

电子电路

电信基础教研室编

北方交通大学

本教材主要介绍晶体管电路、晶体管脉冲电路的工作原理、计算和应用。并对常用电路介绍了一些设计方法。在晶体管电路的基础上，着重介绍了电子管的特点。为了熟悉对电子管电路的分析和正确使用电子管仪器，本教材还介绍了 *GB-9_B* 型毫伏表、*XFD-6* 型振荡器和 *SB-10* 型示波器。

本教材主要供给有线、信号两专业坦、赞留学生使用。

目 录

第一篇 晶体管电路

第一章 晶体二极管和三极管

第一节 半导体的导电性能	1
一、什么是半导体?	1
二、本征半导体	1
三、 P 型和 N 型半导体	2
第二节 $P-N$ 结的特性	3
一、 $P-N$ 结的形成	3
二、 $P-N$ 结的单向导电性	4
第三节 晶体二极管的特性和参数	5
一、晶体二极管的结构	5
二、晶体二极管的特性和参数	6
三、晶体二极管参数举例	6
第四节 晶体三极管的工作原理	7
一、晶体三极管的基本结构	7
二、晶体三极管的电流分配关系	7
第五节 晶体三极管的连接方法和特性曲线	10
一、晶体三极管的三种连接方法	10
二、共发射极电路的特性曲线	11
第六节 晶体三极管的主要参数	14
一、电流放大系数	14
二、反向饱和电流	15
三、极限参数	15
四、晶体管的频率特性参数	16
本章小结	16
思考题及习题	16
附录 晶体管命名法	17

第二章 低频小信号放大器

第一节 单管放大器	18
一、单管放大器的图解法	18
二、工作点的稳定	21
三、“ h ”等效电路	24
四、单管放大器等效电路法	28
五、单管放大器的设计	30
第二节 多级放大器	31
一、多级放大器的分析	32
二、多级放大器设计	39
第三节 放大器中的负反馈	42
一、负反馈的分类	42
二、负反馈对放大器性能的影响	45
三、单级负反馈放大器	48
四、射极输出器	54
五、二级反馈放大器及其设计	55
本章小结	60
习题	61
附录 电压并联单级负反馈放大器输出阻抗的推导	63

第三章 功率放大器

第一节 甲类功率放大器	64
一、工作原理	64
二、甲类功率放大器设计	66
三、功率放大器的工作状态	68
第二节 乙类推挽功率放大器	68
一、工作原理	68
二、乙类推挽功率放大器设计	72
第三节 功率放大器的非线性失真	76
第四节 无变压器功率放大器	79
一、无输出变压器电路	79
二、辅助对称电路	80
第五节 功率放大管的散热	84
本章小结	86

习题	86
----	----

第四章 小信号谐振放大器

第一节 并联谐振回路	89
一、简单谐振回路在谐振时的特性	90
二、一般谐振回路在谐振时的特性	91
三、谐振曲线	94
第二节 谐振放大器的基本分析方法	96
一、通频带和选择性	96
二、功率增益和阻抗匹配	102
第三节 设计举例	105
本章小结	110
习题	111
附录 公式(4-37)的推导	113

第五章 振荡器

第一节 LC 振荡器	114
一、从谐振放大器到 LC 振荡器	114
二、振荡的基本原理	114
三、几种晶体管 LC 振荡器	118
第二节 石英晶体振荡器	123
一、石英晶体的压电效应及其等效电路	123
二、石英晶体的稳频作用	125
三、石英晶体振荡器	125
第三节 RC 振荡器	126
一、 RC 相移型振荡器	127
二、 RC 桥型振荡器	129
本章小结	133
习题	133
附录 1 电感三点式振荡器自激条件的推导	134
附录 2 图 5-19(b) 所示 RC 相移型振荡器自激条件的推导	135
附录 3 提高晶体管输入阻抗的原理说明	135

第六章 直流放大器

第一节 直流放大器的特点	137
--------------	-----

一、级间耦合	137
二、零点漂移	138
第二节 分差放大器的工作原理	140
一、分差放大器的特点	141
二、分差放大器的分析	141
三、共模抑制	145
第三节 分差放大器的改进	146
一、恒流源	146
二、“对管”分差放大器	147
第四节 分差放大器的设计	147
一、单级分差放大器的设计	147
二、二级分差放大器的设计	151
本章小结	153
习题	153
附录 1 共发射极电路中发射极接有负反馈电阻 R_e 时, 电路参数的计算	154
附录 2 分差放大器电路参数的计算	156

第七章 电 源 设 备

第一节 整流及滤波电路	159
一、整流电路	159
二、滤波电路	163
第二节 晶体管稳压电源	170
一、稳压电源的工作原理	170
二、稳压电源的主要参数	172
三、稳压电源主要环节的分析	175
第三节 稳压电源的设计	181
第四节 稳压电源的实用电路	187
本章小结	187
习题	187

第八章 专用半导体器件

第一节 场效应晶体管	189
一、场效应管的基本导电规律	189
二、结型场效应管的特性和它的放大作用	190
三、绝缘栅场效应管	194

四、场效应管的主要参数和使用注意事项·····	196
五、场效应管放大器·····	197
第二节 可控硅·····	199
一、什么是可控硅·····	199
二、可控硅的工作原理·····	200
三、可控硅的型号、参数及使用注意事项·····	202
四、可控硅应用举例·····	203
第三节 单结晶体管·····	204
一、一般介绍·····	205
二、单结晶体管的工作原理及主要参数·····	206
三、单结晶体管的应用·····	208
第四节 隧道二极管·····	211
一、隧道二极管的伏安特性和主要参数·····	211
二、隧道二极管的应用·····	212
本章小结·····	215

第二篇 晶体管脉冲电路

第一章 基础知识

第一节 常用的脉冲信号及其主要参数·····	217
第二节 电阻电容电路·····	218
一、电容及其充放电过程·····	218
二、RC电路的应用·····	222
第三节 晶体管的开关特性·····	226
一、晶体管的三种工作状态·····	226
二、晶体管的开关时间·····	227
本章小结·····	228
习题·····	228

第二章 门 电 路

第一节 二极管门电路·····	230
第二节 三极管门电路·····	233
一、反相器(非门电路)·····	233
二、反相器的设计·····	234

三、电阻——三极管门电路·····	239
四、参考电路·····	240
本章小结·····	240
习题·····	240

第三章 双稳态触发电路

第一节 双稳态触发电路工作原理·····	243
第二节 触发方式·····	245
一、单端输入·····	245
二、计数输入·····	247
第三节 双稳态触发电路的设计·····	248
第四节 双稳态触发电路介绍·····	249
一、自给偏置的触发器·····	249
二、无偏置的触发器·····	250
第五节 双稳态触发电路的应用·····	250
一、二进制计数器·····	250
二、分频器·····	252
第六节 参考电路·····	254
本章小结·····	255
习题·····	255

第四章 单稳态触发电路

第一节 单稳态触发电路的工作原理·····	257
第二节 单稳态触发电路技术指标的分析·····	260
一、输出脉冲宽度·····	260
二、输出脉冲的幅度·····	261
第三节 单稳态触发电路设计·····	262
第四节 单稳态触发电路介绍·····	264
一、有偏压的单稳电路·····	264
二、射极耦合单稳电路·····	264
第五节 单稳态触发电路的应用·····	265
第六节 参考电路·····	267
本章小结·····	267
习题·····	268

第五章 多谐振荡器

第一节 多谐振荡器的工作原理	269
第二节 多谐振荡器工作周期的计算	271
第三节 多谐振荡器的设计	273
第四节 多谐振荡器电路介绍	275
一、改善输出脉冲上升边沿的多谐振荡器	275
二、防止因过饱和而引起停振的多谐振荡器	276
第五节 多谐振荡器的应用	276
第六节 参考电路	277
本章小结	278
习题	278

第三篇 电子管及仪器

第一章 电 子 管

第一节 电子管的结构	279
第二节 真空二极管	281
一、二极管的导电现象	281
二、空间电荷的作用	282
三、二极管的伏安特性和参量	283
第三节 三极管	284
一、三极管构造及工作原理	284
二、三极管的静态特性曲线	286
三、三极管基本放大电路的图解法	287
四、三极管的微变参量和等效阳极电路	291
五、三极管放大电路的等效电路解法	295
六、三极管的极间电容和放大器的输入阻抗	298
第四节 四极管、五极管和束射四极管	300
一、四极管	300
二、五极管	302
三、束射四极管	303
第五节 其他类型电子管	305
一、变 μ 管	305
二、复合电子管	306

第六节 电子管型号命名方法	306
本章小结	307
习题	308

第二章 放 大 器

第一节 阻容耦合电压放大器	310
一、基本电路及元件的作用	310
二、阻容耦合放大器的特性分析	311
三、频率失真和相位失真	314
四、放大器的通频带	315
第二节 低频功率放大器	316
一、单管甲类功率放大器	317
二、推挽功率放大器	321
本章小结	324
习题	324

第三章 GB-9_B 型电子管毫伏表

第一节 GB-9 _B 型电子管毫伏表的主要技术特性和方框图	327
一、主要技术特性	327
二、方框图	327
第二节 GB-9 _B 型电子管毫伏表的线路图及工作原理	328
一、电源电路	328
二、输入电路	331
三、放大器	332
四、检波器	333
第三节 GB-9 _B 型电子管毫伏表的使用及维修	334
一、使用前的准备工作	334
二、电压的测量	334
三、维修	334

第四章 XFD-6 型低频信号发生器

第一节 XFD-6 型低频信号发生器的主要技术特性和方框图	336
一、主要技术特性	336
二、方框图	336
第二节 XFD-6 型低频信号发生器的电路图及工作原理	337

一、RC 振荡器·····	337
二、阴极输出器·····	340
三、输出级·····	340
四、电源·····	341
第三节 仪器的使用与维修·····	341
一、仪器的使用·····	341
二、仪器的维修·····	342

第五章 SB-10 型阴极射线示波器

第一节 阴极射线示波管·····	343
第二节 SB-10 型阴极射线示波器的主要技术特性和方框图·····	346
一、主要技术特性·····	346
二、方框图·····	347
第三节 SB-10 型阴极射线示波器的线路及工作原理·····	348
一、Y 轴放大系统·····	348
二、X 轴放大系统·····	355
三、同步扫描系统·····	356
四、电源电路·····	362
第四节 SB-10 型示波器的使用和维修·····	363
一、使用方法·····	363
二、常见故障及检修·····	366

第一篇 晶体管电路

第一章 晶体二极管和三极管

晶体管电路中最关键的元件是晶体二极管和三极管。要掌握晶体管电路技术，就应该对晶体管的基本特性有所了解。

第一节 半导体的导电性能

一、什么是半导体？

大家都知道银、铜、铝、铁等金属都是很好的导电材料我们称它们为导体。而陶瓷、云母、橡皮、塑料等物质很难导电，我们称它们为绝缘体。有一类物质：如硅、锗等，它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，这就是半导体。

但是，半导体所以引起人们的极大兴趣，并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而在于它具有许多独特的性质。对同一半导体材料。它的导电能力在不同情况下会有非常大的差别，有时象良好的导体，有时又变成绝缘体。比如，在纯的锗半导体中掺入极微量的其他物质(叫做掺杂质)，它的导电性能将会有成千上万倍的增加，并且可以根据掺入杂质的多少来控制半导体的导电性能，人们正是根据半导体的这种独特性能做出了各种各样的晶体管器件。

二、本征半导体

不含有杂质的半导体叫做本征半导体，又称纯单晶半导体。

图 1-1 示出了本征半导体硅和锗的原子结构。它们的特点是最外层的电子都是四个。通常，原子的外层电子叫做价电子，有几个价电子就叫几价元素，所以硅和锗都是四价元素。

在硅、锗制成单晶体后，每个原子最外层的四个电子，不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的四个原子发生联结。这时，每两个相邻的原子之间都共有一对电子。电子对

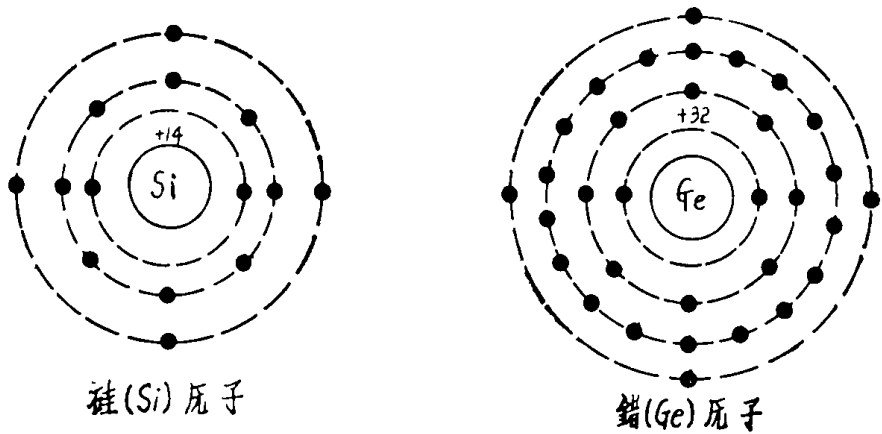
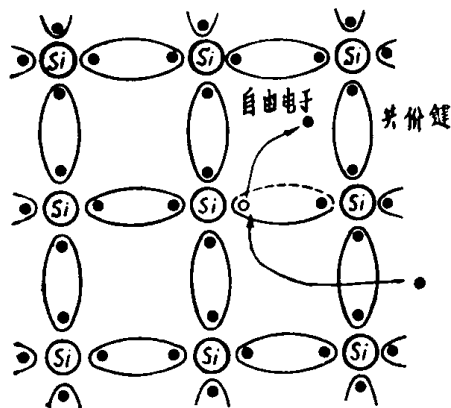


图 1-1

中的任何一个电子,一方面围绕自身原子核运动,另一方面也时常出现在相邻的原子所属的轨道上。这样的组合叫做共价键结构,如图 1-2 所示。



硅晶体的结构与电子
空穴对的产生

图 1-2

对于硅和锗的原子结构来说,当外层电子达到八个时就变成了比较稳定的状态。此时,外层电子受到较大束缚而不容易自由运动。但是,硅、锗单晶体中,由于八个电子成对地与周围原子所共有,所以它们所受到的束缚力并不象在绝缘体里那样紧,在一定温度下,由于热运动,其中少数电子还是可能挣脱束缚而成为自由电子,形成电子载流子。

值得注意的是:共有电子在挣脱束缚成为自由电子后,同时留下了一个空位,有了这样一个空位,附近的共有电子就很容易来进行填补,从而形成共有电子运动。这种运动无论是效果上还是现象上、都好像一个带正电荷的空位在移动。为了区别于自由电子的运动,就把这种运动叫做“空穴”运动,空位子叫做“空穴”。由此可见,空穴也是一种载流子。当半导体处于外加电压作用之下,自由电子进行定向运动形成电子流,共有电子依次递补空穴形成空穴电流。它们的区别是,电子电流是带负电的电子的定向运动,而空穴电流是带正电的空穴的定向运动。所以,在半导体中,不仅有电子载流子,而且还有空穴载流子,这是半导体导电的一个重要特性。

半导体因为热运动而不断产生自由电子,同时则出现相应数量的空穴。因此,电子和空穴总是相伴而生、成对出现的,我们称之为电子——空穴对。另一方面自由电子在运动中又会与空穴重新结合而消失,这是一个相反的过程,我们叫做“复合”。电子——空穴对又产生,又复合,这就是半导体在一定温度下达到相对的平衡;这时虽然产生和复合过程不断地在进行,但电子——空穴对却始终维持在一定的数目。

三、P 型和N型半导体

上面分析的是本征半导体,在这种半导体里,虽然多了一种空穴载流子,但是,载流子的总数离开实际应用的要求,也就是从良好导电能力的要求来看,还相差很远,所以它本身用处不大。

如果在本征半导体中掺入有用的杂质,就可使它导电特性大大改善,因而获得重大的用途。例如在本征半导体硅中掺入少量的硼,就使半导体中空穴载流子的数目剧增,导电性能大大增强。

半导体所具有的这个重要特性,仍然是由其内部结构——共价键所决定的。

观察图 1-3(a),在硅单晶中掺入少量的硼,这时掺入的硼原子就与硅原子组成共价键结构。由于硼原子数目比硅原子要少得多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上的硅原子被硼原子所代替了。我们知道硼是三价元素,即外层只有三个电子,所以当它与硅原子组成共价键时,就自然形成了一个空穴。这样,掺入的硼杂质的每一个原子都可能提供一

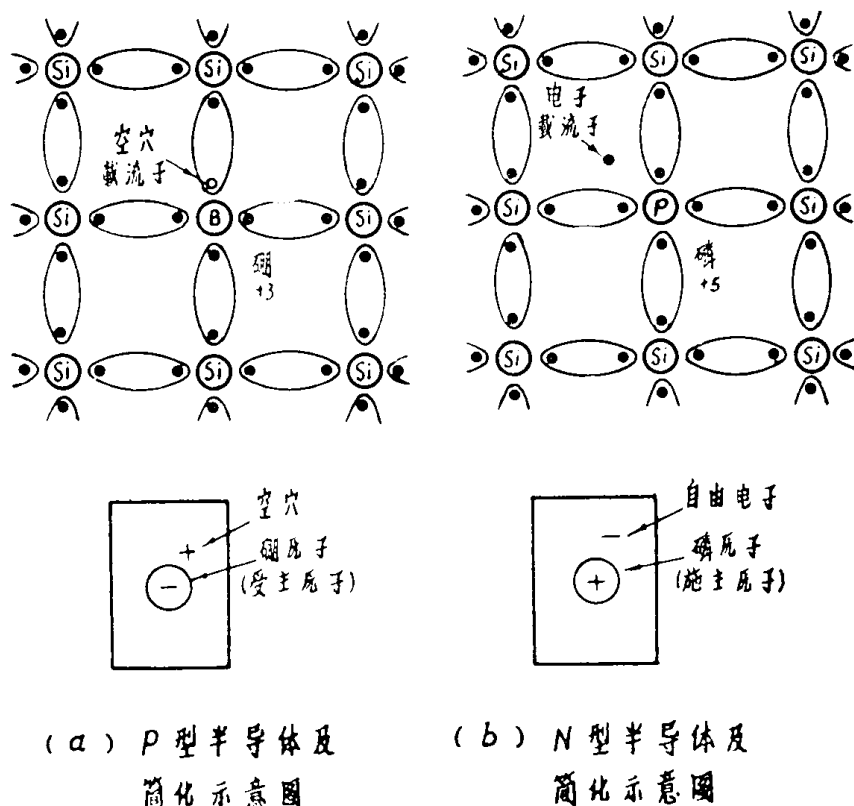


图 1-3

个空穴,从而使硅单晶中空穴载流子的数目大大增加。这种半导体内几乎没有自由电子,主要靠空穴导电,所以叫做空穴半导体,简称P型半导体。

如果在硅单晶中掺入的是磷、锑等五价元素,那么情况就又不一样了。硅原子和磷原子组成共价键之后,磷外层的五个电子中,四个电子组成共价键,多出的一个电子受原子核束缚很小,因此很容易成为自由电子。所以,这种半导体中,电子载流子的数目很多,主要靠电子导电,被称为电子半导体,简称N型半导体,如图1-3(b)所示。

实际上,半导体中经常是既有P型杂质,又有N型杂质,那种杂质的浓度大,就由那种杂质决定其导电类型。这两种半导体的简化示意图如图1-3所示。

第二节 P-N 结的特性

如果把P型半导体和N型半导体联结起来,使之共存于同一半导体中,那么在两者交界处就会形成P-N结。P-N结是构成二极管、三极管、固体组件、可控硅等多种半导体器件的基础,因此对P-N结的特性一定要有较深入的了解。

一、P-N 结的形成

当P型半导体和N型半导体联结在一起共处一体时(图1-4),在它们的交界面的地方便要发生电子和空穴的扩散运动。由于P区有大量的可以移动的空穴,N区几乎没有空穴,空穴就要由P区向N区扩散。同样,N区有大量自由电子,P区几乎没有电子,所以电子就要由N区向P区扩散。随着扩散的进行,P区空穴减少,出现了一层带负电的粒子区(图中用 $\ominus$

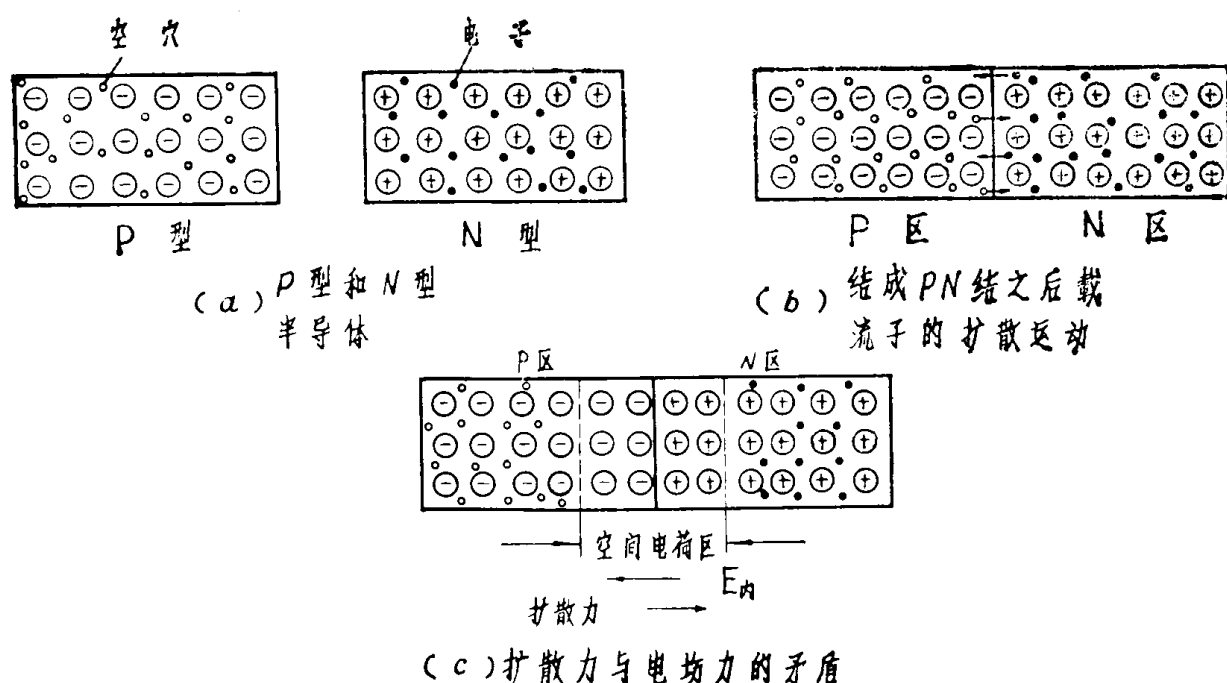


图 1-4

表示); N 区电子减少, 出现了一层带正电的粒子区(图中用 $\oplus$ 表示)。从而在 $P-N$ 结的边界附近形成一个空间电荷区, 它的左边带负电, 右边带正电, 因此在 $P-N$ 结里产生一个电场力 $E_{\text{内}}$, 其方向如图 1-4(C)所示, 恰好与载流子扩散力的方向相反。这样, 带电的空穴继续向 N 区扩散就要受到电场 $E_{\text{内}}$ 的阻力。同样, 自由电子向 P 区扩散也要受到电场的阻力。但是, 在扩散开始的时候, 扩散力大于电场力, 因此扩散接连不断地进行。随着扩散的进行, $P-N$ 结电荷区不断加深, 电场力不断增强, 当电场力等于扩散力的时候, 就达到了相对的平衡。

在 P 型和 N 型半导体交界面形成的那一正负空间电荷层叫做阻挡层, 又叫做 $P-N$ 结。

二、 $P-N$ 结的单向导电性

在了解过 $P-N$ 结的特性后, 就不难理解 $P-N$ 结在不同的外界条件下, 所反映出来的单向导电特性。

1. 正向连接时, 阻挡层变窄

当正向连接时, 如图 1-5(a)所示, 外加电源所产生的外加电场 $E_{\text{外}}$ 与内电场 $E_{\text{内}}$ 方向相

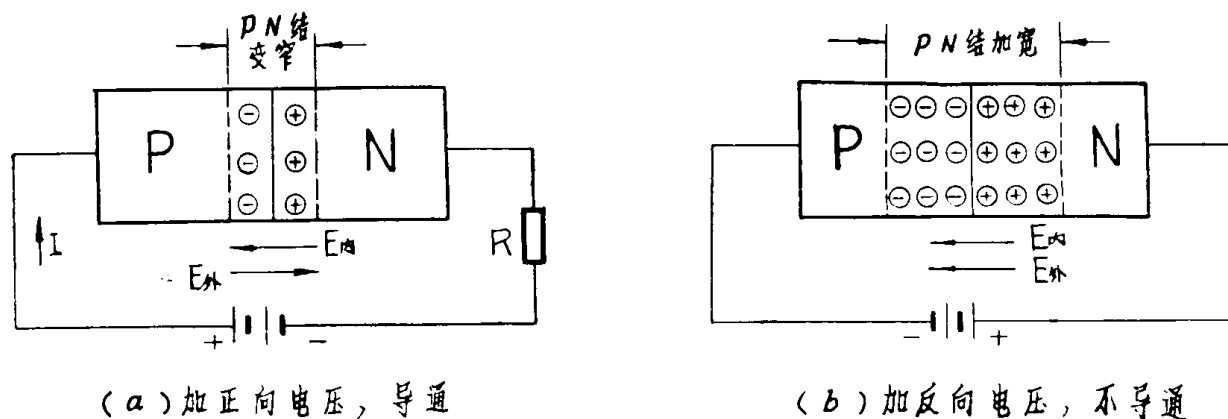


图 1-5

反, 外加电场 $E_{外}$ 削弱了内电场 $E_{内}$, 使阻挡层变窄。这样一来, 大大有利于扩散运动, 于是多数载流子 (P 型半导体为空穴, N 型半导体为电子) 在外加电场作用下将顺利通过阻挡层 (即 $P-N$ 结电阻很小), 电路内出现很大电流, 叫做正向电流。

2. 反向连接时, 阻挡层加宽

当 $P-N$ 结反向连接时, 如图 1-5(b) 所示, 外加电源所产生的外加电场 $E_{外}$ 与内电场 $E_{内}$ 方向一致, 外加电场加强了内电场, 因此使阻挡层加宽。这样一来, 扩散无法进行, 于是多数载流子受阻挡层阻止无法流动。但是 P 型半导体中的少数载流子 (电子) 和 N 型半导体中的少数载流子 (空穴) 将受外加电场作用通过外电路, 电路中出现微小的电流, 叫做反向电流。所以说 $P-N$ 结外加反向电压时, 它的电阻很大, 基本上不导电。

P 区中极少量的电子和 N 区中极少量的空穴都是由热运动产生的, 所以 $P-N$ 结的反向电流随温度变化是很大的。

第三节 晶体二极管的特性和参数

一、晶体二极管的结构

二极管就是由一个 $P-N$ 结, 加上相应的电极引线和管壳做成的。通常采用符号  来表示。

图 1-6 里画出了几种二极管结构示意图。

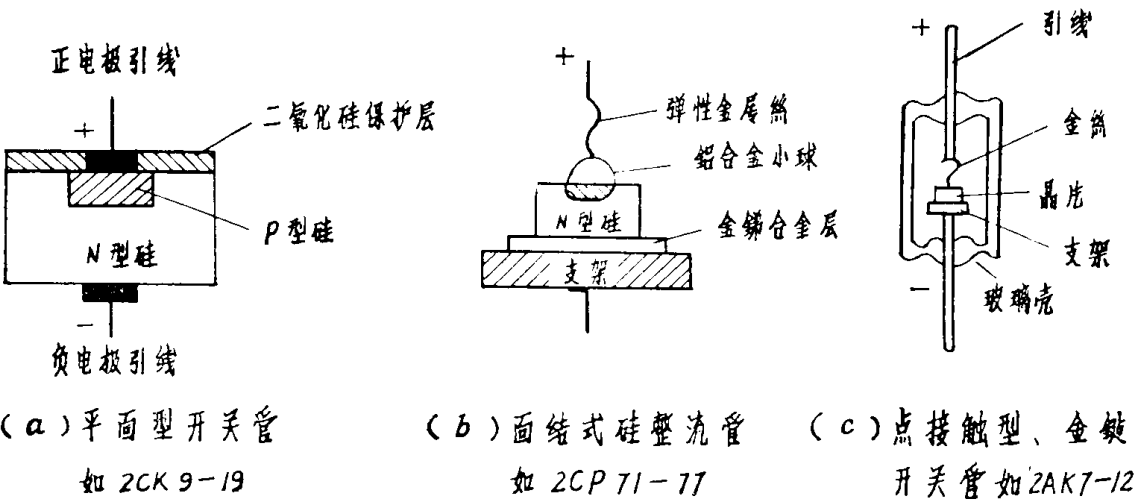


图 1-6

对于图 1-6(a) 这种平面型二极管, 先在 N 型硅片上的氧化膜上, 用光刻的方法刻出一个窗口, 然后进行高浓度的硼扩散, 获得 P 型硅。这样, 在 N 型硅和 P 型硅之间就形成了 $P-N$ 结。表面一层二氧化硅薄膜, 起着保护层的作用, 保护 $P-N$ 结表面的清洁。最后, 再做出相应的电极引线, 并加以密封, 就完成了二极管的制造。

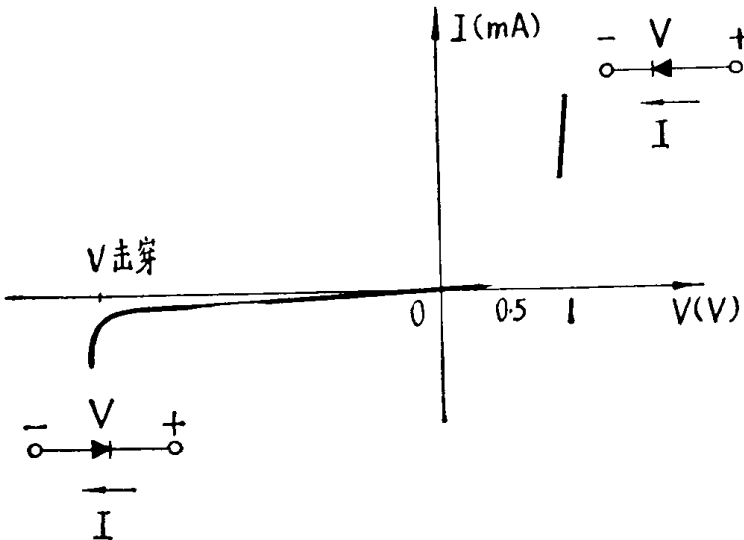
一般, 二极管的 $P-N$ 结面积大时, 允许通过的电流也大, 适用于做大功率整流器; 而 $P-N$ 结表面积越小, 动态特性越好, 适合于做高频检波和计算机里的开关元件。

二、晶体二极管的特性和参数

二极管最主要的特性就是单向导电特性，这可以通过研究二极管的电压与电流的关系（即伏安特性曲线）得到进一步的认识。

1. 正向特性

当二极管正极加上正电压、负极接上负电压时，就产生正向电流。但是，当电压 V 比较



小的时候（硅管小于 $0.6V$ 左右，锗管小于 $0.3V$ 左右），由于外部电场还不足以克服内部电场 $E_{内}$ 对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，二极管呈现的电阻较大。当外加电压 V 加大到使内部电场 $E_{内}$ 大大被减弱时，二极管的电阻变得很小，电流于是增长很快。

二极管的最大整流电流是二极管的一个重要参数，使用时应注意通过二极管的电流不能大于这个最大

图 1-7

值，否则将导致二极管的损坏。二极管这一部分伏安特性叫做正向特性。

2. 反向特性

外加反向电压时，二极管的反向电阻很大，反向电流几乎为零，但考虑到分子的热运动，在 P 型半导体中还存在着少数自由电子，在 N 型半导体中也还存在着少数空穴，这些少数载流子在反向电压作用下，很容易通过 $P-N$ 结，形成反向电流。一般，硅管的反向电流为几微安到几十微安，而锗管的反向电流可达几百微安。

随着环境温度升高，热运动加剧，少数载流子增多，因此反向电流将增大。

反向电流是二极管另一个重要参数。反向电流大，表明管子的特性差。

3. 反向击穿电压

当反向电压不断增加时，开始反向电流没有多大变化，因为在一定温度下，少数载流子的数目总是有限的。当反向电压增加到一定程度时，反向电流突然剧增，出现反向击穿现象。其原因是外加的强电场强制地把外层电子拉出，使载流子数目剧增，这个电压叫做反向击穿电压。

手册上给出的最高反向工作电压，就是为了防止二极管因反向击穿而损坏，选用时必须注意到这个极限值。

三、晶体二极管参数举例：