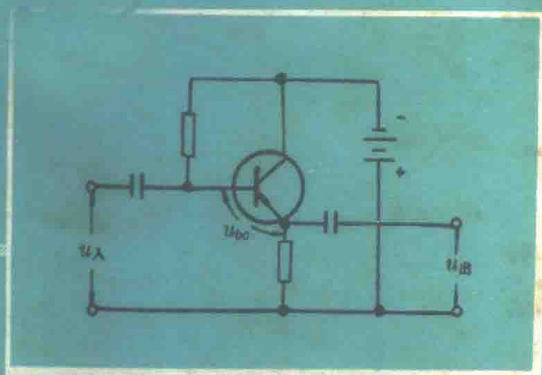


晶体管电路原理

上海市徐汇区工人文化科技馆
上海交通大学教育革命实践队

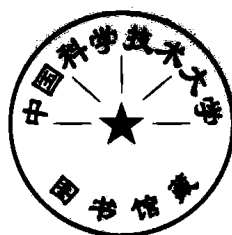
编



上海科学技术情报研究所

晶体管电路原理

上海市徐汇区工人文化科技馆 编
上海交通大学教育革命实践队



上海科学技术情报研究所

1971

晶体管电路原理

上海市徐汇区工人文化科技馆 编
上海交通大学教育革命实践队

*

上海科学技术情报研究所出版

上海书店发行

上海东方红印刷厂印刷

*

1971年8月出版

代号: 1634025 定价: 0.70元

(只限国内发行)

毛主席语录

备战、备荒、为人民。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

内 容 简 介

本书为晶体管电路普及读物,内容包括:单相整流电路,低频放大电路,调谐放大器,直流放大器和直流稳压电源,振荡、调制、变频和检波,脉冲电路等六章。书中着重介绍了上述电路的工作原理,并选有应用实例和经验数据,可供生产中参考。

前 言

在毛主席关于“独立自主、自力更生”“备战、备荒、为人民”伟大方针的指引下，我国的电子工业得到了迅速的发展。

早在大跃进的一九五八年，广大革命工人和革命技术人员，破除迷信，解放思想，掀起了群众性的技术革新、技术革命运动，电子工业呈现了一派欣欣向荣的景象，并开始有了自己的半导体电子工业。但是，刘少奇一伙竭力推行“洋奴哲学”“爬行主义”“专家治厂”等一整套反革命修正主义路线，把正在蓬勃兴起的半导体电子工业群众运动扼杀下去，另一方面，却从国外引进一批业已淘汰了的晶体管产品，由“专家”“权威”关起门来仿造，严重阻碍了我国半导体电子工业的发展。

毛主席亲自发动和领导的无产阶级文化大革命，摧毁了刘少奇的资产阶级司令部，工人阶级登上了领导上层建筑斗批改的政治舞台，广大工农兵群众狠批了刘少奇一类政治骗子的唯心论的“先验论”和反动的“唯生产力论”等修正主义黑货，使我国的半导体电子工业获得了新生。当前，一场半导体电子工业的人民战争已在全国范围内开展起来，赶超世界先进水平的半导体产品不断涌现，不要很长时间，我国的半导体电子工业定能赶上并超过世界先进水平。

为了适应半导体电子工业的飞速发展，大力普及电子技术，徐汇区工人文化科技馆和上海交通大学教育革命实践队联合举办了“工人电子技术普及学习班”，为了满足广大工农兵的需要，我们在该学习班教材的基础上，修改编写而成这本“晶体管电路原理”。在编写这本书的过程中，得到了有关工厂和工人同志的

大力支持和帮助,在此,我们表示衷心的感谢。

由于编写时间比较仓促,特别是我们对毛主席著作学得不够好,本书有不当和错误之处,请读者批评指正。

上海市徐汇区工人文化科技馆
上海交通大学教育革命实践队
一九七一年八月

目 录

1. 单相整流电路	1
1-1 半导体的基本知识	1
1-2 半导体二极管	9
1-3 单相整流电路	13
1-4 电源滤波器	27
1-5 整流变压器的简单计算	32
1-6 整流器应用实例	39
2. 晶体管低频放大电路	44
2-1 晶体三极管及其放大原理	45
2-2 晶体管低频放大器的分析方法	65
2-3 直流偏置稳定电路	82
2-4 低频前置放大器	92
2-5 晶体管反馈放大器	110
2-6 功率放大器	117
2-7 低频放大电路设计举例	132
3. 晶体管直流放大器与直流稳压电源	147
3-1 直流放大器	147
3-2 相敏检波器与相敏放大器	155
3-3 晶体管直流稳压电源	162
4. 调谐放大器	180
4-1 晶体管高频特性	180
4-2 LC 谐振回路	184

4-3 调谐放大电路	195
4-4 中和电路	197
4-5 耦合回路的计算	200
5. 振荡、调制、变频和检波	206
5-1 振荡原理	206
5-2 <i>LC</i> 振荡器	210
5-3 <i>LC</i> 振荡器的频率稳定度	214
5-3 <i>LC</i> 振荡器的简单设计方法	215
5-5 晶体振荡器	216
5-6 调制	221
5-7 变频	227
5-8 检波	232
6. 脉冲电路	237
6-1 脉冲的基本概念	237
6-2 微分电路	245
6-3 限幅器	250
6-4 反相器	256
6-5 双稳态触发器	272
6-6 单稳触发器	291
6-7 自激多谐振荡器	301
6-8 射极耦合触发电路	308
6-9 间歇振荡器	318
6-10 锯齿波形成电路	331
6-11 门电路	345

第一章 单相整流电路

1-1 半导体的基本知识

一、什么叫半导体

大家熟悉的银、铜、铝等金属是很好的导电材料(即电阻率很小,约为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 欧·厘米),称为导体。橡胶、塑料、陶瓷等东西很难通过电流(即电阻率很大,约为 $10^8 \sim 10^{20}$ 欧·厘米),称为绝缘体。除了这两类物体外,自然界中还存在一种导电性能介于导体与绝缘体之间的物质(电阻率约为 $10^{-3} \sim 10^3$ 欧·厘米),这就是半导体。半导体材料的种类很多,如锗、硅以及大多数的金属氧化物(如氧化亚铜)和硫化物等。我们常用的半导体材料有锗(Ge)和硅(Si)。在室温下(25°C),纯锗的电阻率为 47 欧·厘米,纯硅是 66,600 欧·厘米。

由于半导体的电阻率处于导体和绝缘体之间,“这种特殊的矛盾,就构成一事物区别于他事物的特殊的本质。”正因为半导体具有许多特性,所以获得了广泛的应用。半导体的特点是:

1. 半导体的导电性(电阻率)受温度的影响很大,温度每升高 1°C , 它的电阻率下降可达百分之几十,即导电性能大大加强。热敏电阻就是利用这一特性制成的。

2. 半导体电阻率与所掺杂质有很大的关系,以锗为例,纯锗中掺了千万分之一的杂质,电阻率就下降到原来的 $1/16$ 。利用这点,可以大大改善半导体的导电性能,制成二极管、三极管、可控硅等半导体器件。

3. 光线照射会使半导体的电阻率降低,利用这一特性制成光电二极管、光敏电阻等。这些元件广泛地应用在自动控制电路中。

二、半导体是如何导电的

毛主席教导我们:“我们看事情必须要看它的实质,而把它的现象只看作入门的向导,一进了门就要抓住它的实质,这才是可靠的科学的分析方法。”

在纯净的半导体中,导电性是比较差的,但是如果掺入一定的杂质,则导电性能就大大增加。下面以目前最常用的半导体材料锗(Ge)为例加以说明。

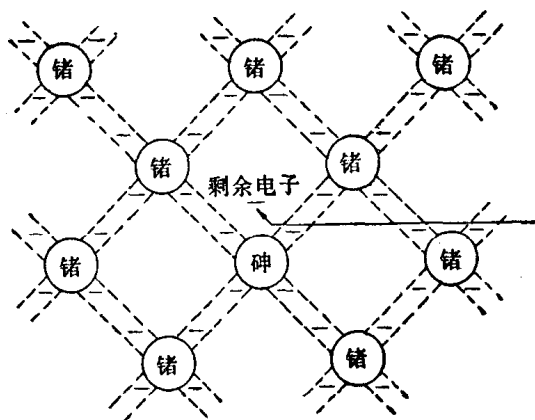
我们知道,物质由分子组成,分子由原子构成,原子又包括原子核和围绕核运动的电子。原子核带正电荷,电子带负电荷,核外的电子是有规则地分层排列的。外层(指最外面的一层)电子数为一到八,外层电子数越少,电子就越容易被激发出来,电子数越多,原子核就越要拉别的电子过来。当外层电子数目满了八个之后就饱和了。一般半导体外层电子(称为价电子)的数目是四到六个。

锗(或硅)的外层电子数是四个,如果在锗(或硅)中掺入少量外层电子数为五的砷或锑(V族元素),原子结构就起了变化。实验表明,砷原子跑到锗(或硅)里面去,它要抢占一个原来是锗(或硅)原子所占据的位置,成为一个替位式的杂质。

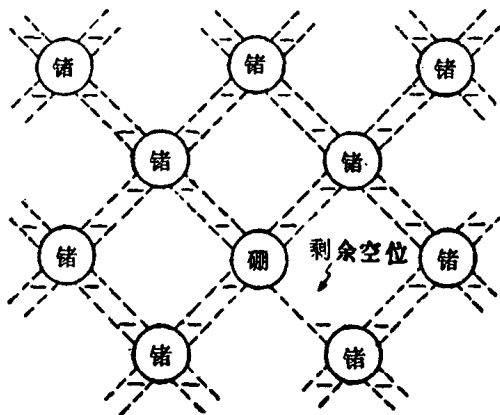
砷原子有五个外层电子,它和周围的锗(或硅)原子进行共价键结合时,只要拿出四个价电子同四个相邻原子共用就够了,见图1-1(a)。因为每个原子核的周围有八个电子就饱和了,还多出一个电子,这个多余的电子虽然没有被束缚在价键里面,但仍旧受到砷原子核的正电荷的吸引。不过,这种吸引作用终究要比价键的束缚作用弱得多,只要很少的能量就可以使它挣脱

这种吸引而成为自由电子(砷原子本身则变成一个带正电荷的离子,因为它少掉了一个电子。这种离子称为施主离子)。这些自由电子在外电场的作用下,就能参加导电,形成电流。这种锗(或硅)就叫做 N 型锗(或硅)。

如果在锗(或硅)中掺入少量外层电子数为三的硼、镓或铟



(a)



(b)

图 1-1

(III 族元素), 就成了 P 型半导体。硼在锗(或硅)中也是替位式杂质, 但硼外层只有三个电子, 它同四个邻居(锗或硅原子)共价结合时, 只能完成三个完整的共价键, 在第四个价键上缺少一个电子, 也就是出现了一个空位见图 1-1(b)。当别处锗(或硅)原子价键中的电子过来填补这个空位时, 就在锗(或硅)中产生了一个空穴(硼原子本身则由于接受了一个电子而成为带负电的硼离子, 这种离子称为受主离子), 在外电场的作用下, 这些空穴就移动而形成空穴电流。空穴流动的方向和电子的流动方向相反。

总之, 半导体就是依靠掺入不同的杂质形成 N 型或 P 型半导体而导电的。

三、 $P-N$ 结及其导电性

我们已经知道, P 型半导体内空穴的浓度大, 而 N 型半导体内电子的浓度大, 见图 1-2。在图中, 用符号“ $\circ$ ”来表示空穴, 用“ $\cdot$ ”来表示电子。因为空穴流动方向与电子的流动方向相反, 故空穴的流动可以看成是正电荷的流动。试问两者接触之后会产生什么现象呢? 先让我们从日常的简单现象来看。一滴黑墨水能把一杯清水染黑, 这是墨水向周围清水扩散的结果。扩散的规律就是从浓度大的地方向浓度小的地方扩散。我们如果把 P 型与 N 型半导体联接在一起(不是简单的机械联接)也会产生扩散现象。 N 区的电子就向 P 区扩散。在 $P-N$ 区的交界处, 薄层 I 内因失去电子而带正电。另一方面, P 区的空穴也会向 N 区扩散, 结果一部分空穴从薄层 II 向 N 区扩散, 使薄层 II 带负电, 如图 1-3 所示。电子和空穴的扩散是同时进行的。随着扩散的继续进行, 薄层逐渐变厚, 所带的电量也逐渐增加。但扩散不能无休止地进行。因为在扩散时, 首先是靠近 $P-N$ 界面附近的电子从 N 区跑到 P 区, 留下一些带正电的施主离子。

空穴则从 P 区跑到 N 区, 留下一些带负电的受主离子, 这些离子组成了空间电荷。图 1-3 中画出了这样的情形。在 $P-N$ 交界面的两侧就有一个空间电荷区。既然在这个区域中有未被抵消的正电荷和负电荷, 它们就要产生一个电场。电场的方向是从正电荷指向负电荷。在空间电荷区两旁的 P 区和 N 区中, 因为不存在空间电荷, 所以不存在电场。

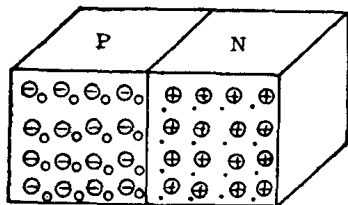


图 1-2

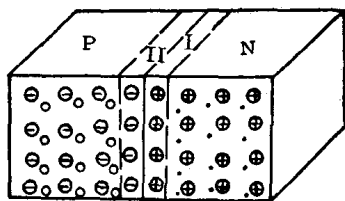


图 1-3

空间电荷是电子和空穴扩散造成的, 而它反过来又阻碍了电子和空穴的继续扩散。这是因为电子和空穴进入空间电荷区后要受到电场力的作用。电子是带负电的, 受到一个和电场方向相反的力, 这个力的作用要把它拉回到 N 区。空穴是带正电的, 受到和电场方向相同的力, 要被拉回 P 区。电场的这种作用叫做漂移作用。所以现在电子和空穴的运动受到两种作用的影响: 一种是由于浓度梯度而产生的扩散作用, 另一种是空间电荷区电场所产生的漂移作用。扩散作用要使电子从 N 区向 P 区跑, 空穴从 P 区向 N 区跑, 而漂移作用则要电子回到 N 区, 空穴回到 P 区。

开始时, 空间电荷区还没有, 电子和空穴主要是进行扩散。随着扩散过去的电子和空穴数目的增加, 空间电荷也逐渐增多, 空间电荷区变厚, 其中的电场越来越强, 电场的漂移作用逐步增强到可以和扩散作用相对抗。就是说, 到了最后, 从 N 区向 P 区扩散过去多少电子的话, 同时就有同样数目的电子被电场拉回到

N 区去,空穴也是一样。这时,扩散作用和漂移作用互相平衡, P 区和 N 区的空穴和电子(称为载流子)浓度不再变化,达到了动态的平衡,形成了 $P-N$ 结。因此 $P-N$ 结是薄层 I 区和 II 区组成的带电结构,它能阻止电子和空穴的继续扩散,所以也叫阻挡层。

这样,我们就弄清了, $P-N$ 结达到平衡时, N 区仍有很多自由电子, P 区仍有很多自由空穴,中间夹了一个带电结构——空间电荷区。这个空间电荷区,除了别名阻挡层外,有时也叫做势垒区或耗尽层。为什么又叫耗尽层呢?因为在一般室温下,这一层中的电子和空穴差不多都已跑到对方去了,只剩下一些不能移动的带电的杂质离子。

现在我们再来看一下上述扩散形成的 $P-N$ 结有什么特点。

如果在 $P-N$ 结上加一个如图 1-4 所示的正向直流电压(所

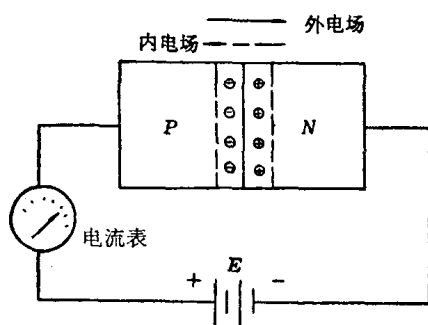


图 1-4

谓正向,就是 P 区接正极, N 区接负极),这时,会发生什么情况呢?因为 $P-N$ 结阻挡层是一个耗尽层,它里面的自由载流子极少,所以它的电阻比起 P 区和 N 区来要高得多,等于一个大电阻,因而外加电压差不多全都降落在 $P-N$

结阻挡层的两端。就是说,外加电压在 $P-N$ 结阻挡层上产生了一个外电场,这个电场方向是从 P 指向 N 。它和 $P-N$ 结的内电场(即空间电荷所建立的电场)的方向相反,削弱了阻挡层中电场的强度。阻挡层电场的减弱会产生两个影响:1. 电场减弱,说明阻挡层里面的空间电荷数量比原来的少了,所以阻挡层变薄了;2. 电场减弱,说明 P 区和 N 区的势垒减少了,也就是说,

P 区的空穴和 N 区的电子各自向对方运动 (扩散) 的阻挡力小了。 P - N 结的平衡状态, 是扩散作用和漂移作用相抵消的结果。当有了外加正向电压时, 阻挡层电场减弱了, 这时漂移作用就不能和扩散作用相对抗, 扩散占了优势, 于是就又有一部分电子从 N 区扩散到 P 区, 一部分空穴从 P 区扩散到 N 区去。

所以, 在正向电压的作用下, 发生了载流子的流动, 流动的全过程是这样: 电子从电源的负极流进 N 区, 到达阻挡层边界, “爬”过势垒所形成的“高坡”, 进入 P 区, 从 P 区的边界向内部扩散, 在扩散过程中少部分与空穴复合, 大部分流到电池正极。这样, 电子连绵不断地流动, 就构成了正向电流, 但是, 习惯上所采用的电流方向和电子流动的方向相反, 也就是说习惯上认为正向电流的方向是从 P 区流向 N 区。

正向电压愈大, 阻挡层的电场就愈弱, 扩散就愈容易, 注入 P 区的电子就愈多, 电流也就随之而迅速上升。此时, P - N 结的电阻值很小, 接近于短路。

不过要注意, 电子在从 N 区越过阻挡层时, 在阻挡层里也有一部分要复合掉, 这部分也应当包括在正向电流里面。所以, 整个正向电流应当包括两部分: 扩散电流和势垒复合电流 (即阻挡层复合电流)。因为阻挡层宽度只有 1 微米不到, 所以复合电流所占的比例很小。

如果在 P - N 结上接上反向电压。所谓反向电压, 就是 P 区接负极, N 区接正极, 如图 1-5 所示。接反向电压时, 外加电压在阻挡层上产生的电场和内电场的方向是一致的, 也就是说, 外加

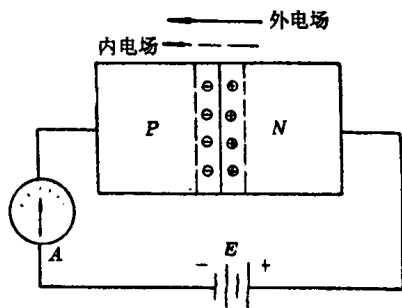


图 1-5

反向电压加强了阻挡层的电场。

电场的增加,破坏了扩散作用和漂移作用的平衡,现在是漂移作用压倒了扩散作用。这就是说, P 区的空穴不能扩散入 N 区, N 区的电子不能扩散入 P 区,几乎没有正向电流,可是,即使在常温下,由于热运动的结果, P 型和 N 型区中总会有一定数量的电子从共价键中挣脱出来而产生电子空穴对。也就是说, P 型区中总会有少量的电子, N 型中总会有少量空穴存在,在外电场的作用下, P 区的少数载流子(电子)从 P 区流到 N 区, N 区的少数载流子(空穴)从 N 区流到 P 区而形成反向电流。但是,少数载流子的数目很少(只与温度有关),所以反向电压不会引起大量载流子的流动。在反向电压只有零点几伏时,反向电流就达到饱和而不再增加了。 $P-N$ 结在加反向电压时,整个 $P-N$ 结就象一个很大的电阻。在谈到反向电流时,我们不能忘记阻挡层。因为在一定温度下,阻挡层里可以靠热激发而产生许多电子空穴对(本征激发),这些电子空穴对一产生出来,就被电场拉走,电子拉向 N 区,空穴拉向 P 区,拉走以后,又会产生。这部分电流叫做势垒产生电流(即阻挡层产生电流)。对于硅 $P-N$ 结来说,它是反向电流的主要部分,不过总的说来它还是很小的,因为本征激发的载流子浓度比起 N 区的电子或 P 区的空穴来说,要少得多。

关于反向电流,还有一点要提一提的。从以上的介绍中,我们认为引起反向电流的原因主要是有电子空穴对产生。事实上,在半导体材料表面总有一些金属离子、水汽分子等的沾污。这些沾污的离子,可以直接参与导电,使漏电流从 N 区的电极,沿着半导体材料表面,直接流到 P 区电极去。这种表面漏电流往往会比上述电流大得多,成为反向电流中的主要成分。除了上述表面漏电电流外,原材料中所掺杂质的不均匀、工艺上的