量的其它材料(一般称为杂质),它的导电性能就会

发生显著的变化。根据所掺杂质的不同，半导体的导电性质也就有所不同。这种半导体称为掺杂半导体。例如，在硅半导体中掺入少量的磷等杂质，就会多出许多电子来导电。这是因为：硅原子的最外层有四个电子，而磷原子的最外层有五个电子，除其中四个电子与硅原子相联系以外，尚多出一个可以自由移动的电子，这样就增大了硅半导体的导电能力。在这种情况下，因为导电是电子移动的结果，所以把掺有磷等杂质的半导体叫做电子型半导体或N型半导体。另一种情况，如果在硅半导体中掺入少量的硼等杂质，由于这些原子最外层只有三个电子，与硅原子相比最外层少了一个电子，就留有一个空位等待电子来补充。当其它原子中的电子来补充这个空位时，在这个电子自己原来所在的位置上，又留下了一个空位，这样就好象空位在移动了。通常把这样等待电子来填充的空位称为空穴。空穴移动同样形成电流。利用空穴的移动实现导电的半导体称为空穴半导体或P型半导体。

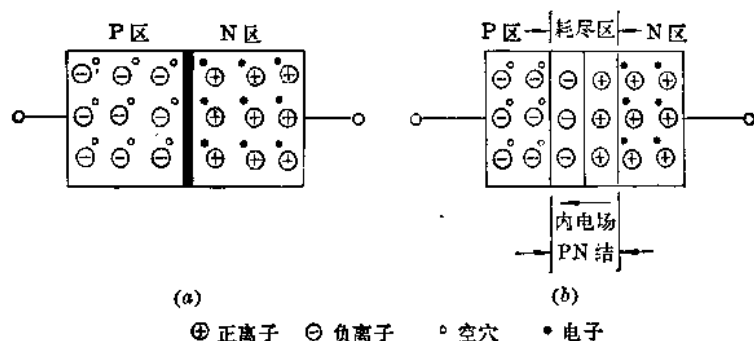
由上述可见，在硅中掺入磷等元素时，可以得到N型硅；在硅中掺入硼等元素时，可以得到P型硅。同理，在锗中掺入最外层具有五个电子的元素时，可以得到N型锗；在锗中掺入最外层具有三个电子的元素时，可以得到P型锗。所以不能误认为硅只能构成N型半导体，锗只能构成P型半导体。

要想在半导体中形成电流，必须有外加电源。在电源作用下，半导体中带有负电荷的电子向电源的正端移动，而空穴则向负端移动。所以外电路中的电流等于半导体内电子流与空穴流之和。电子和空穴是形成电流的两种“带电粒子”，通常称为载流子。对于P型半导体，由于空穴多而电子少，主要是靠空穴导电，所以P型半导体中的空穴称为多数载流子，而把电子称为少数载流子。同样道理，对于N型半导体，由于电子多而空穴少，主要是靠电子导电，所以把电子称为多数载流子，而把空穴称为少数载流子。多数载

流子数量的多少取决于杂质的浓度。

(二) PN 结

把一块P型或N型半导体接入电路中,只能起到电阻元件的作用,而把一块P型半导体和一块N型半导体“结合”起来,如图1.1-1(a)所示,这样在交界处附近就形成了一个薄层,一般称此薄层为PN结。结而两侧的半导体型式不同,P区的空穴载流子较多,而N区电子载流子较多。由于两种载流子的浓度分布不均匀,当两块半导体结合后,P区的空穴要向N区扩散,而N区的电子则要向P区扩散,于是形成了电子和空穴的扩散运动。这就像把一滴墨水滴入清水中,墨水将由浓度大的地方向浓度小的地方扩散一样。N区中的电子扩散到P区以后,在N区中留下了带正电的离子[在图1.1-1(b)中用 $\oplus$ 表示];P区中的空穴扩散到N区以后,在P区留下了带负电的离子[在图1.1-1(b)中用 $\ominus$ 表示]。这里



所说的离子,就是失去了电子的原子(称正离子),或者获得了电子使自己的总电子数超出了正常数值的原子(称负离子)。由于扩散的结果,在PN结处形成了一个“耗尽区”(也称阻挡层)。在这个区域内,电子和空穴产生“复合”现象,基本上没有载流子了。这个区

域的左边带负电,右边带正电,形成一个“内电场”,见图 1.1-1(b),它的方向既阻挡右侧的电子向左侧运动,也阻挡左侧的空穴向右侧运动。可见,PN 结是扩散力与内电场力平衡的结果。

如果在这个 PN 结两端加上电压,会产生什么结果呢?例如,在图 1.1-2(a)的 P 侧接电源 E 的正端, N 侧接电源 E 的负端。电源正极对 N 区中的电子有吸引作用,对 P 区中的空穴有排斥作用;或者说,电源的负极对 P 区中的空穴有吸引作用,对 N 区中的电子有排斥作用。这样 PN 结两侧的多数载流子就越过 PN 结而形成电流。这个电流由电源正极流出,经过 PN 结返回负极,其方向与空穴流动的方向一致,称为正向电流。正向电流可以理解为是由于电源 E 所形成的外电场抵消了 PN 结内电场的阻挡作用而得到的。

如果按图 1.1-2(b)的接法, P 侧接电源 E 的负端, N 侧接电

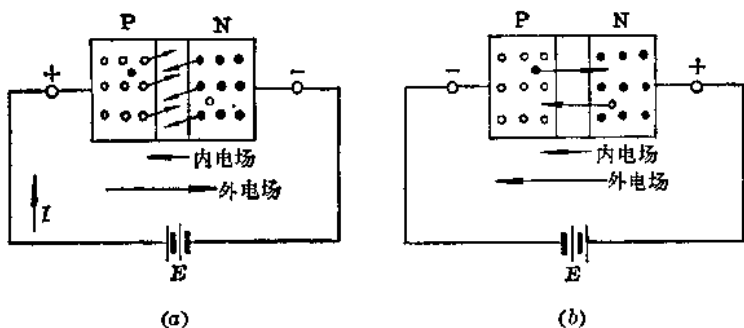


图 1.1-2 PN 结的正向接法和反向接法

源 E 的正端,则电源负极排斥 N 区中的电子流向 P 区,电源正极排斥 P 区中的空穴流向 N 区。这个现象也可以理解为电源 E 所形成的外电场加强了 PN 结的内电场,从而增强了对多数载流子流动的阻挡作用。但是,对于少数载流子,即 P 区中极少量的电子和 N 区中极少量的空穴可以越过 PN 结而形成很小的电流,如图

1.1-2(b) 方框中箭头所示, 这个电流称为反向电流。一般称图 1.1-2(a) 的接法为正向接法, 图 1.1-2(b) 的接法为反向接法。或者对于在 PN 结上所加的电压极性而言, 分别称图 1.1-2(a) 和 (b) 为正向偏置和反向偏置。正向偏置时, PN 结导电, 电流由 P 区流向 N 区; 反向偏置时, PN 结基本上不导电, 即电流不能由 N 区流向 P 区。可见 PN 结具有“单向导电性”, 这是它的一个重要特性。这个特性是许多半导体器件的理论依据。

(三) 半导体二极管

半导体二极管就是一个 PN 结加上电极引线和管壳制成的。根据内部结构的特点, 半导体二极管有“点接触型”和“面接触型”两种, 如图 1.1-3(a) 和 (b) 所示。同图 (c) 为二极管的图形符号, 画有三角形一侧为 P 型半导体, 另一侧为 N 型半导体。

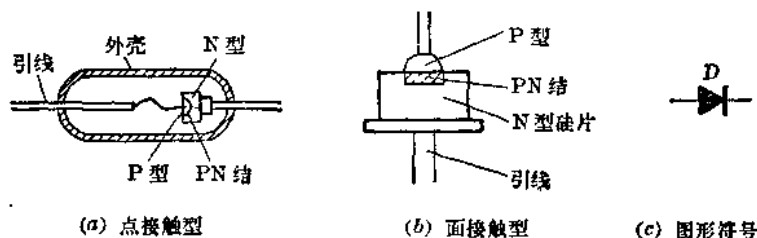


图 1.1-3 半导体二极管(示意图)

点接触型二极管由于半导体的接触点小, 通过的电流较小(几十毫安), 而面接触型二极管则可以通过较大的电流(几百毫安至几百安)。

根据制作二极管时所用半导体材料的不同, 又分为锗二极管、硅二极管等。

从应用的角度来说, 需要弄清楚的是加在二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的关系, 即二极管的“伏安特性”。

二极管的典型伏安特性曲线如图 1.1-4(a) 所示, 图(b) 是它的测试电路。由于电压表中流过的电流很小, 所以电流表所指示的电流可以认为就是流过二极管的电流。

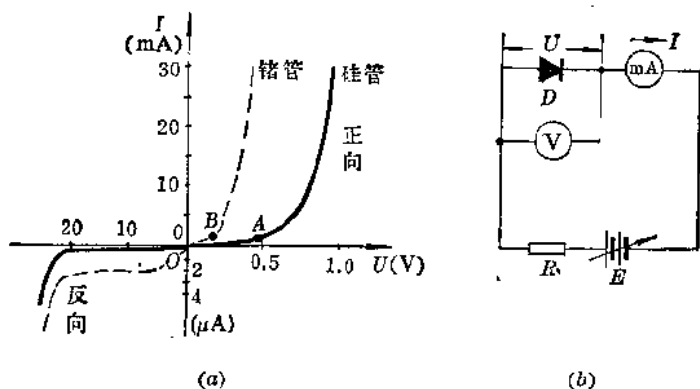


图 1.1-4 二极管的伏安特性

当二极管两端的电压 U 为零时, 电流 I 也应为零, 所以特性曲线从坐标原点开始。

由特性曲线可以看出, 当二极管为正向接法时, 随着电压 U 的逐渐增加, 电流 I 也增加。但在开始的一段, 由于外加电压 U 很低, 这时 PN 结的内电场对载流子的运动仍起阻挡作用, 基本上没有电流流过 PN 结, 这一段称为死区。硅管的死区电压约为 $0 \sim 0.5V$ (图中 OA) 之间, 锗管约为 $0 \sim 0.2V$ (图中 OB) 之间。当外加电压 U 超过死区电压以后, 电流随电压的上升就增加得很快。

当二极管为反向接法时, 即把图 1.1-4(b) 中电源 E 的极性反过来接, 这时只能由少数载流子形成反向电流, 电流值很小 (一般硅管小于几十微安, 锗管小于几百微安)。因为少数载流子数量很小, 所以其数值基本上不随反向电压而变。可是当反向电压增大到一定数值时, 外电场将把半导体内被束缚的电子强行拉出来, 造成反向电流的突然增大, 这种现象称为反向击穿现象, 见图 1.1-4

中的反向特性曲线，这时很容易造成管子的损坏。但在一定制造工艺保证的条件下，坏事可以转化为好事，利用反向击穿时管子两端的电压基本上不随电流而变化的特性，制成“稳压管”，这种管子的特性和应用在后面“直流稳压电源”一章中将要详细讨论。

从二极管的伏安特性可以看出：

(1) 二极管是一种非线性元件，它的正向特性和反向特性都是非线性的。

(2) 二极管具有单向导电性能。正向连接时管子导通，反向连接时管子近于截止。

(3) 正向导通时管子的正向压降很小，一般情况下约为 0.7V 左右。

(4) 管子承受反向电压时，在小于击穿电压的范围内，反向电流与所加电压基本无关。当反向电压超过击穿电压时，管子从不导通转化为导通。所以二极管的单向导电性并不是绝对不变的。

(5) 硅二极管和锗二极管的主要区别在于：锗管的正向电流比硅管上升得快，正向压降较小。但锗管的反向电流比硅管的反向电流大得多，所以锗管受温度的影响比较明显。这些特点在选用二极管时必须加以考虑。

二极管的参数主要有两个：

(1) 最大正向电流 I_{DM} 最大正向电流是指二极管能够允许通过的最大平均电流值。它是由半导体材料的性能和 PN 结的面积决定的。当电流超过这个允许值时，将由于发热过度而使管子损坏。

(2) 最大反向电压 U_{DM} 最大反向电压亦称 反向击穿电压，是指反向电流突然剧增时的反向电压值。

以上这两个参数可由半导体器件手册中查得，例如 2CP21 的 $I_{DM}=300\text{mA}$, $U_{DM}=100\text{V}$ 。

此外, 还有反向电流、正向压降、工作频率等参数, 在实际应用中也应考虑。

(四) 半导体三极管

(1) 结构型式

三极管是由形成两个 PN 结的三块半导体组成的, 其组成型式有两种: 图 1.1-5(a) 为 PNP 型, 同图(b) 为 NPN 型。每种型式均有两个 PN 结 J_1 和 J_2 。

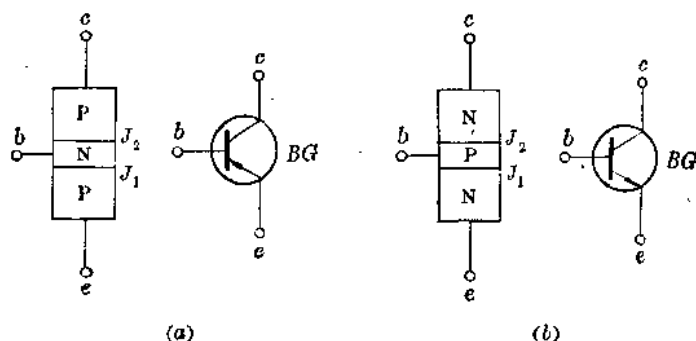


图 1.1-5 三极管的型式和电路图形符号

目前, 我国生产的锗三极管多为 PNP 型, 硅三极管多为 NPN 型, 但也有少量 PNP 型的硅管和 NPN 型的锗管。它们的结构原理是相同的。

三极管有三个电极, 如图 1.1-5 所示, 其中 b 称为基极, c 称为集电极, e 称为发射极。PNP 型和 NPN 型在图形符号上的区别是, 前者发射极箭头向里, 后者向外。箭头的方向代表电流的正方向。

三极管的中间一层半导体称为基区, 与两侧的发区区和集电区相比薄得多。发射区和基区之间的 PN 结称为发射结 (图中 J_1), 集电区和基区之间的 PN 结称为收集结 (图中 J_2)。

由于硅三极管的温度特性较好，应用较多，所以我们经常以NPN型硅三极管为例来进行分析。

(2) 三极管的电流放大作用

我们先来做一个实验，观察一下通过三极管各个电极的电流有什么关系。

实验电路如图 1.1-6 所示，其中三极管 BG 为 NPN 型。给发射结加上正向电压，电源为 E_b ，其正端通过电阻 R 和 R_b 接管子基极。基极回路串接一只微安表，用以测量基极电流 I_b 。给集电结加上反向电压，电源为 E_c ，其正端接管子集电极。集电极回路串接一只毫安表，用以测量集电极电流 I_c 。在发射极与“地”之间再串接一只毫安表，用以测量发射极电流 I_e 。

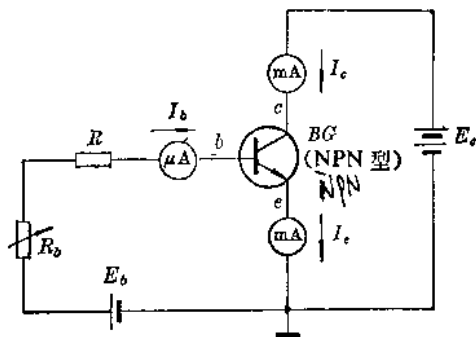


图 1.1-6 三极管电流分配实验电路

调节基极电阻 R_b 以改变基极电流 I_b ，则可测得相应的 I_c 和 I_e 的数据，三者的关系列成表格如下：

$I_b(\text{mA})$	-0.004	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
$I_c(\text{mA})$	0.004	0.01	1.09	1.98	3.07	4.06	5.05
$I_e(\text{mA})$	0	0.01	1.10	2.00	3.10	4.10	5.10

从上表可以看出：

① 基极电流 I_b 与集电极电流 I_c 之和等于发射极电流 I_e ，即

$$I_e = I_c + I_b \quad (1.1-1)$$

表中每一行都是这样。例如， $I_b = 0.01\text{mA}$ 时， $I_c = 1.09\text{mA}$ ，