

高等学校教材

电 工 学

(第 二 版)

下 册

浙江大学电工学教研室编

罗守信 主编

目 录

第三篇 工业电子技术

第九章 晶体二极管及整流电路	1
内容提要	1
9-1 半导体的导电方式	1
9-2 PN 结及其单向导电性	4
一、PN 结的形成	4
二、PN 结的单向导电性	5
9-3 晶体二极管	7
一、晶体二极管的结构	7
二、晶体二极管的伏安特性	8
三、晶体二极管的主要参数	9
9-4 单相整流电路	10
一、单相半波整流电路	11
二、单相桥式整流电路	14
9-5 三相桥式整流电路	17
9-6 滤波电路	20
一、电容滤波电路	21
二、电感滤波电路	23
三、 CR 滤波电路	25
*四、整流滤波电路元件的选择	26
9-7 稳压二极管	29
9-8 稳压二极管组成的稳压电路	33
一、稳压二极管组成的稳压电路的工作原理	33
*二、稳压二极管组成的稳压电路元件的选择	34
本章小结	37
习题	38
第十章 晶体三极管和交流放大电路	44

内容提要	44
10-1 晶体三极管	44
一、晶体三极管的结构	44
二、晶体三极管的电流放大作用	45
三、晶体三极管的特性曲线	49
四、晶体三极管的主要参数	53
10-2 交流放大电路的基本原理	57
一、简单的单管交流放大电路	58
二、交流放大电路的工作情况	59
10-3 放大电路的图解分析法	63
一、放大电路静态工作情况的图解分析法	64
二、放大电路动态工作情况的图解分析法	66
三、静态工作点的选择	70
10-4 放大电路的微变等效电路分析法	73
一、晶体三极管的简化微变等效电路	74
二、单管交流放大电路的微变等效电路	76
三、单管交流放大电路的电压放大倍数	77
10-5 静态工作点的稳定	80
一、温度对放大电路静态工作点的影响	80
二、分压式电流负反馈稳定电路	81
10-6 阻容耦合多级放大电路	84
一、放大电路的输入电阻和输出电阻	86
二、多级放大电路的电压放大倍数	89
三、阻容耦合放大电路的频率特性	91
10-7 负反馈放大电路	93
一、负反馈对放大电路性能的影响	94
二、常用的基本负反馈放大电路	100
10-8 功率放大电路	111
一、单管功率放大电路	111
二、推挽功率放大电路	117
三、无变压器的功率放大电路	121
*10-9 场效应管及其放大电路	126
一、结型场效应管	127

二、绝缘栅场效应管	132
三、场效应管的主要参数和使用注意事项	136
四、场效应管放大电路的偏置电路	138
本章小结	140
习题	143
第十一章 正弦波振荡电路	152
内容提要	152
11-1 振荡电路的自激条件	152
11-2 LC 正弦波振荡电路	154
一、从谐振放大电路到 LC 振荡电路	154
二、振荡的建立与稳定	156
三、 LC 正弦波振荡电路	157
四、 LC 振荡电路应用举例——XCT 型温度指示调节仪中的 LC 振荡电路	161
11-3 RC 桥式正弦波振荡电路	164
本章小结	166
习题	167
第十二章 直接耦合放大电路和运算放大器	170
内容提要	170
12-1 直接耦合放大电路的特点	170
一、前后级静态工作点的相互影响	170
二、电位移动电路	173
三、零点漂移	174
12-2 差动放大电路	177
一、差动放大电路的工作原理	177
二、具有恒流源的差动放大电路	185
三、差动放大电路的其他几种接法	188
12-3 运算放大器的组成及其电压传输特性	190
一、运算放大器的组成	190
二、运算放大器的电压传输特性	194
12-4 反相和同相输入比例运算放大器	196
一、反相输入比例放大器	197

二、同相输入比例放大器	199
12-5 运算放大器的基本模拟运算	201
一、加法运算	201
二、减法运算	202
三、积分运算	204
四、微分运算	206
*12-6 运算放大器的应用举例	207
一、测量放大器	207
二、比较器	209
三、串联型稳压电路	211
本章小结	213
习题	214
第十三章 晶闸管及其应用	222
内容提要	222
13-1 晶闸管	222
一、晶闸管的结构	223
二、晶闸管的工作原理	224
三、晶闸管的伏安特性	226
四、晶闸管的主要参数	228
13-2 可控整流电路	230
一、单相半波可控整流电路	230
二、单相桥式可控整流电路	237
*三、三相半控桥式整流电路	239
13-3 单结晶体管触发电路	243
一、单结晶体管	243
二、单结晶体管振荡电路	247
三、单结晶体管触发电路	249
13-4 晶闸管的保护	253
一、晶闸管的过流保护	253
二、晶闸管的过压保护	256
*13-5 晶闸管交流调压电路	259
*13-6 应用电路举例	262
本章小结	265

习题	266
第十四章 数字电路	269
内容提要	269
14-1 概述	269
14-2 基本门电路	271
一、“与”门电路	272
二、“或”门电路	274
三、“非”门电路	277
14-3 集成“与非”门电路	281
一、“与非”门的逻辑功能	282
*二、集成“与非”门电路举例——TTL“与非”门电路	283
三、集成“与非”门电路的电压传输特性和主要参数	286
14-4 逻辑代数及其在组合逻辑电路分析中的应用	291
一、逻辑代数的基本运算规则	291
二、组合逻辑电路的分析方法	293
14-5 触发器	296
一、基本 RS 触发器	297
二、同步 RS 触发器	300
三、JK 触发器	302
四、D 触发器	306
*14-6 用“与非”门构成的单稳态触发器和多谐振荡器	307
一、单稳态触发器	308
二、多谐振荡器	312
14-7 计数器	315
一、二进制加法计数器	315
二、十进制加法计数器	319
14-8 译码器	322
一、二进制译码器	322
二、二十进制译码器	324
14-9 数字显示	327
*14-10 数字电路应用举例——数字钟同步时序控制器	331
本章小结	336
习题	338

文字符号说明	346
附录一 电阻器、电位器及电容器的类别	348
附录二 国产半导体器件型号命名法	352
附录三 常用半导体器件参数	353
附录四 半导体集成电路型号命名法	372
附录五 几种 TTL“与非”门的主要参数	373
附录六 几种常用国产集成运算放大器的简介	374
附录七 几种常用国产集成运算放大器主要参数表	380
各章部分习题答案	382
参考书目	385
中英名词对照	386

第三篇 工业电子技术

第九章 晶体二极管及整流电路

内 容 提 要

半导体器件具有体积小、重量轻、寿命长、工作可靠等优点，在电子技术中得到广泛应用。本章在简述半导体(P型与N型半导体)导电方式的基础上，讨论PN结的单向导电性，接着介绍二极管的结构、伏安特性与主要参数，然后分析整流、滤波电路。最后介绍稳压二极管以及由稳压二极管组成的稳压电路。

9-1 半导体的导电方式

半导体除了导电能力介于导体和绝缘体之间外，还具有不同于其它物质的许多特殊性质。例如有些半导体在环境温度增高或受到光照时，导电能力会显著增强，热敏元件和光敏元件就是利用这种特性制成的。又如在纯净的半导体中加入极微量的杂质，它的导电能力将会急剧增强，正是利用半导体这一突出的性质，制造出各种不同的半导体器件。

为了理解半导体导电性能上的特点，下面简单介绍一下半导体的结构与导电方式。

常用的半导体材料硅和锗原子的最外层电子都是四个，即有四个价电子，都是四价元素。当有很多原子按一定规则整齐地排列成对称的点阵时，即形成晶体结构。硅和锗等半导体材料具有

晶体结构,所以半导体管亦称晶体管。

除去杂质的纯净半导体,称为**本征半导体**。图 9-1 所示为硅材料提纯后,并通过特殊工艺形成单晶体的原子排列示意图。硅原子组成硅晶体时,每个原子的一个价电子与相邻原子的一个价电子组成**共有电子对**。共有电子对中的任一电子,一般都围绕着自身的原子核运动,有时也出现

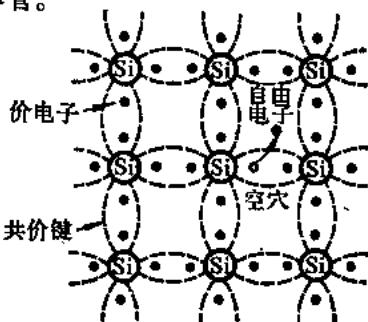


图 9-1 硅晶体结构的共价键与热运动产生的电子-空穴对示意图

在相邻原子所属的轨道上。这样的组合,称为**共价键结构**。

共价键中的价电子受热激发获得一定的能量时,其中少数价电子挣脱共价键的束缚成为**自由电子**。这时共价键的位置上便留下空位,称为**空穴**。原子由于失掉一个电子而带正电,或者说,原子中出现了带正电的空穴,如图 9-1 所示。

运载电荷的带电粒子,称为**载流子**。由于空穴带正电,它将吸引相邻原子中的价电子,相邻原子中的价电子挣脱原来共价键束缚填补空穴后,又出现新的空穴。当电子按某一方向填补空穴时,就象带正电荷的空穴按相反方向移动。从这意义上看,空穴和电子一样是载流子。

在本征半导体中,每形成一个自由电子,同时出现一个空穴,它们成对出现,这种现象称为**本征激发**。自由电子在运动过程中与空穴相遇时,如果它以一定的方式放出原来吸收的能量,就能填补这个空穴,这样,一对自由电子和空穴就消失了,这种现象称为**复合**。在一定温度下,单位时间内激发的载流子数和复合的载流子数处于相对平衡,载流子保持一定的浓度。温度升高,载流子浓度将按指数规律增加,因此温度对半导体性能的影响很大。

在本征半导体中,用扩散等工艺掺入少量合适的其它元素,导电性能就会得到显著改善。掺有其它元素的半导体,称为杂质半导体。杂质半导体一般分为两类:一类是在硅或锗单晶体中,掺入少量三价元素,如硼、铝、镓等。图 9-2 为纯净硅晶体中掺入硼后的晶体结构示意图。由于硼原子很少,所以整个晶体结构不会改变,只是某些位置上的硅原子被硼原子所代替。硼原子外层只有三个价电子,在与硅原子的价电子组成共价键时,将出现一个空穴。这个空穴很容易吸引附近的电子来填补,形成空穴导电。由于硼等原子起着接受电子的作用,所以称为**受主杂质**。具有受主杂质的半导体中的空穴浓度要比本征半导体中大许多倍,这就大大提高了导电能力。这种半导体中,空穴为多数载流子,电子为少数载流子,主要靠空穴导电,称为**空穴型半导体**。简称**P 型半导体**。

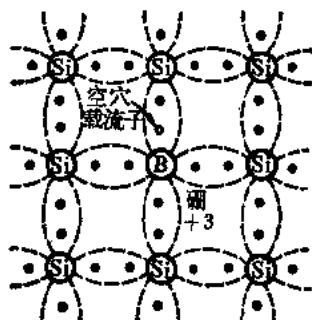


图 9-2 硅单晶体中掺硼形成空穴型(P型)半导体

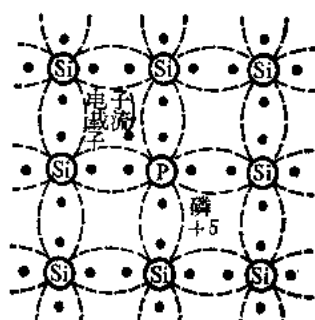


图 9-3 硅单晶体中掺磷形成电子型(N型)半导体

另一类是在硅或锗单晶体中,掺入少量五价元素,如磷、锑、砷等。图 9-3 为硅单晶体中掺入磷后的晶体结构示意图。一个磷原子外层有五个价电子,在晶体中替代硅原子的位置后,四个价电子与硅的价电子形成共价键,多出的一个价电子不受共价键的束缚,

当它得到较小能量时,就可以被激发成为自由电子。由于磷等原子在硅晶体中提供一个多余的电子,称为**施主杂质**。具有施主杂质的半导体中的自由电子浓度大大增高,这就加强了导电能力。这种半导体中,自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子,主要靠电子导电,称为**电子型半导体**,简称**N型半导体**。

P型半导体和N型半导体,虽然都有一种载流子为多数,但整个晶体仍是中性的,不带电的。它们是各种半导体器件的基本组成部分。

9-2 PN结及其单向导电性

单是一块P型或N型半导体,在电路中只能作为电阻用。如果将P型和N型半导体用不同的方式加以结合,就能构成各种不同特性的半导体器件。

一、PN结的形成

PN结是由P型和N型半导体相“结合”而形成的。所谓结合,并不是两种半导体简单的机械接触,而是利用掺杂方法,使一块P型(或N型)半导体的一部分形成N型(或P型)半导体,使晶体内部实现P型和N型半导体的结合。

当P型半导体和N型半导体结合在一起时,如图9-4所示,显然,交界面两边的载流子浓度相差很大。P区的空穴浓度远大于N区的空穴浓度,P区的空穴将向N区扩散;N区的电子浓度远大于P区的电子浓度,N区的电子将向P区扩散。这样,在P型和N型半导体交界面附近形成了电子和空穴的扩散运动。N区的电子扩散到P区以后,在N区留下了带正电的离子(图中用 $\oplus$ 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(图中用 $\ominus$ 表示)。由于扩散运动的结果,在P型和N型半导

体交界面附近形成了一层很薄的“空间电荷区”(也称为耗尽区或阻挡层),如图 9-5 所示。所谓 PN 结就是指这个区域。

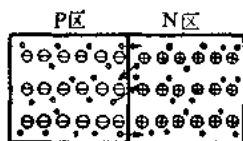


图 9-4 PN 结中载流子的扩散运动

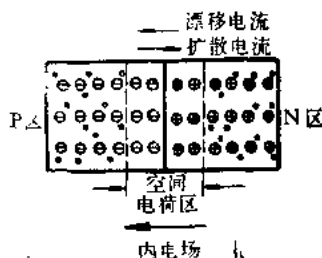


图 9-5 PN 结中的扩散与漂移运动

这层空间电荷区将产生一个电场,称为**内电场**。它的方向为从正电荷到负电荷,即由 N 区指向 P 区。显然,这个电场产生的电场力将阻止 P 区多数载流子(空穴)向 N 区扩散,并阻止 N 区多数载流子(电子)向 P 区扩散。同时,这个电场会使 P 区少数载流子(电子)向 N 区运动;N 区少数载流子(空穴)向 P 区运动。把载流子在电场力作用下的运动称为**漂移运动**,以区别于因浓度差而形成的扩散运动。

在开始的时候,扩散运动占优势,随着扩散的进行,PN 结(空间电荷区)逐渐加宽,内电场力愈来愈强,扩散运动急剧减弱,而漂移运动却愈来愈强。当扩散运动与漂移运动两种作用相等时,PN 结不再加宽,达到了暂时的平衡。由此可见,PN 结是**扩散运动与漂移运动平衡的结果**。

二、PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端加上不同的外加电压,就可以破坏原来的平衡,而呈现**单向导电**的性能。

当在 PN 结两端加上**正向电压**(又称为**正向偏置**)时,即在图 9-6(a)中电源 E 的正极接 P 侧,负极接 N 侧。此时电源 E 在 PN

结中产生的外电场与其内电场的方向相反,使空间电荷区变窄^①,从而削弱了内电场。于是扩散运动超过漂移运动,有利于扩散运动持续不断地进行。这样,PN 结两侧的多数载流子就能越过 PN 结而形成电流。这个电流从电源 E 的正极流出,经过 PN 结返回负极,称为正向电流。PN 结在正向偏置时,载流子能通畅地越过 PN 结,形成较大的电流,也即 PN 结处于导电(导通)状态。此时 PN 结呈现的电阻称为正向电阻,它的数值很小,一般为几欧~几百欧,甚至更小。

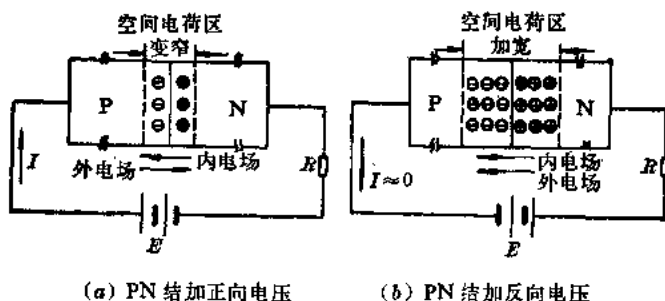


图 9-6 PN 结的单向导电性

当在 PN 结两端加上反向电压(又称为反向偏置)时,即在图 9-6(b)中电源 E 的正极接 N 侧,负极接 P 侧。此时外电场与内电场的方向相同,使空间电荷区加宽,加强了内电场。这样,载流子的扩散运动就很难进行。但是,由于电子的热运动在 N 区中产生的空穴,以及在 P 区中产生的电子,就会在内电场的作用下产生漂移运动形成漂移电流。因为这部分载流子是少数载流子,数量通常是很少的,所以在反向电压作用下形成的漂移电流,称为反向电流,也是很小的。因此,PN 结在反向偏置时,可以认为基本上不导电,

^① 当 PN 结加上正向电压时,外加电压驱使 P 区空穴向右运动, N 区电子向左运动。P 区中的空穴向右运动进入空间电荷区后,就与原来的负离子复合,而使空间电荷量减少;同样, N 区中的电子向左运动进入空间电荷区,与原来的正离子复合,也使得空间电荷量减少。空间电荷量的减少,使得空间电荷区变窄。

即 PN 结处于截止状态。此时的电阻称为反向电阻，它的数值很大，一般可达几千欧~十几兆欧。

由上述可见：PN 结在正向偏置时导电（导通），反向偏置时不导电（截止），即 PN 结具有“单向导电性”，这是 PN 结的一个重要特性。PN 结的导电方向是从 P 到 N。

当加在 PN 结两端的电压改变时，P 型和 N 型交界面上的空间电荷随着改变。这种现象与电容器充电的现象相似，说明 PN 结具有电容的性质。我们把 PN 结的这种电容效应，称为结电容。在低频时，结电容呈现的容抗很大，其作用可以忽略，高频时则不能忽略。

9-3 晶体二极管

一、晶体二极管的结构

晶体二极管（简称二极管）实际上就是由一个 PN 结加上电极引线 and 管壳构成。由 P 区引出的电极称为阳极，N 区引出的电极称为阴极。通常有以下几种类型：

1. 点接触型二极管 结构如图 9-7(a) 所示。它的特点是 PN 结的面积小，不能通过大的电流，但结电容小，因此，主要用于高频信号的检波与小电流的整流，也用作脉冲数字电路的开关元件。

2. 面接触型二极管 结构如图 9-7(b) 所示。由于其 PN 结的面积大，可以通过较大的电流（几百毫安至几百安），但结电容大，不能用于高频电路，主要用于低频电路和整流电路。

3. 硅平面开关管 它是用制造平面管的工艺制成的，结构如图 9-7(c) 所示。结面积较小的管子，结电容小，适用于脉冲数字电路中作开关管。结面积较大的管子，可通过较大电流，适用于大功率整流。

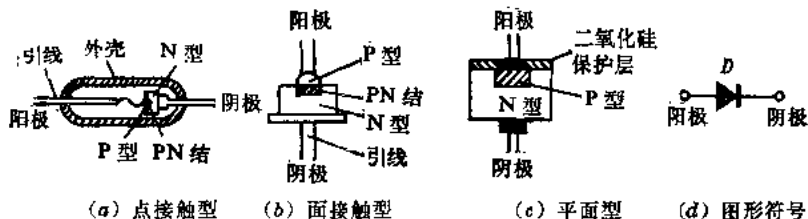


图 9-7 晶体二极管的结构示意图和图形符号

根据所用的半导体材料不同,晶体二极管有硅管和锗管之分。例如 2CP 型为硅二极管,2AP 型为锗二极管。

晶体二极管的图形符号如图 9-7(d)所示,三角箭头的方向表示其导电方向。

二、晶体二极管的伏安特性

晶体二极管的单向导电性,可以用它的伏安特性来描述。二极管的伏安特性就是加到二极管两端的电压和通过二极管电流的关系曲线。

二极管的伏安特性曲线如图 9-8 所示。由特性曲线可以看出,当二极管加以正向电压时,就产生正向电流。但是,当正向电压较小时,由于外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力,因此,这时的正向电流仍然很小,二极管呈现的

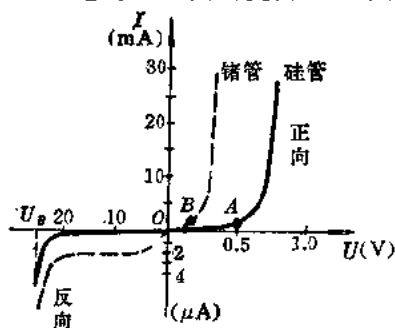


图 9-8 二极管的伏安特性曲线

电阻较大。这一段称为死区。硅管的死区电压约为 $0 \sim 0.5\text{V}$ (图中 OA) 之间, 锗管约为 $0 \sim 0.2\text{V}$ (图中 OB) 之间。当二极管两端的正向电压超过死区电压以后, 内电场被大大削弱, 二极管的电阻变得很小, 电流随电压的上升增长很快。二极管正向导通时的正向压降很小, 一般情况下, 硅管约为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$, 锗管约为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

当二极管加以反向电压时, 只能由少数载流子形成反向电流, 电流值很小。反向电流有两个特点: 第一个特点是它随温度的上升而增长很快; 另一个特点是只要反向电压在一定范围之内, 反向电流基本上不随反向电压变化。这是因为少数载流子数量很少, 在一定温度下于每个单位时间内, 只能提供一定的数量, 当外加电压所产生的电场足够把它们都吸引过来形成电流之后, 则电压即使再高 (在一定范围内) 也不会使载流子数目增加。正因为这样, 反向电流又常被称为反向饱和电流。通常硅二极管的反向电流可以做到纳安级 ($1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$), 锗二极管的反向电流可以做到微安级 ($1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$)。由于锗管的反向电流比硅管的大得多, 因此锗管受温度的影响比较明显。

当反向电压增加到一定数值时, 外电场产生的电场力大到足以把共价键中的价电子强行“拉出”, 成为自由电子, 这时载流子数目急剧上升, 造成反向电流的突然增大, 这种现象称为反向击穿, 此时的电压称为反向击穿电压 U_B 。二极管发生反向击穿后, 由于其反向电流突然增大, 可能导致 PN 结损坏。因此二极管工作时, 所加的反向电压值应小于其反向击穿电压。

三、晶体二极管的主要参数

半导体器件的质量指标, 常用它的参数来表示。在选择和使用半导体器件时, 首先应了解它的主要参数, 以便正确选用。

晶体二极管的主要参数如下:

(1) 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流是指二极管能够允许通过的最大正向平均电流值。它是由半导体材料和 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) 反向最大(峰值)工作电压 U_{RM}

半导体器件手册中给出的反向最大工作电压值通常比实际的反向击穿电压要小,例如 2CZ 型二极管,约为反向击穿电压的一半,这是为了防止二极管因反向击穿而损坏。

(3) 反向电流 I_R

反向电流是二极管质量指标之一。反向电流大,说明二极管的单向导电性能差,且受温度影响大。

此外,还有最高工作频率,极间(结)电容等参数。常用二极管的型号和参数,可参看本书附录。

由于晶体二极管具有单向导电性,因此在电子线路中常用来作为整流、检波和开关元件等。

9-4 单相整流电路

在生产和科学实践中,常需要应用直流电,例如蓄电池充电、电解、直流电动机的供电等,而在电子线路和设备中,一般需要稳定的直流电源。由于发电厂供给的是 50 Hz 的交流电,因此常应用整流器把交流电转换为直流电。整流器是利用整流元件的单向导电特性,将交流电加以整流成为单方向的脉动电流。

从所用交流电源的相数看,可把整流电路分为单相的和多相的整流电路;从流过负载的整流电流波形看,可把整流电路区分为半波的和全波的整流电路。为突出重点,简化分析,以下在讨论各整流电路时,除特殊说明外,一般认为负载为纯电阻性的,整流元件和变压器都是理想的——即认为整流元件的正向电阻为零,反