

高等工业专科学校试用教材

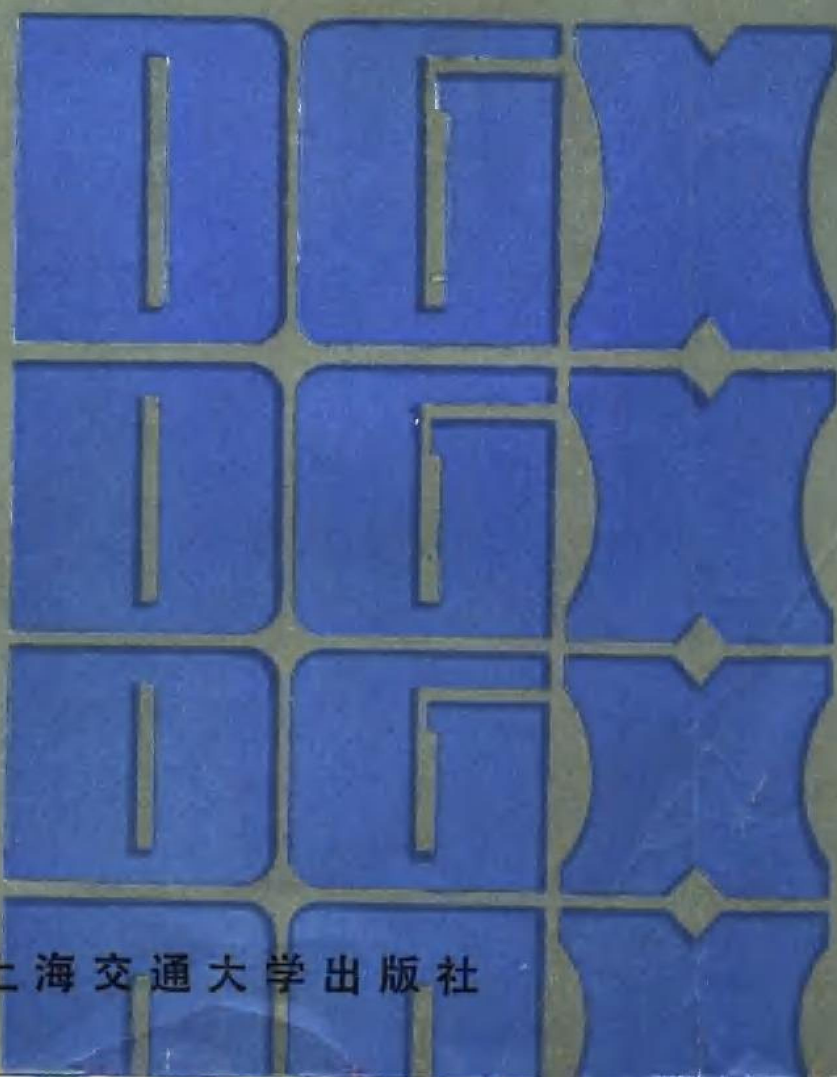
电 工 学

下 册

(电路与电机基础)

王元熊 主编

史淦森 校



上海交通大学出版社

1
2
2

电 工 学

(下册)

上海交通大学出版社出版
(上海淮海中路 1984弄 19号)

新华书店上海发行所发行

浙江浦江县印刷厂印装

开本787×1092 1/16 字数 360000

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

印数 1—14000

统一书号 15324·161 科技书目 131—278

定价: 2.45元

目 录

第十章 二极管、稳压管及其应用	(1)
10-1 半导体的导电特性	(1)
一 本征半导体	(1)
二 掺杂半导体	(2)
10-2 PN结及其单向导电性	(3)
一 PN结的形成	(3)
二 PN结的单向导电性	(4)
10-3 半导体二极管	(5)
一 构造	(5)
二 伏安特性	(6)
三 主要参数	(7)
10-4 单相整流电路	(7)
一 单相半波整流电路	(7)
二 单相桥式整流电路	(9)
*10-5 三相整流电路	(12)
10-6 滤波器	(14)
一 电容滤波	(14)
二 电感滤波	(17)
三 复式滤波	(18)
10-7 硅稳压管及并联型稳压电路	(20)
一 硅稳压管	(20)
二 简单的并联型直流稳压电路	(21)
10-8 二极管应用举例	(23)
小结	(25)
思考题和练习题	(25)
第十一章 晶体管和交流放大器	(28)
11-1 晶体管	(28)
一 基本结构	(28)
二 电流分配和放大原理	(29)
三 特性曲线	(30)
四 主要参数	(31)
11-2 基本放大电路的组成及工作原理	(32)
一 电路的组成	(32)
二 静态工作点的设置	(33)

三	直流通路和交流通路	(33)
11-3	放大电路的图解法	(34)
一	静态分析	(34)
二	动态分析	(36)
三	非线性失真	(38)
11-4	静态工作点的稳定	(39)
一	温度对静态工作点的影响	(39)
二	分压式偏置电路	(40)
11-5	放大电路的微变等效电路	(41)
一	晶体管的微变等效电路	(41)
二	电压放大倍数的计算	(42)
三	放大电路输入电阻和输出电阻的计算	(44)
11-6	阻容耦合放大电路	(45)
11-7	放大电路中的负反馈	(48)
一	反馈的基本概念	(48)
二	反馈类型的判别	(49)
三	负反馈对放大电路工作性能的影响	(50)
11-8	射极输出器及其应用	(52)
一	射极输出器	(52)
二	应用举例	(54)
11-9	功率放大器	(55)
一	无输出变压器的功率放大电路	(55)
二	变压器耦合推挽功率放大电路	(58)
小结		(59)
思考题和练习题		(61)
*第十二章	正弦波振荡电路	(67)
12-1	自激振荡	(67)
12-2	LC振荡电路	(68)
一	工作原理	(68)
二	基本电路	(69)
三	应用举例——半导体接近开关	(70)
12-3	RC振荡电路	(71)
一	RC网络的选频作用	(71)
二	文氏桥式RC振荡电路	(72)
小结		(73)
思考题和练习题		(73)
第十三章	晶闸管及其应用	(75)
13-1	概述	(75)
13-2	晶闸管	(75)
一	晶闸管的结构及可控单向导电特性	(75)

二	晶闸管的伏安特性	(77)
三	晶闸管的主要参数	(78)
13-3	具有电阻性负载的单相可控整流电路	(79)
一	单相半波可控整流电路	(79)
二	单相半控桥式整流电路	(83)
*13-4	具有电感性负载的单相半波可控整流电路	(85)
13-5	晶闸管的保护	(87)
一	晶闸管的过电流保护	(87)
二	晶闸管的过电压保护	(88)
13-6	单结晶体管触发电路	(89)
一	单结晶体管的结构和特性	(89)
二	单结晶体管自激振荡电路	(91)
三	用单结晶体管触发的可控整流电路	(92)
13-7	晶闸管的应用举例	(93)
一	用晶闸管调节直流电动机的转速	(93)
二	具有晶闸管的晶体管时间继电器	(95)
13-8	双向晶闸管与交流调压	(95)
一	双向晶闸管	(95)
二	双向晶闸管应用实例	(96)
小结		(97)
思考题和练习题		(98)
第十四章	直流放大电路	(100)
14-1	概述	(100)
一	直流放大器的任务	(100)
二	直耦方式带来的问题	(100)
14-2	直耦放大电路结构	(101)
一	同类型晶体管的直耦连接	(101)
二	不同类型晶体管的交叉连接	(101)
三	复合管连接	(103)
14-3	差动放大电路	(105)
一	典型电路的结构与原理分析	(105)
二	基本质量指标	(106)
三	晶体管恒流源式共模反馈结构	(107)
14-4	运算放大器	(108)
一	典型集成运放电路结构	(108)
二	主要特性与参数	(109)
三	调试要点	(111)
四	反相与同相输入方式	(111)
14-5	运算放大器应用线路示例	(113)
一	比较器	(113)

二	加法器	(114)
三	电压跟随器	(115)
*四	比例-积分-微分器	(115)
五	恒压源	(117)
六	恒流源	(117)
七	测量电路	(118)
*八	同相电平检出器	(119)
*九	波形发生器	(119)
小结		(120)
思考题和练习题		(122)
第十五章	数字电子技术基础	(125)
15-1	逻辑门电路	(125)
一	由二极管组成的“与”门和“或”门电路	(125)
二	由三极管组成的“非”门电路	(127)
三	复合门电路	(128)
四	各种逻辑门的输出与输入波形分析	(130)
*15-2	TTL “与非”门及扩展器	(131)
一	典型电路结构分析	(131)
二	扩展器及其连接	(132)
三	主要参数	(134)
15-3	组合逻辑运算规律	(135)
一	恒等逻辑规律	(136)
二	常用的逻辑演变公式	(137)
三	逻辑简化与逻辑变换应用举例	(138)
15-4	卡诺图及图解逻辑简化法	(139)
一	真值表与卡诺图	(140)
二	卡诺图的作法及图解括简原则	(140)
三	图解逻辑简化法应用举例	(141)
小结		(144)
思考题和练习题		(145)
第十六章	CMOS数字集成电路的原理和应用	(147)
16-1	场效应管的结构原理和特性参数	(147)
一	概述	(147)
二	结型场效应管的基本结构原理	(147)
三	绝缘栅型场效应管的结构原理和特性参数	(148)
四	场效应管的贮存及使用时的注意事项	(151)
16-2	数字集成电路概述	(152)
16-3	CMOS门电路	(154)
一	C033、C063六反相器	(154)
二	C035、C065三组3输入端与非门	(155)

三	C038、C068三组 3 输入端或非门	(156)
四	CMOS传输门	(157)
五	RS触发器与脉冲发生器	(158)
16-4	CMOS触发器	(161)
一	C043、C073双D触发器	(161)
*二	C044、C074双JK触发器	(164)
三	移位寄存器和数码寄存器	(166)
16-5	计数器、译码器及显示器	(167)
一	C180、C210BCD同步加法计数器	(167)
二	C301、C331BCD-十进制译码器及显示器	(171)
三	C305、C335BCD-8段字形译码器及显示器	(174)
16-6	CMOS数字集成电路的组合和应用举例	(177)
一	应用D触发器实现三进制计数	(177)
二	数控符合发信线路	(180)
小结		(181)
思考题和练习题		(182)
附录1	常用电阻器、电容器的标称系列值	(184)
一	电阻器的标称阻值和云母电容器、瓷介电容器的标称电容量系列表	(184)
二	铝电解电容器标称电容量系列表	(184)
三	电阻器的额定功率表	(185)
四	电容器耐压值系列表	(185)
附录2	国产半导体器件型号命名法	(185)
一	半导体器件型号五个组成部分	(185)
二	型号组成部分的符号及其意义	(186)
附录3	常用半导体器件的参数	(186)
一	2AP型检波二极管选录	(186)
二	硅半导体整流二极管选录	(187)
三	硅稳压二极管选录	(187)
四	3AX51(3AX31)型PNP锗低频小功率三极管	(188)
五	3AX81型PNP锗小功率三极管	(189)
六	3BX31型NPN锗小功率三极管	(190)
七	3DG100(3DG6)型NPN硅高频小功率管	(190)
八	3DG130(3DG12)型NPN硅高频小功率管	(191)
九	3D01型N沟道耗尽型MOS场效应管	(192)
十	3DJ6型N沟道结型场效应管、3DJ8型N沟道结型大跨导场效应管	(193)
十一	硅差分对管(3DG6型NPN硅平面双三极管)	(194)
十二	单结晶体管(BT-33型)	(194)
十三	晶闸管	(195)
十四	光敏二极管和光敏三极管选录	(196)

附录4 常用稳压集成电路性能和参数规范——5G14小功率集成稳压器	(197)
附录5 集成运算放大器选录	(199)
一 5G922 (类似F001型) 低增益运算放大器	(199)
二 F007 (5G24) 高增益运算放大器	(202)
三 F012 (5G26) 低功耗运算放大器	(204)
四 5G28高输入阻抗运算放大器	(206)
附录6 CMOS数字集成电路选录	(209)
一 C004、C034、C064四输入端双与非门	(209)
二 C007、C037、C067四输入端双或非门	(211)
三 C158、C188、C218BCD可预置数可逆计数器 (单时钟)	(213)
四 C514、C544、C574四双向开关	(216)
五 C633、C663、C693四位数字比较器	(218)
中英文名词对照	(221)
习题选答	(228)

第十章 二极管、稳压管及其应用

目前,在工农业生产中虽已广泛使用了由发电厂提供的交流电,但是在许多场合仍要用直流电,尤其在很多电子仪器和由电子元器件组成的自动控制系统里,不仅需用直流电,而且还要求直流电压十分稳定,以便能获得良好的工作性能。在半导体技术迅速发展的今天大多已不再使用直流发电机这类直流电源了,而是采用晶体管整流装置,直接把交流电转换成直流电。这一转换过程称为整流。

本章将先从半导体的导电特性谈起,然后着重讨论半导体二极管的单向导电特性和主要参数,以及用半导体二极管作为整流元件的几种整流电路的工作情况。最后简要地介绍如何利用滤波与稳压电路来获得稳定的直流电。

10-1 半导体的导电特性

自然界里的物质,如按其导电特性划分,可分为导体、绝缘体和半导体三类。导体的导电能力最好,绝缘体的导电能力最差,半导体的导电能力则介于导体和绝缘体之间。

在金属导体中,由于原子外层的电子受原子核的束缚较小,即使在室温条件下,也有大量的外层电子能挣脱原子核对它的束缚而成为自由电子。自由电子在外电场的作用下,极易形成电流,故导电性能极好。在绝缘体中,原子核对外层电子的束缚力很大,自由电子极少,即使在很强的外电场作用下,也难形成明显的电流,因此它的导电性能极差。在半导体材料中,其原子核对外层电子的束缚力,介于上述两种材料之间,故其导电性能也介于这两种材料之间。这里需要特别指出的是,半导体容易受到热、光、磁和杂质等因素的影响而改变其导电性能。也正是由于它的这一特殊性能,它才得到了极其广泛的应用。

半导体材料很多,诸如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物等。现以硅材料为例,简要地介绍半导体的导电性能。

一 本征半导体

完全纯净的、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。单晶硅便是一种本征半导体。

硅是四价元素,每个硅原子的最外层都有四个价电子。当把硅材料提纯成单晶硅后^①,其中所有的原子基本上排列整齐,并具有晶体结构,每个原子都通过外层的四个价电子与相邻的四个原子紧密地联系在一起。这时,每两个相邻原子之间都共有一对电子,如图10-1所示,原子间的这种结合形式称为共价键结构。共价键结构是比较稳定的,处于共价键中的电子是一种束缚电子,一般情况下不能参与导电,因此本征半导体的导电性能很差。

但是共价键结构对电子的束缚并不象绝缘体结构那样牢固。当单晶硅受到热量、光照等外界能量激励时,有些共价键中的价电子在吸收到一定能量之后,能冲破原子核的束缚而逸出,成为自由电子,它们可以在晶体内自由移动。在电子逸出后的共价键内便留下了空位,

^① 晶体分为单晶体和多晶体两种,若整个晶体的原子按一定规律整齐排列,则称为单晶体;若整个晶体由大量小单晶体杂乱排列组成,则称为多晶体。

通常称为空穴。既然空穴是由于原子失去了带负电的电子形成的，因而可以把空穴看作带正电的粒子，它所带的电量与电子的相等而符号则相反。因为空穴具有带正电的性质，所以空穴的出现会发生两种结果：一是重新与自由电子结合，导致半导体内的自由电子和空穴成对地同时消失（如图10-2所示），这种情况称为复合；另一种情况是空穴被附近共价键中的价电子前来填补，于是空穴移到了前来填补的那个电子原来所在的位置上，形成了空穴在半导体内的移动。在没有外电场作用的情况下，自由电子和空穴在半导体内的移动都是不规则的，不会形成电流。但是在外电场的作用下，自由电子将逆着电场方向移动，而空穴将顺着电场方向连续移动，前者形成电子电流，后者形成空穴电流。所以在半导体中带着电荷移动并形成电流的不仅是电子，还有空穴，这是半导体导电方式的最大特点。电子和空穴都称为载流子。在本征半导体中载流子的产生主要是受到热能的激励而引起的，随着温度的升高，载流子数量会增多，其导电能力也会有所提高。但是在室温条件下，本征半导体内的载流子不多，故导电能力很差。

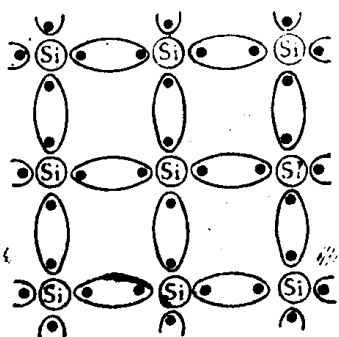


图10-1 单晶硅中的共价键结构

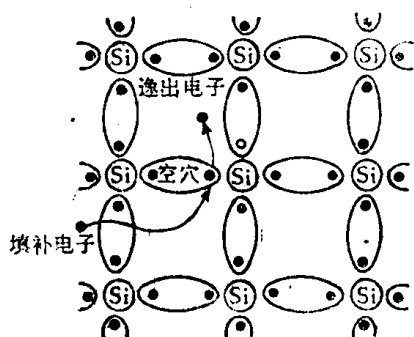


图10-2 由激励产生的自由电子和空穴

二 掺杂半导体

为了提高半导体的导电能力，通常在半导体中掺入微量有用杂质，制成导电能力有明显提高的掺杂半导体。掺杂半导体有N型和P型两类。

如果在纯净的单晶硅中掺入少量五价元素磷（或五价元素砷、锑等），那末在硅晶体结构的某些位置上，硅原子为磷原子所取代，如图10-3所示。磷原子有五个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，便多出了一个价电子，这个没有组成共价键的价电子由于受磷原子的束缚很弱，稍受激励便能成为自由电子。磷原子在失去电子后，将成为带正电的离子，仍旧处在原来的位置上，不能移动，不参与导电。在这类半导体中，几乎每一个磷原子都能提供一个自由电子，因而自由电子的数目比没有掺杂时要大得多。当然，由于温度的影响，少量共价键里的电子也会挣脱共价键对它的束缚而逸出，产生自由电子和空穴。因而在这类半导体里也有少量空穴，但自由电子的浓度比空穴的浓度要大得多。显然在这类半导体中，主要依靠自由电子导电，因此称为电子型半导体或N型半导体。在N型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

如果在纯净的单晶硅中，掺进少量三价元素硼（或三价元素铝、镓等），由于每个硼原子的外层只有三个价电子，当它和周围的四个硅原子组成共价键时，其中的一个键上会由于缺少电子而出现空穴，如图10-4所示。在室温下这个硼原子很容易从附近的共价键中夺取一个电子后变成带负电的离子，而在失去电子的共价键中形成空穴。在这类半导体中，几乎每掺入一个三价原子都能提供一个空穴。虽然由于温度的影响，半导体内也同时产生少量的自

由电子和空穴，但两者相比，空穴的浓度要比自由电子的浓度大得多，因此这类半导体主要靠空穴导电，故称为空穴型半导体或P型半导体。在P型半导体中，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

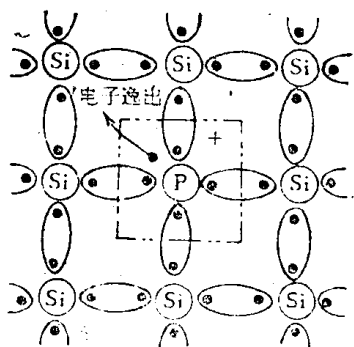


图10-3 N型半导体的晶体结构

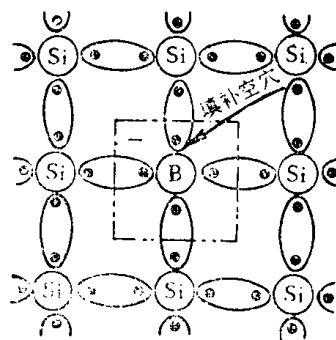


图10-4 P型半导体的晶体结构

以上情况表明，在杂质半导体中参与传导电流的载流子主要是多数载流子。由于杂质原子在室温下已全部电离，所以多数载流子的多少只与掺杂浓度有关而与温度无关。少数载流子则随温度的上升而增多。在杂质半导体中虽有很多载流子，但整个半导体仍然是电中性的。

10-2 PN结及其单向导电性

如果在一块纯净的单晶硅里，一边掺三价元素形成P型半导体，另一边掺五价元素形成N型半导体，那末在两种半导体的交界处就会形成一个特殊的薄层，即PN结。PN结是构成半导体二极管、三极管以及晶闸管等半导体器件的基础。现就PN结的形成和它的单向导电性简述如下：

一 PN结的形成

我们知道，单独生成的P型半导体中有着较多的空穴，N型半导体中有着较多的自由电子，如图10-5(a)所示。当一块本征半导体的两边分别掺入三价与五价不同杂质使P区与N区相邻并形成交界面时，交界面两侧的两种载流子的浓度相差很大。因此，P区的空穴就要越交界面向N区扩散；同样，N区的自由电子也要向P区扩散。这就形成了多数载流子在交界面附近区域内的扩散运动（如图10-5(b)所示）。

本来，P区半导体和N区半导体都是电中性的。现在，由于相互扩散的结果，在N区半导体中 will 因为失去电子而形成带正电的离子层；在P区半导体中 will 由于失去空穴而形成带负电的离子层。正、负离子层同时出现在交界面两侧，使交界面处产生了一个静电场，这个电场的方向由N区半导体中的正离子层指向P区半导体中的负离子层，如图10-5(c)所示。显然，由这个电场所产生的电场力将阻止P区的多数载流子（空穴）继续向N区扩散，同时也要阻止N区的多数载流子（电子）继续向P区扩散。因此我们把这两个离子层合称为阻挡层，也就是PN结。需要指出的是PN结的电场力同时会使P区的少数载流子（电子）向N区移动，使N区的少数载流子（空穴）向P区移动。为了区别于因浓度差引起的扩散运动，我们把载流子在电场力作用下产生的运动称为漂移运动。由此可见，在PN结的形成过程中，扩

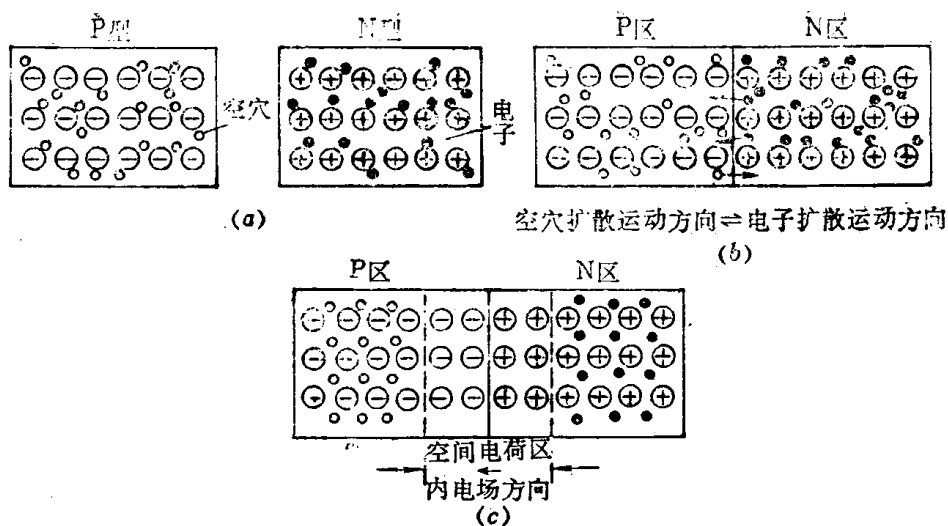


图10-5 PN结的形成

- (a) 单独生成的P型和N型半导体; (b) 两边分别掺入三价与五价杂质构成PN结时, 多数载流子的扩散运动;
(c) 扩散运动与漂移运动达到相对平衡, PN结形成

扩散运动和漂移运动是同时发生的, 只是在刚开始时, 扩散运动处于优势, 阻挡层随着扩散运动的进行而加厚, 电场力也跟着增大, 致使扩散运动逐渐减弱, 漂移运动逐渐增强, 直到扩散运动和漂移运动所起的作用相等时, 阻挡层便不再加厚, 达到了动态平衡。一般PN结的厚度小于 $1\mu\text{m}$ 。由正、负离子层组成的PN结, 有时也称为空间电荷区。又因为这个区域内的多数载流子几乎已全部向对方扩散并复合殆尽, 因此这个空间电荷区又称为耗尽区。显然, 耗尽区的电阻率极高。

由于PN结中带有正、负电荷的两个离子层空间, 有着与带电电容器两极板间相类似的作用, 所以PN结也具有电容, 这种电容称为结电容。结电容的数值不大(只有几pF), 但是它对PN结的高频特性影响很大。

二 PN结的单向导电性

上面讨论的是PN结上没有外加电压作用时的情况, 下面讨论有外加电压作用时的情况。

1 外加正向电压时的情况

如果在PN结两侧, 外加直流电压, 其方向是P区接正、N区接负, 如图10-6(a)所示(这个外加电压称正向电压或正向偏置), 那末外加电压在PN结上所产生的电场(称外电

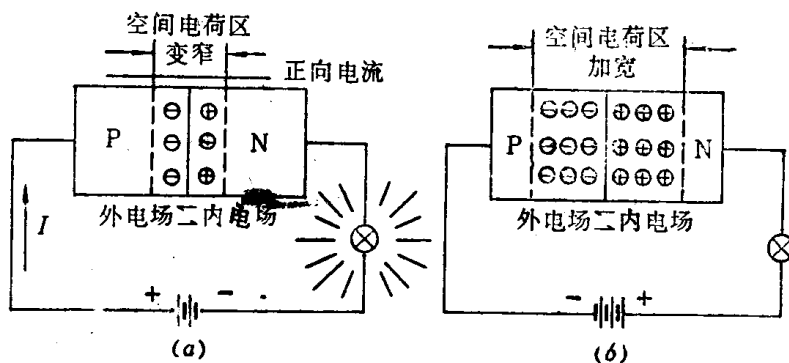


图10-6 PN结的单向导电性

- (a) 加正向电压PN结导通; (b) 加反向电压PN结截止

场)方向与结内正、负离子层所形成的电场(又称内电场)方向相反。因此在外电场的驱使下,P区的空穴进入阻挡层,抵消阻挡层内的部分负电荷;同时N区的自由电子也进入阻挡层,抵消了部分正电荷。于是阻挡层变薄,内电场变小,漂移运动跟着减弱,而扩散运动跟着增强。这样,多数载流子便能持续不断地越过PN结,在回路里形成较大的正向电流。这时,PN结所呈现的电阻(称正向电阻)很小,PN结处于导通状态。

2 外加反向电压时的情况

如果把P区接电源的负极,把N区接电源的正极,如图10-6(b)所示(这样的连接使PN结加上了反向电压,或称反向偏置),那末外电场和内电场的方向一致,总电场大大增强,使阻挡层增厚,于是多数载流子的扩散运动受到阻碍,而少数载流子的漂移运动得到加强。但是在常温下,少数载流子的数量很少,它们在反向电压作用下,通过PN结并在回路中所能形成的反向电流极微小。这时PN结呈现的电阻(称反向电阻)很大,PN结处于截止状态。

必须指出,在常温下少数载流子的数量不多,且在不太高的反向电压作用下已能全部越过PN结形成反向电流,所以一个理想的PN结在反向电压升高时,反向电流却基本保持在一个几乎不变的很小的数值上,并不跟着反向电压的升高而增大。因此这个反向电流又称为反向饱和电流。

还应指出:PN结的反向饱和电流受温度的影响很大,随着温度的上升,少数载流子增多,反向饱和电流迅速增大。因而在使用半导体器件时,必须考虑到环境温度对器件的影响。

综上所述,PN结在正向偏置时,有较大的正向电流流过,PN结导通;反向偏置时,仅有极小的反向电流,PN结截止,所以PN结在电路中具有单向导电作用。

10-3 半导体二极管

一 构造

半导体二极管(又称晶体二极管或简称二极管)是由一个PN结、外壳及引线等构成的。从P区半导体上引出的电极称阳极,从N区半导体上引出的电极称阴极。

根据内部结构的不同,半导体二极管可分为点接触型和面结合型两类,其结构示意图如图10-7所示。图10-7(a)为点接触型半导体二极管,由于它的结面积小、结电容也小,可

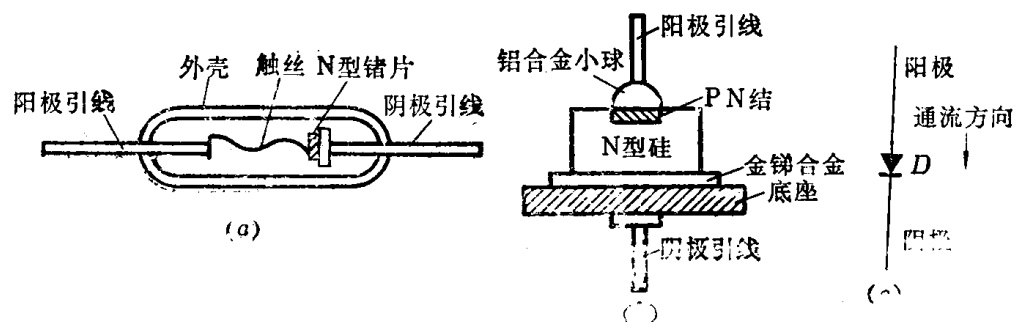


图10-7 半导体二极管

(a) 点接触型; (b) 面结合型; (c) 符号

以在很高的频率下工作，故适用于检波、调制及各种开关电路，但不能通过大电流。图10-7 (b) 是面结合型半导体二极管。这种二极管的结面积大，能通过较大的正向电流，但是它的结电容也大，不宜在高频下使用，所以面结合型二极管都用于低频大电流的整流器中。图10-7 (c) 是二极管的文字符号和图形符号，图中三角形箭头所指的是正向电流的流通方向。

根据所用半导体材料的不同，二极管又分为锗管和硅管两类。目前大容量整流元件一般都采用硅材料的面结合型半导体二极管，因此本章也以这类硅整流管为主要讨论对象。

半导体二极管的型号很多，我国采用的半导体的命名方法见本书附录。图10-8是常见的几种半导体二极管的外形图。

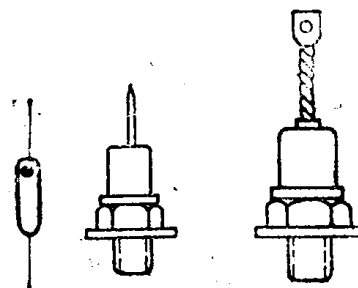


图10-8 几种常见的半导体二极管外形图

二 伏安特性

为了能正确地使用半导体二极管，需了解它的伏安特性。所谓伏安特性，就是指加在二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的函数关系。

图10-9是某一个硅二极管的伏安特性曲线实例。型号不同的二极管，参数虽有不同，但伏安特性曲线的形状是相似的。图中第一象限是正向特性，第三象限是反向特性。从图示的伏安特性曲线可以清楚地看到二极管的单向导电特性。

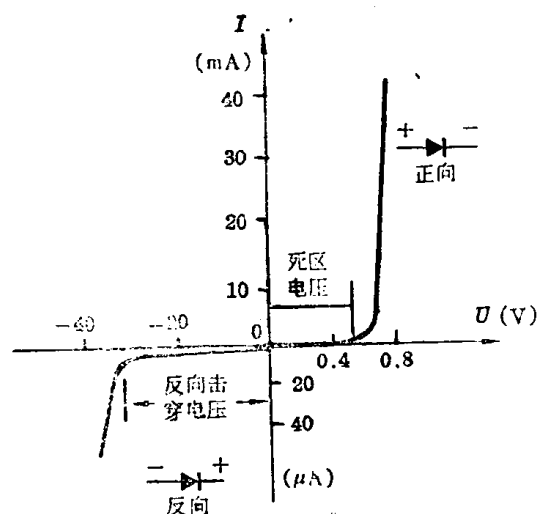


图10-9 硅二极管伏安特性曲线实例

1 当二极管两端外加正向电压时，在正向电压由零开始增大的一段，由于外加电压还很低，PN结的内电场对载流子的扩散运动仍具有明显的阻挡作用，因此流过二极管的电流极微，这一段区域称为“死区”。在二极管两端所加的正向电压超过一定数值以后（这个数值称为死区电压或阈值电压，通常锗管约是0.2V，硅管约是0.5V），内电场被大大削弱，阻挡层变薄，二极管呈现的正向电阻变小，于是随着正向电压的增加，正向电流上升很快，这时二极管即进入导通状态。二极管进入导通状态后，其正向电流在一定范围内变化时，二极管两端的电压却变化不大（近似为恒压特性），小功率锗管约为0.3V，硅管约为0.6V。上述数据常作为小功率二极管正向导通时的管压降估算值。

2 在二极管两端加反向电压时，在反向电压由零开始增大的一段上反向电流极小，此即二极管的反向饱和电流，或称反向漏电流。一般硅管的反向电流约在一 μA 到几十 μA 之间，锗管可达几百 μA 。当反向电压不断增大并超过某一数值后，反向电流会突然增大，二极管即失去单向导电性，这种现象称为反向击穿。导致二极管反向击穿的相应电压值称为反向击穿电压。

形成二极管反向击穿的原因是外加电压过高，即外电场太强，使PN结中的束缚电子也脱离了共价键，形成自由电子和空穴，因此载流子数目剧增。处于强电场中的这些载流子，

又因获得强电场给予的能量而加速，把其他原子中的价电子撞击出来。如此连续撞击，反向电流越来越大，最后使二极管反向击穿。二极管反向击穿后，不再能恢复原有的单向导电特性，所以二极管工作时，不允许出现反向击穿情况。

晶体二极管的工作特性受温度影响很大，当温度升高时，它的正向压降减小、反向电流增大，而反向击穿电压更会明显下降。一般硅二极管的PN结所允许的工作温度大于锗二极管，因此大功率整流管几乎都用硅制成。并且在使用中必须按手册规定加装一定大小的散热片，以便降低二极管的工作温度，否则将影响它所允许通过的工作电流值。

三 主要参数

二极管的参数规定了二极管的适用范围，它是合理选用和安全使用二极管的依据。半导体二极管的主要参数有：

1 最大整流电流 I_{OM}

这是指长期工作时，二极管允许通过的最大正向平均电流值。如果电流太大，则二极管发热过甚，就会把PN结烧坏。因此在选用二极管时，不能使工作电流超过其最大整流电流。

2 最高反向工作电压 U_{RM}

这是指二极管工作时，能承受的反向电压峰值。为了防止二极管遭受反向击穿而损坏，一般半导体器件手册上列出的各种二极管的最高反向工作电压，是按它的反向击穿电压的1/2或2/3规定给出的。在选用二极管时，应注意加在二极管上的反向电压峰值不能超过它的最高反向工作电压。一般点接触型二极管的最高反向工作电压约是数十V，面结合型二极管则可达几百V，甚至更高。

3 最大反向电流 I_{RM}

这是指二极管加上最高反向工作电压时的反向电流值。反向电流大的二极管，其单向导电性能差，而且受温度的影响也大。

除了以上主要参数外，还有最高工作频率、最大整流电流时的正向压降等参数，这些可以在半导体器件手册中查到，本书附录中也列举了一些常用的半导体二极管的参数供参考。

10-4 单相整流电路

利用二极管组成的整流电路，按其所用交流电源的相数不同，可分为单相整流电路和三相整流电路等。单相及三相整流电路中又有半波、全波、桥式电路等不同形式。本节将只介绍半波和桥式两种整流电路。

一 单相半波整流电路

单相半波整流电路是最简单的整流电路，电路如图10-10所示。图中B是电源变压器，通过它的变换向整流电路提供合适的交流电压 u_2 ；D是整流元件（半导体二极管）； R_L 是直流负载电阻。

设变压器副边电压 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ ，则其波形如图10-11(a)所示。

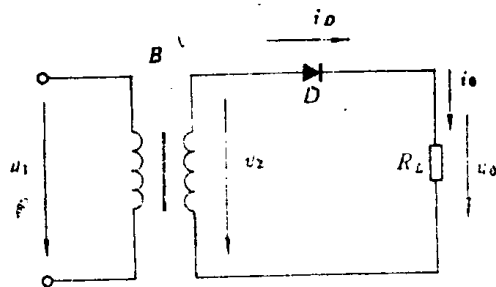


图10-10 单相半波整流电路

在 $0 \leq \omega t \leq \pi$ 的正半周内, 变压器副绕组感应电压 u_2 的极性为上端正、下端负。二极管 D 因承受正向电压而导通, 电流从副绕组的上端流出, 经二极管 D 流过负载 R_L , 到副绕组的下端流进变压器。如略去二极管的正向管压降不计(硅二极管的正向管压降约为 0.6 V), 则负载两端的电压与变压器副边电压相等, 即 $u_0 \approx u_2$ 。

而电流 $i_0 = \frac{u_0}{R_L} \approx \frac{u_2}{R_L}$ 。

在 $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ 的负半周内, 变压器副绕组的上端为负, 下端为正, 使二极管 D 承受反向电压而截止, 负载上几乎没有电流流过, 负载两端电压 $u_0 \approx 0$ 。

因此, 尽管变压器的副边电压 u_2 是交变的, 但由于二极管的单向导电作用, 流过负载的电流 i_0 和负载上的电压 u_0 都是单一方向的, 如图10-11(b)和(c)所示。因为这种电路只在电压 u_2 的半个周期内有电流通过, 所以称半波整流电路。

电子负载电压 u_0 是一个半波脉动电压, 因此在整个周期内, 负载电压的平均值 U_0 为

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2 \quad (10-1)$$

上式表明, 在单相半波整流电路中, 负载电压(即直流输出电压)的平均值是变压器副边电压有效值的一半还不到。

流经负载电阻 R_L 的电流也是一个半波脉动电流, 在整个周期内的平均值 I_0 应是

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (10-2)$$

因为二极管 D 是与负载 R_L 串联的, 所以流过二极管的电流 i_D 就是负载电流 i_0 , 其平均值 I_D 为

$$I_D = I_0 \quad (10-3)$$

由于二极管 D 在反向截止时, 承受的反向电压就是变压器副边电压 u_2 , 因此 u_2 的最大值应是二极管 D 截止时所承受的最大反向电压, 即

$$U_{DRm} = \sqrt{2} U_2 \quad (10-4)$$

二极管承受的反向电压 U_{DR} 的波形如图10-11(d)所示。

从图10-11中, 可以看到单相半波整流电路的输出直流电压和电流都是半波脉动电压和电流。这样的非正弦周期电压和电流可以利用傅立叶级数分解为直流分量(即平均值)和一系列频率不同的交流分量, 其电压表达式为

$$u_0 = U_m \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right) \quad (10-5)$$

式中 $u_m = \sqrt{2} U_2$ 。分解后的波形见图10-12。其中一次谐波是幅值最大的交流分量, 其幅值竟高达 $\frac{U_m}{2}$, 而直流分量仅是 $\frac{U_m}{\pi}$, 故半波整流后的直流输出电压(及电流)的脉动很大而平均值较小。

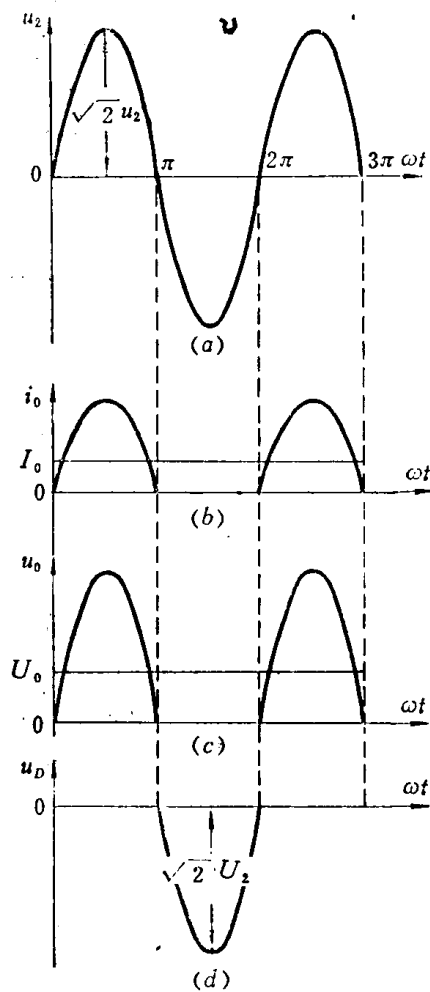


图10-11 单相半波整流电路的波形图

综上所述,单相半波整流电路的优点是电路简单,其缺点是直流输出电压低,而且脉动程度很大。因此仅用于对直流输出电压平滑程度要求不高的小功率整流器以及电解、电镀等要求脉动供电的场合。

例10-1 有一直流负载需用直流电压 $U_0 = 50(\text{V})$, 电流 $I_0 = 20(\text{mA})$ 。如采用单相半波整流电路, (1) 试选择整流二极管; (2) 试求电源变压器副边电压有效值和电流有效值。

解: (1) 因为 $U_0 = 0.45U_2$, 所以

$$U_2 = \frac{U_0}{0.45} = \frac{50}{0.45} = 111(\text{V})$$

故二极管承受的最大反向电压为

$$U_{DRm} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 111 = 157(\text{V})$$

流过二极管的电流

$$I_D = I_0 = 20(\text{mA})$$

考虑到在实际使用时交流电源电压可能有波动, 因此为了保证整流二极管能安全可靠地工作, 选择二极管时应留有适当的余量。查手册或本书附录, 可选用2CZ52E(100mA, 300V)或旧型号2CP15(100mA, 250V)及2CP16(100mA, 300V)等型号的二极管。

(2) 如果忽略二极管的正向压降和电源变压器的阻抗压降, 则副绕组的空载电压应是

$$U_2 = \frac{U_0}{0.45} = \frac{50}{0.45} = 111(\text{V})$$

因为 $i_2 = i_0$, 故变压器副边电流的有效值为

$$\begin{aligned} I_2 &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_2^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_0^2 d(\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_0^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{I_0}{2} = \frac{\pi}{2} I_0 \\ &= 1.57 I_0 = 1.57 \times 20 = 31.4(\text{mA}) \end{aligned}$$

上面的计算结果为选用合适的整流变压器提供了必要的数据。

二 单相桥式整流电路

单相桥式整流电路是目前应用很广的整流电路, 电路结构如图10-13(a)所示, 由于电路接成一个电桥的形式, 故称桥式整流电路。图10-13(b)、(c)是它的另外两种画法。

单相桥式整流电路的工作原理如下:

设电源变压器副边电压 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$, 其波形如图10-14(a)所示。

在 u_2 的正半周 ($0 \leq \omega t \leq \pi$) 期间, 由于变压器副绕组的 a 端为正, b 端为负, 因此二极管 D_1 、 D_3 受正向电压作用而导通, 而 D_2 、 D_4 受反向电压作用而截止。电流由变压器副绕组的 a 端流出, 经 D_1 、 R_L 、 D_3 , 从 b 端流回变压器。

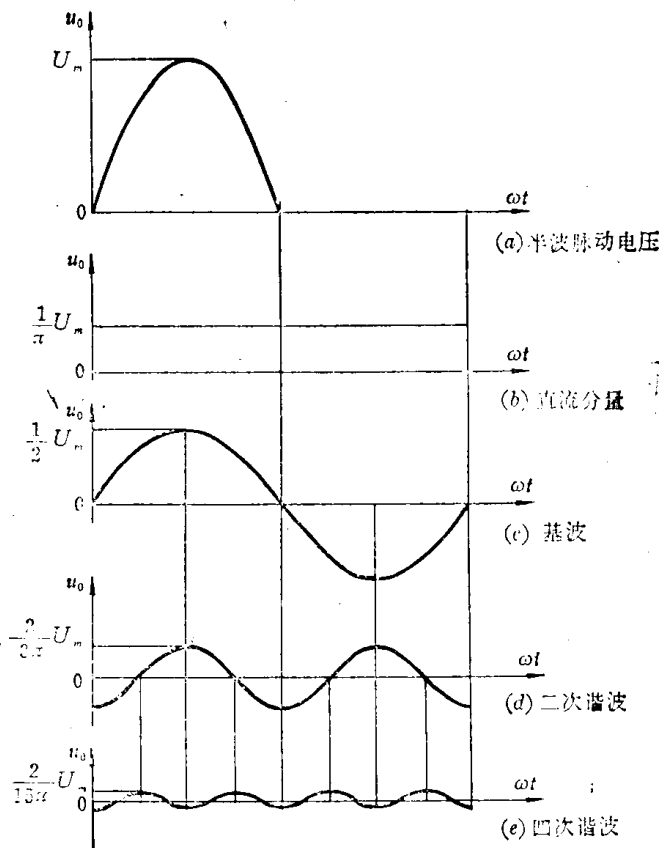


图10-12 半波脉动电压的直流分量和交流分量