

DDZ-Ⅱ型 仪表中的晶体管线路

北京电力工业局中心試驗所 編
北 京 电 力 学 校

水利电力出版社

DDZ—II 型

仪表中的晶体管线路

北京电力工业局中心試驗所 編
北 京 电 力 学 校

水利电力出版社

内 容 提 要

目前, DDZ-Ⅱ型电动单元组合仪表, 已在我国电力、冶金、石油和化工等大型现代化工矿企业中得到广泛应用。本书紧密结合该型仪表所采用的电子线路, 对晶体管线路的基本原理和电路特点作了简明扼要的介绍。主要内容有: 常用半导体器件的工作原理, 交流电压放大器, 直流放大器, 调制和解调的原理, LC 正弦波振荡器, 开关电路, 直流稳压电源和可控硅无触点开关等。为便于初学者自学, 书中还附有较多的例题和习题, 并对计算题提供了答案。

本书可供热工仪表工人自学或培训之用, 对于其他从事热工检测、自动控制工作的同志也有参考价值。

DDZ-Ⅱ型仪表中的晶体管线路

北京电力工业局中心试验所编
北 京 电 力 学 校

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

1974年11月北京第一版

1974年11月北京第一次印刷

印数 00001—40450 册 每册 0.80 元

书号 15143·3095

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

我们现在思想战线上的一个重要任务，
就是要开展对于修正主义的批判。

我们的文学艺术都是为人民大众的，首
先是为工农兵的，为工农兵而创作，为工农
兵所利用的。

前 言

伟大领袖毛主席亲自发动和领导的无产阶级文化大革命，粉碎了刘少奇、林彪两个资产阶级司令部，锻炼了群众，教育了干部，促进了生产力的发展，使我们各项工作沿着正确的路线前进。在批林批孔运动的推动下，全国人民更加意气风发，祖国大地欣欣向荣，社会主义到处都在胜利地前进。

随着我国社会主义革命日益深入和社会主义建设事业的蓬勃发展，在电力工业中，各种新技术、新设备如雨后春笋般地不断涌现。晶体管的 DDZ-Ⅱ型电动单元组合仪表，就是我国工人阶级在无产阶级文化大革命中，遵照毛主席“自力更生”的教导，自行设计和制造的新型设备之一。目前，它已迅速地得到广泛应用。

为了适应革命和生产形势发展的需要，北京电力工业局于一九七三年初，在中心试验所举办了 DDZ-Ⅱ型仪表学习班。在学习班结束的时候，根据许多工人同志的要求，在水利电力部和北京电力工业局的有关领导同志的指示下，我们决定将学习班讲义重新进行修改、整理，并公开出版。

毛主席说：“为什么人的问题，是一个根本的问题，原则的问题。”为了使这本教材更适合于发电厂工人的实际需要，我们力图以辩证唯物论的认识论为指导，从典型电路开始，按由浅入深、由特殊到一般、由感性认识上升到理性认识的原则组织教材内容；对晶体管电路的基本概念、基本原理和基本分析方法作了较多的讨论；书中加强了物理概念的叙述，并用 DDZ-Ⅱ型仪表中的线路作为实例进行讲解，使理论与实际相结合；并利于具有初中文化程度的工人自学之用。

我们遵照毛主席关于“只有做群众的学生才能做群众的先生”的教导，在学习班和发电厂现场广泛征求了许多工人师傅的意

31512

见，大量吸收了他们在生产实践中积累的调试电子线路的宝贵经验，对教材进行了反复的讨论和修改。其中，北京热电厂和石景山发电厂的工人还召开了座谈会，从提纲到内容进行了仔细的审查；此外，还有许多电厂和中试所热工专业的工人同志也给我们提供了许多宝贵的意见。因此，本书实际上是广大工人同志集体劳动的结晶，我们只是做了一些记录和整理的工作。

此外，根据工人同志的意见，我们将 DDZ-Ⅱ型仪表的原讲义分为“晶体管线路”和“仪表”两部分进行编写；这样，编写和使用时更觉方便一些。这部分《DDZ-Ⅱ型仪表中的晶体管线路》，是由北京电力工业局中心试验所胡树松同志和北京电力学校金瑾华同志执笔的。

在编写过程中，得到北京自动化技术研究所许多同志在具体问题上的指导和帮助，他们还为我们审查了全部原稿；此外，天津市仪表厂、上海调节器厂等单位也为我们提供了许多资料和意见；在此，谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们学习马、列的书，学习毛主席著作不够，业务水平有限，因此书中难免存在不少缺点和错误，恳切期望广大读者批评、指正。

北京电力工业局中心试验所

北 京 电 力 学 校

1974年3月

目 录

前 言

第一章 常用半导体器件	1
第一节 半导体的导电特性	1
第二节 半导体二极管	7
第三节 半导体三极管	11
第四节 绝缘栅场效应管	27
第二章 交流电压放大器	38
第一节 基本放大电路的分析	39
第二节 放大器的等效电路	53
第三节 工作点的稳定	66
第四节 多级放大器	77
第五节 放大器中的负反馈	95
第六节 放大器的调试	114
第三章 直流放大器	127
第一节 基本直流放大器的分析	127
第二节 直流放大器的特点	134
第三节 差动直流放大器	147
第四章 调制与解调	173
第一节 调 制	174
第二节 解 调	188
第五章 LC 正弦波振荡器	195
第一节 振荡回路	195

第二节	LC 振荡器的基本原理	207
第三节	LC 振荡器的应用	210
第六章	开关电路	231
第一节	晶体管的开关特性	231
第二节	双稳态触发器	234
第三节	无稳态电路	247
第四节	单稳态触发器	260
第五节	间歇振荡器	266
第七章	直流稳压电源	274
第一节	硅稳压管稳压电路	274
第二节	串联式晶体管稳压电源	287
第八章	可控硅无触点开关及其触发线路	296
第一节	可控硅元件	296
第二节	可控硅无触点开关	305
第三节	单结晶体管触发线路	306
附录一	图5-26所示振荡器自激振荡的条件	317
附录二	双稳态触发器截止和导通的条件	319
附录三	单结晶体管峰点电压的温度补偿	322

第一章 常用半导体器件

第一节 半导体的导电特性

一、半导体的导电性能

自然界中的物质，根据它们的导电能力强弱程度，可以相对地分为导体、绝缘体和半导体三类。导体（如铜、铝等金属材料）的导电能力很强，绝缘体（如橡皮、塑料、陶瓷等）很不容易导电，半导体（如锗、硅等）的导电能力则介于导体和绝缘体之间。

为什么有的物质导电能力很强，而有的物质却很不容易导电呢？我们知道，所有的物质都是由原子构成的，而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子所组成的。在原子中，电子在原子核的引力作用下，分成几层围绕原子核按一定规律旋转，和太阳系中行星围绕太阳运转相似。由于外层电子离原子核的距离较远，所受吸引力较小，所以比较容易挣脱原子核的束缚。当它们摆脱了原子核的束缚后，就成为自由电子。这些可以自由行动的带电粒子在电场作用下，将产生定向运动而形成电流。通常将可动的带电粒子简称为载流子。物质就是依靠各种类型的载流子运载电荷而导电的。显然，物质内部的载流子越多，载流子的定向运动速度越大，其导电能力就越强；反之则弱。

在金属导体中，原子最外层轨道上的电子受原子核的束缚力很小，因此，金属导体中有大量电子能摆脱原子核的束缚而自由运动。由于金属的载流子多，所以导电能力强。

在绝缘体中，原子最外层轨道上的电子受原子核的束缚力很大，自由电子很少，因此绝缘体的导电能力很差。

半导体中原子的外层电子，既不象导体那样容易挣脱原子核的束缚，又不象绝缘体那样被束缚得很紧。这样，就决定了半导体的导电能力具有两个特征：一是它的导电能力介于导体与绝缘体之间；另一个更为重要的特点，就是半导体的导电能力容易受温度、光照、电场和杂质等外界因素的影响（这些外界因素的变化，会引起原子外层电子能量的变动，或使原子核对外层电子的束缚力发生变化，从而引起载流子数量的变化）。

二、半导体中的电流

半导体中的载流子包括电子和空穴两种。

在纯净的半导体中，由于热运动就会产生一定数量的自由电子，同时出现相同数量的空穴。在这种半导体里，虽然既有电子载流子，又有空穴载流子，但是，载流子的总数离实际应用的要求还相差很远，所以实用价值不大。

有选择地掺杂，可以使半导体的导电性能显著提高，并且根据所掺杂质的种类不同，可以人为地将半导体分为两类：一类半导体中含有大量的自由电子，而空穴很少，在这样的半导体中，电子称为多数载流子，空穴则为少数载流子。这种半导体主要靠电子导电，称作“电子导电型半导体”或叫“*N*型半导体”。另一类半导体中含有大量的空穴，而自由电子很少，在这样的半导体中，多数载流子是空穴，这种半导体称作“空穴导电型半导体”或叫“*P*型半导体”。需要指出的是：不管是*P*型半导体，还是*N*型半导体，他们都是电中性的。所谓多数载流子是电子，并不是说这块半导体带负电，而只是说明，在这种半导体中，可动的带电粒子以电子居多。只要有一定数量的可动电子，必有相应的、同等电量的不可动正离子存在，所以整块半导体是电中性的。

不管是纯净的半导体，还是掺有杂质的半导体，它们都含有

两种载流子——电子和空穴。那么，这两种载流子究竟是如何运动，而形成半导体中的电流的呢？

如果在同型半导体的两端加一电压，则在半导体内部就建立起一个电场。在电场的作用下，电子向电源的“正”端移动；空穴向电源的“负”端移动，如图 1-1 所示。在电场的作用下，载流子（电子和空穴）的定向运动通常称为漂移运动。显然，载流子的漂移速度随电场强度增加而加大。

在半导体中，有时还存在着另一种形式的电流——扩散电流。扩散电流，是由于半导体中载流子浓度分布不均匀引起的，载流子将从浓度高处向浓度低处扩散。扩散电流的大小与载流子分布的浓度差有关。

半导体中的电流应是漂移电流与扩散电流之和。从以后的分析我们还可以看出，在普通的半导体二极管、三极管中，有时漂移电流是主要的，有时扩散电流是主要的。而对绝缘栅场效应管而言，在电场作用下的漂移电流是其主要的运动形式；源极与漏极沟道中的电流，主要的是在电场作用下的漂移电流。

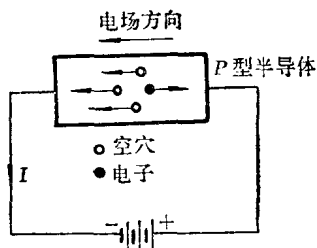


图 1-1 电场对载流子作用的示意图

三、PN 结的特性——单向导电性

在一块单纯的 P 型或 N 型半导体两端加上电压以后，半导体就能够导电。在半导体集成电路中，通常用它作为电阻。

将 P 型和 N 型半导体用不同的方式加以组合，就构成了各种特性不同的半导体器件。因此，研究 P 型和 N 型半导体联结后呈现的特性，是掌握半导体器件的基础。

如果把 P 型半导体和 N 型半导体联结起来，那么在两者的交界面处就出现了电子和空穴的浓度差别。 N 型区的电子浓度比较

高，而 P 型区的空穴浓度比较高。这样， P 型区的空穴就要向 N 型区扩散；同样， N 型区的电子就要向 P 型区扩散，如图 1-2 所示。 N 型区的电子扩散到 P 型区之后，在 N 型区留下了带正电的杂质离子（图中用 $\oplus$ 表示）； P 型区的空穴扩散到 N 型区之后，在 P 型区留下了带负电的杂质离子（图中用 $\ominus$ 表示）。晶体中的离子虽然也带电，但它们被束缚在晶格中不能任意移动，因此并不参与导电。通常把这些不可动的带电粒子称作空间电荷。由于空间电荷的存在， P 区与 N 区的边界附近便出现一个很薄的空间电荷区，通常称它为 PN 结。

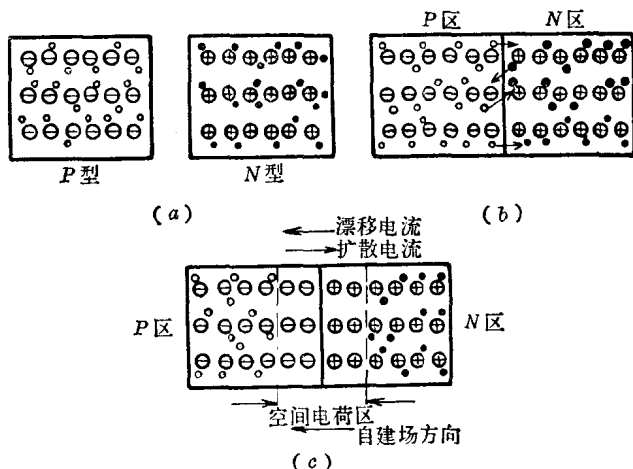


图 1-2 PN 结中载流子的矛盾运动

a — P 型和 N 型半导体； b —构成 PN 结时，载流子的扩散运动； c —扩散运动与电场力、漂移运动的矛盾

空间电荷区中存在着正、负离子，这就产生了一个从正离子指向负离子（也即由 N 区指向 P 区）的电场，由于此电场是由多数载流子扩散而形成的，我们叫它做自建场。这个电场一方面阻止多数载流子进一步扩散^①（它使得向 P 区扩散的电子受到拉力而被拉回 N 区，也使得向 N 区扩散的空穴受到斥力而被推回 P

^① 由于 PN 结对多数载流子的扩散有阻挡作用，因此 PN 结又叫阻挡层。阻挡层内大都是正、负离子，载流子极少，所以有时也称它为耗尽区。

区)，一方面又引起少数载流子的漂移（ P 型半导体中的少数载流子——电子，在自建场的作用下，向 N 型区运动； N 型半导体中的少数载流子——空穴，向 P 型区运动），漂移电流的方向恰好与扩散电流方向相反。这两项因素均起了阻止多数载流子扩散的作用。

由此可见，当 P 型半导体与 N 型半导体联结在一起时，在它们的交界面处便出现了载流子扩散与自建场反扩散这样一对矛盾。当扩散运动刚开始时，自建场场强较小，阻止扩散的能力较弱，扩散电流大于漂移电流，扩散是矛盾的主要方面。但是，只要扩散电流继续大于漂移电流，空间电荷区中的电荷就会继续增加，自建场强度就会不断加强。自建场增强的结果，将使扩散电流减小，漂移电流增大。最后，当漂移运动和扩散运动这两种作用互相抵销时， PN 结不再加宽，这时虽然扩散运动与漂移运动仍在进行，但两者大小相等，方向相反，流过 PN 结的总电流等于零， PN 结处于动平衡状态。

毛主席教导我们：“对于任何一个具体的事物说来，对立的统一是有条件的、暂时的、过渡的，因而是相对的”，“事物的性质，主要地是由取得支配地位的矛盾的主要方面所规定的。”如果在半导体的 PN 结两侧加上外部电压，就可以打破原来的平衡状态，使矛盾的主要方面发生转化。

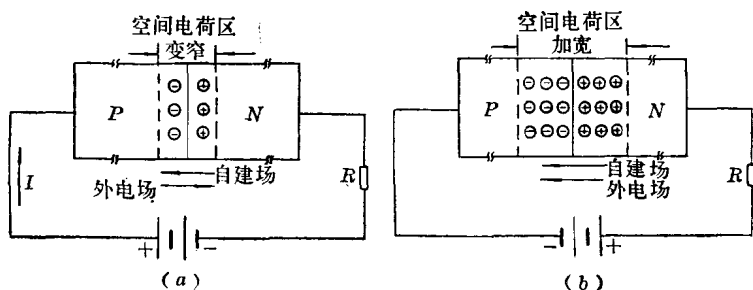


图 1-3 PN 结的单向导电特性

a —加正向电压，导通； b —加反向电压，不导通

如图1-3(a), 当给 PN 结加上正向电压时 (外部电压正极接 P 端, 负极接 N 端), 外加电场方向与阻挡层内自建场方向相反, 因而削弱了自建场的电场力, 于是扩散运动超过漂移运动而成为矛盾的主要方面, N 区的电子不断往 P 区扩散, P 区的空穴不断往 N 区扩散, 其结果是大量的载流子越过结面。一个 P 区的空穴越过结面与 N 区的电子结合 (通常称作复合), 相当于给了 N 区一个正电量。这就意味着外接电源的负端有一个电子被吸引到 N 型区中。同样, 一个电子在 P 区与空穴复合, 相当于给了 P 区一个负电荷。这个负电荷将沿着导线被吸引到电源的正极。虽然在半导体内流动着的有电子和空穴, 但在外电路中却只有电子流动。

由于形成扩散电流的是多数载流子, 所以随着正向电压的增大、自建场的削弱, P 型区和 N 型区可提供足够的载流子越过结面。因此, 扩散电流将随着正向电压的增大而迅速增加, 这表示了此时 PN 结对外电路呈现较小的电阻。这时回路中的电流叫正向电流, PN 结呈现的电阻叫正向电阻。

外部电压削弱自建场的过程, 也就是 PN 结变窄的过程。外加电场驱使 P 区的空穴向 N 区移动, 空穴进入空间电荷区后, 就要和原来的负离子中和, 使空间电荷量减少; 同样, 外加电场使 N 区的电子向 P 区移动, 在进入空间电荷区时, 中和了部分正离子。空间电荷量减少的结果使 PN 结变窄。

如果给 PN 结外加一个反向电压, 如图1-3(b)所示。这时, 外加电场与自建场方向一致, 它将使空间电荷区加宽, 自建场增强, 于是多数载流子的扩散运动受到电场的排斥而难于进行, 只有少数载流子才受到电场的加速而穿过 PN 结, 形成由 N 型区到 P 型区的电流。由于热运动产生的少数载流子数量极微, 所以 PN 结的反向电流是很小的。这就意味着, 这时 PN 结对外电路呈现很大的电阻。这时回路中的电流叫反向电流, PN 结呈现的电阻叫反向电阻。

由以上分析可知, 当我们把 P 型半导体和 N 型半导体联结在

一起时,在它们的交界面处会产生 PN 结。 PN 结具有单向导电的特性,就是指:只有在其两端加上正向电压时,才有电流通过;加反向电压时, PN 结将对外电路呈现极大的电阻,可以认为基本上不导电。

习 题

1. P 区的多数载流子是什么? N 区的少数载流子是什么?
2. 如果要给 PN 结加正向电压,电源应该怎样接?
3. 为什么 PN 结具有单向导电性?
4. 分别说明当 PN 结两端加正向电压或反向电压时,参与导电的是多数载流子还是少数载流子?

第二节 半导体二极管

二极管就是由一个 PN 结,加上相应的电极引线和管壳做成的,通常以符号表示。

一、二极管的伏安特性曲线

二极管电流随外加电压变化的规律(伏安特性曲线)可由实验测得,一般均具有如图1-4所示形式。

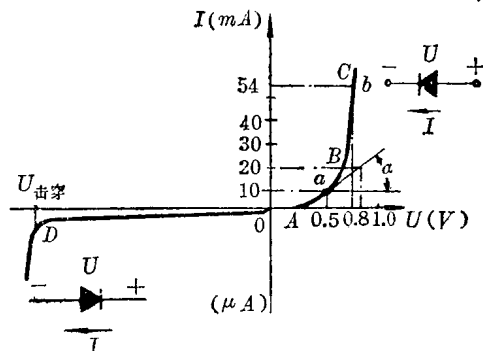


图 1-4 二极管的伏安特性

由图1-4可以看出，二极管具有下列特性：

(1) 二极管正向存在不灵敏区(图1-4中 OA 段)。这是因为，当正向电压较小时，外部电场还不足以克服内部电场对载流子扩散运动所造成的阻力。因此，当正向加电压时，锗管大约要在 $0.1\sim 0.4$ 伏左右，电流才开始显著增长，而硅管则要到 $0.4\sim 0.8$ 伏左右，电流才开始显著增长。

(2) 当反向电压达到一定值后，再继续增大，则反向电流几乎不变，即达到饱和值。这是因为，在一定温度下，少数载流子的数目是有限的。当反向电压达到一定数值后，已能使少数载流子全部越过结面，以致若继续增加电压，反向电流仍几乎保持不变。

实际上，由于电极间存在漏电，因此在反向电流达到饱和值后，反向电流仍然随着反向电压的增加而略有些增大。

当反向电压增加到某一数值后，电流突然急剧增加，出现反向击穿现象(关于击穿现象，详见第七章第一节)。

(3) 当二极管两极间加上正向电压，而且此电压的数值大于 U_A 时，二极管呈现很小的电阻；当二极管的两极间加上反向电压，而且此电压的绝对值小于击穿电压 $|U_D|$ 时，二极管呈现很大的电阻。在上述工作范围内，二极管的正向阻值小，反向阻值大，表现出单向导电的特性。二极管的这一特性可用以整流。

(4) 二极管伏安特性的 AB 段，电压与电流之间的关系不成比例。在无线电工程中通常将这段特性用来变频或变耗。

(5) 二极管伏安特性的 BC 段具有这样的特点，即通过管子的电流在很大范围内变化时，管子两端的电压却很少变化，这段特性可以用来稳压。

由以上讨论可见，二极管伏安特性曲线的不同区段具有不同的特性，因此有不同的用途。在使用二极管时，应根据不同的用途正确安排它的工作范围。

二、二极管的参数

1. 直流电阻 R

直流电阻 R ，指的是二极管两端所加的电压值 U 与流过二极管的直流电流值 I 之比，如下式：

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1-1)$$

例如：二极管工作于 a 点时（图1-4），对应的电压值 $U_a = 0.5V$ ，电流值 $I_a = 10mA$ ，则直流电阻 R_a 为：

$$R_a = \frac{0.5V}{10mA} = 50\Omega.$$

当二极管工作于 b 点时（图1-4），对应的电压值 $U_b = 0.75V$ ，电流值 $I_b = 54mA$ ，则直流电阻 R_b 为：

$$R_b = \frac{0.75V}{54mA} \approx 13.9\Omega.$$

由此可见，二极管的直流电阻值随着二极管的工作点不同而变化，二极管上流过的电流越大，直流电阻则越小。

2. 交流电阻（动态电阻） r

动态电阻 r ，指的是二极管在工作点附近的电压变化值 ΔU 和相应的电流变化值 ΔI 之比，如下式：

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (1-2)$$

二极管在不同的工作点工作时，其动态电阻值并不相等。二极管在某一工作点的动态电阻值，通常可在伏安特性曲线上通过该点作切线，求其斜率得出，如 a 点（图1-4）的动态电阻 r_a 为：

$$r_a = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{(0.8 - 0.5)V}{(20 - 10)mA} = 30\Omega.$$

由图1-4可知，二极管正向动态电阻很小，而且与直流电阻