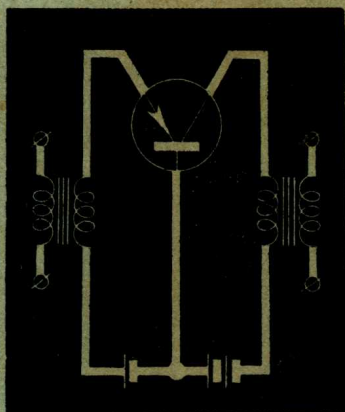


晶体三极管

苏联 Я. А. 费多托夫 著

湯步和 欧阳平 译



人民邮电出版社

112
257

无线电
小书
丛书

晶 体 三 极 管

苏联 Я. А. 费多托夫 著

湯步和 欧阳平 译

人民邮电出版社

1962

13182

Я.А.ФЕДОТОВ

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРИОДЫ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1955

內 容 提 要

本书敘述了晶体三极管的物理基础和工作原理，指出了它的应用范围，并且討論了晶体三极管的无綫电技术电路。

晶 体 三 极 管

著 者：苏联 Я. А. 費 多 托 夫

譯 者：湯 步 和 歐 阳 平

出版者：人 民 郵 電 出 版 社

北京東四 6 條 13 號

(北京市書刊出版業營業登記證出字第 048 號)

印刷者：郵 電 部 北 京 郵 票 廠

發行者：新 華 書 店

開本 787×1092 1/32

印張 3 頁數 96

印刷字數 62,000 字

1957年4月南京第一版

1962年4月北京第二次印刷

印數 7,500—18,005 冊

統一書號：15045·總595—無139

定價：(10)0.48元



目 錄

緒 言

第一章 晶体三極管的物理基礎和工作原理

1. 半導体的电導..... (3)
2. 点接触型晶体三極管..... (8)
3. 面接合型晶体三極管..... (16)

第二章 晶体三極管的等效电路

4. 电阻等效电路..... (19)
5. 电導等效电路..... (24)
6. 作为同授放大器的晶体三極管..... (27)

第三章 晶体三極管的技術数据和特性曲綫

7. 点接触型晶体三極管..... (28)
8. 面接合型晶体三極管..... (34)
9. 点接触型晶体三極管的噪声..... (38)

第四章 放大器电路

10. 放大电路中的基本关系..... (46)
11. 晶体三極管电路的穩定性..... (50)
12. 放大器电路的計算..... (52)
13. 各种放大器电路..... (59)

第五章 晶体三極管的脈冲电路

14. 脈冲电路的伏安特性..... (71)
15. 輸入伏安特性的解析計算..... (75)
16. 几个实际的脈冲电路..... (83)
17. 自激發生器..... (84)

第六章 半導体技術的發展远景

18. 晶体三極管的制造工藝..... (86)
19. 場控放大管和晶体四極管..... (90)
20. 晶体三極管發展和应用的远景..... (92)

緒 言

自从A·C·波波夫在1895年5月7日第一次用无綫电收發信号以后，无綫电技术就迅速发展起来。在这一方面，俄国学者們起了主导的作用。

当时的无綫电接收机中最重要的元件之一就是晶体二極管，也就是配有触鬚的一塊晶体，它起着非直綫性元件——檢波器——的作用。1900年，A·C·波波夫第一次利用晶体檢波器來接收火花式發射机拍來的电报信号。后来他又用晶体檢波器接收过无綫电话。

1922年，在苏联的第一个无綫电技术研究所——尼热哥罗得列寧无綫电实验室，有一位工作人員名叫O·B·洛謝夫，他在M·A·蓬奇——布魯也維奇的領導下進行工作，發現好几种晶体二極管都有一段下降的伏安特性。于是O·B·洛謝夫就把这种二極管用來產生等幅振幅，又用來進行再生式接收。在接收机的天綫回路里裝上一个晶体二極管，并讓它接近自激状态，就能大大增加接收信号的强度。以后O·B·洛謝夫和C·H·沙波什尼科夫又作了許多工作，結果証明可以利用振盪晶体來進行外差式接收，并且也确实作到了这一点。除此以外，这种接收机还可以变成一部發射机，足够近距离通信之用。裝上振盪晶体的接收机既簡單又便宜，在較低的电源电压下所消耗的功率也不大。就这样，半導體晶体在世界上最先是用來放大和激發等幅振盪

的。

後來真空管有了發展，就把晶体从无綫电技术的許多部門中排擠出去了。但是科學家們還是孜孜不倦地繼續研究晶体的性能。在這方面，O·B·洛謝夫作了很多工作，他獲得了12種發明証書，寫了許多論述半導體性能的著作。

晶体二極管和真空二極管的伏安特性很相象，這就使得科學家們屢次產生這樣的念頭，就是如何在晶体二極管中也加添一個和真空管中的控制柵極起同樣作用的電極。

1948年下半年，出現了最早的一些有關晶体三極管的消息。它是一個三端裝置，可以用來放大信號。此後又進行了許多實驗和理論分析，結果弄清楚了半導體的許多新的特性，製造出了許多新型晶体三極管。

近來大家對晶体三極管非常有興趣，這是因為它有一些真空管所沒有的有利特性。晶体三極管的優點，首先是它的壽命比真空管長得多，它的機械强度高，尺寸小，消耗的功率小。既然直流電流小，直流電壓低，那末就可以減小電源，並採用適合於小直流功率的小型无綫電零件，於是用晶体三極管裝配的无綫電設備就輕巧多了。但是和真空管相比，晶体三極管也有許多嚴重的缺點，這就是工作頻率範圍有一定限制，噪聲電平較高，各個產品的參數出入很大，有用功率受到限制等。但是隨着晶体三極管製造工藝的改進，這些缺點是一定可以順利地克服的。

第一章

晶体三极管的物理基础和工作原理

1. 半导体的电导

各种晶体结构的物质，根据其导电的能力，可以分为三类：即导体、半导体、绝缘体或介质。其中半导体是范围最广的一类。半导体的电导率与导体的电导率相差很大。但是半导体和导体之间或半导体和绝缘体之间最根本的区别是在于电导的性质，电导率就是由电导的性质来决定的。

如果说导体（金属）导电是因为金属的价电子是自由的，能象气体原子一样运动的话，那么半导体的价电子却通常是束缚的，不能参加导电。下面我们就以金刚石（碳）、硅、锗这一类的半导体作为例子来研究它们究竟是如何导电的。

碳、硅、锗原子在外层轨道上有四个电子，这些电子使同物质的原子彼此结合或者与别种物质的原子结合，这就是所谓价电子。在物质的晶体点阵里，每一个原子都力求占据这样的位置，以便能和与它对称的四个原子相结合。这些相邻的原子分佈在一个正四面体的四角，上述的原子就处在这四面体的中心（如图1）。每两个原子之间的结合是靠两个电子形成的，其中之一是某一原子四个价电子中的一个，另一个则是相邻原子四个价电子中的一个。上述半导体的晶体点阵就是由很多这样的正四面体组成的，各个正四面体都用这种由两电子组成的

共价键按照不同的方式联结在一起。

为了简单起见，将三度空间的点阵转换成二度空间的点阵（图2）。假设平面图上表示的是一金刚石晶体点阵，每一个原子都用四个共价键与相邻的各个原子相结合。如果是这种结

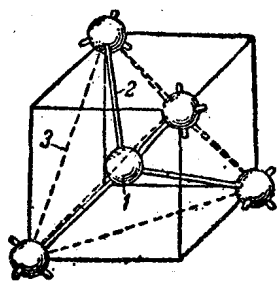


圖 1. 晶体結構

1—原子，2—共价键，3—四面体棱线

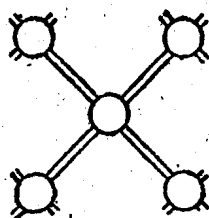


圖 2. 晶体点阵平面图

构，亦即所有价电子都被束缚住，那么一下子就可以看到这种晶体必定是绝缘体。但只有在晶体点阵未遭破坏或晶体本身未渗入杂质时，这一点是正确的。

假设晶体受到光线照射或高能量的质点碰撞，那么打中晶体的光子或质点就能破坏它的结构，打出电子。这种能量不仅能使电子逸出共价键，而且还能使它逸出一段相当的距离。因此电子开始在晶体内作不规则的热运动，直到它返回到自己的共价键，或者落入别的缺少电子的共价键为止。如果将晶体放在电场里，则这种从自己共价键中被击出来的电子将在电场的作用下作规则的运动，相当于有电流流过晶体。在这种情况下，电荷的移动就是由自由电子的移动引起的，这种自由电子叫做剩余电子，由它们所产生的电导叫做电子电导或者叫做 n

型电導 (n 表示負的, 由拉丁字“negative”而來)。

現在再來研究失去电子的共价鍵, 自从打出电子后, 在这个地方就剩下一个非中性的正电荷, 这种正电荷就叫做“空穴”。这个电荷可以被隣近的电子中和, 此时隣鍵將缺少一个电子, 也就是說空穴跳到隣鍵去了, 以后的情况可依此类推。空穴与电子一样作不規則的热运动, 直到与自由运动的电子复合为止。把晶体放在电場里, 空穴的运动也要成为規則的运动, 也相当于有电流流过晶体, 但此时电荷的符号是正的, 空穴的运动方向与电子运动的方向相反, 这种电導称为空穴电導, 或 p 型电導 (p 表示正的, 由拉丁字“Positive”而來)。

虽然空穴电導可以看成是正电荷运动的电導, 但無論如何不能將它和离子的电導混为一談。事实上, 即使在空穴導电时, 也是电子在移动, 只不过不象电子導电那样一个自由电子要走整个的路程, 而是許多电子依次在各共价鍵中互相替换位置。

空穴導电和电子導电的区别可以用下面的比喻來說明。

在一个傾斜的空槽內放一个球, 球就会由上往下滾去。球好象电子, 而重力場就好象电場。这个例子与电子導电相似。

如果現在在槽內从上到下都裝滿了球, 然后拿走底下的球, 那末这个球的位置就立刻被后面的一个球所佔据, 它后面的那个空位子又被后面第三个球所佔据, 依此类推。所有的球都往底下走, 拿走底下的球 (好象从共价鍵中拿走了电子) 而留下的空位子 (好象空穴) 就移到最上面去了。这个例子与空穴導电相似。

現在再來研究上面的情況。當金剛石晶体受光綫照射或被某種質點撞擊時，許多共價鍵都破壞了，得出同樣多的空穴和自由電子，如果將這個被照射的晶体放在電場里，則晶体中將流過電流，空穴向一個方向流，而電子則向另一個方向流，也就是晶体同時具有兩種電導——電子電導和空穴電導。如果拿走光源，由於空穴和電子的復合，晶体又回復到原來的狀態（因為此時不再出現新空穴和電子來補償復合了）。單位時間內所產生的空穴和自由電子的對數決定於照射強度。在晶体三極管中並不利用這種效應，因為在晶体三極管中需要使晶体只具有某一種電導——空穴電導或電子電導。但是這種效应在晶体光電管（或稱為光電放大器）里卻廣泛地應用。

不僅可以用照射或用質點撞擊來破壞共價鍵，當溫度升高時，同樣也可能使共價鍵破壞。但是這一現象對於金剛石幾乎沒有什麼意義，因為在金剛石中，這種現象需要在很高的溫度時才能發生；但它對於硅，特別是對於鍺卻具有很大的意義，因為在實際中能碰到的溫度下就會發生這種現象。在這種情況之下，正如同上面所研究的那樣，在半導體內就會產生數目相同的空穴和自由電子，因為當共價鍵破壞時，空穴和電子總是成對產生的。

如果半導體中有雜質，情況就完全兩樣了。下面我們就研究具有雜質的半導體。

根據雜質的性質，雜質原子的價電子可以多於或少於4個。雜質原子在晶体點陣中所佔據的位置，一般就是半導體原子所佔據的位置，它與鄰近原子組成共價鍵。根據雜質原子是電子

剩余或是电子不足，它就会產生电子導电或空穴導电。

假設雜質是五价的砷原子，而硅是基本晶体物質，在晶体点陣中佔据了硅原子位置的砷原子用其外層軌道中的四个电子与相隣的硅原子相結合，組成共价鍵；第五个电子不可能組成共价鍵，因为共价鍵的所有位置都滿了。吸引力使它吸附在原来的原子附近。但是就在室溫之下，由于热运动的能量，它已經可以离开它原来的原子而在晶体中运动，即变成为自由电子。此时砷原子就成了不动的正电荷体。在低溫时，自由电子可能被这个正电荷吸引而与它复合。溫度越低电子越容易与雜質原子相复合，电子越难脱离雜質原子。供給自由电子以保証电子導电的雜質原子叫做施主。磷、砷、銻都是施主雜質。施主雜質佔优势的晶体具有电子电導，这种晶体就叫做 n 型晶体。

現在研究有三价硼雜質的硅。硼的外層軌道上有三个电子，因此很明顯，当硼佔据硅原子的位置，并与隣近的原子組合共价鍵时，只能組成三个完整的共价鍵。第四鍵將要缺乏一个电子，相当于晶体点陣中出現了一个空穴。隣鍵的电子可能跑到这个鍵中來，那时硼原子所有的鍵都滿了，而空穴卻跑到别的鍵上去了。此时硼原子就变成了不动的負电荷体。

由于电子和空穴的运动类同，因此可以假設帶負电的硼吸引帶正电的空穴。但是在室溫下，由于热运动的能量，空穴也和剛才講过的电子的情况一样，能够脱离它原来的雜質原子而實現導电过程，凡需要补充一个电子來使共价鍵完整的雜質原子称为受主。受主雜質使晶体具有空穴电導。这种晶体就叫做 p 型晶体。

前面說過，不論是空穴脫離受主原子，或者是電子脫離施主原子，都需要消耗一些能量。正因為如此，所以半導體電導在很大程度上決定於周圍的溫度。隨著溫度的升高，離開雜質原子的電子或空穴的數目越來越多地超過與這些原子復合的電子或空穴的數目，這就相當於晶體的電導提高了。在溫度相當高時，電子和空穴的復合實際上就可以不再加以考慮。看來溫度繼續升高時電導就不應再增高了，但是當溫度足夠高時，晶體內共價鍵開始破壞，此時電子和空穴成對出現；溫度越高，出現的對數越多。雜質電導在總電導中所佔的成份迅速下降，晶體得到同樣程度的空穴電導和電子電導，其大小實際上和雜質的種類和濃度無關，這種電導稱為晶體的本征電導。

實驗測定，破壞硅的共價鍵的能量等於1.11電子伏特 (96)，空穴脫離受主需0.08電子伏特，電子脫離施主需0.054電子伏特。

因此，視雜質的種類和濃度不同，晶體具有不同類型的電導和不同大小的電導率。

晶體三極管就是利用具有某一種類型電導的晶體作成的，或者是利用其中分為電導類型交替變化的幾層的晶體作成的。

2. 點接觸型晶體三極管

最簡單的晶體三極管是在一塊半導體晶體上接兩根象晶體二極管中那樣的觸鬚。最常用的是具有電子電導的鍺晶體（即 n 型鍺）。晶體較大的表面（與點接觸面相比）銲接在大的金屬基底或底座上，觸鬚的尖端則裝在鍺晶體表面上，兩觸

鬚之間的距離很小，大約在百分之幾個毫米左右。

底座和兩個觸鬚是晶体三極管的三個引出端，用這三個引出端就可以象具有陰極、柵極和陽極三個引出端的普通三極管那樣接入電路。

電導的型式決定了半導體和觸鬚的關係，即決定了流過半導體的正向和反向電流的流向，供電電源和偏壓的極性。

將晶体三極管適當地接入具有供電電源和偏壓的電路中時，其中的一根觸鬚可以向電子導電的鎢晶体內發射出空穴電流，由於這個性質，這根觸鬚叫做發射極，它所起的作用與真空三極管的陰極相似。如果用的是空穴導電的鎢晶体，則發射極向晶体內發射的電流就不是空穴電流而是電子電流。當然，此時供電電壓和偏壓的極性都應該調換一下。

第二根觸鬚接在晶体的逆流方向，它的電位與發射極所發射電荷的符號相反。因為兩根觸鬚的尖端靠得非常近，所以發射到晶体中的電荷電流大部分流到第二根觸鬚上，僅僅只有一小部分在晶体內复合或流入底座。這第二根觸鬚叫做集電極，而底座通常叫做基極或基底。

進入晶体的電荷電流的大小決定於基極對發射極的電位，因此往後我們就稱基極為控制極，它的作用相當於真空三極管的柵極；相當於真空三極管陽極的則是集電極。

這種晶体三極管的結構示於圖 3。

假設晶体三極管是由電子導電的鎢晶体作成的。連接這種 n 型鎢晶体三極管的電路示於圖 4。在這個電路里，控制極是公共的電極，在發射極上加一個比控制極稍正的偏壓，在發射

極电路里和偏压串接一个交流信号电压。在控制極与集電極間接一个供电电压，它的極性使集電極比控制極的电位負一些。

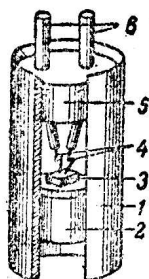


圖 3. 圓筒型晶体三極管

1. 金屬筒, 2. 金屬基底, 3. 晶体,
4. 發射極和集電極的接觸, 5. 絕緣
6. 發射極和集電極的引出線

在集電極电路里接一个負載电阻，經過放大的信号电压就由这一电阻上取得。

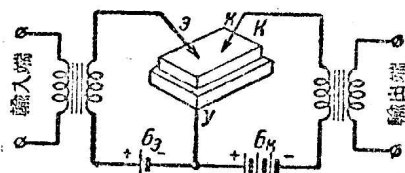


圖 4. 晶体三極管的联接电路

K—鍺晶体, Y—控制極, Y—發射極, K—集電極

晶体三極管和真空三極管的工作原理有很多共同点，發射極向晶体內發射电荷电流，这好象真空三極管的加热陰極向真空中發射电子流。控制極的工作原理与真空三極管的控制柵極更有很多相似处，因为控制極与發射極之間的电位差就决定了向半导体中發射电荷的强度。

集電極收集向半导体中發射的电荷电流，它与真空三極管的陽極相似。因为視半导体導电的型式不同，晶体三極管發射的电荷可能是正的，也可能是負的，所以集電極电路的电源以及發射極电路的偏压在兩種情况下也应有不同的極性。

从电路联接的观点看，晶体三極管与真空三極管也有很多共同点。典型的晶体三極管共控制極电路与真空三極管的共柵極电路相似，这两种电路不使輸出信号与輸入信号相差180°。

共發射極電路與共陰極電路相似，輸出信號與輸入信號相差 180° 。接成共集電極電路的晶體三極管則與真空三極管陰極輸出器電路，即共陽極電路有很多相似之處。

因此，晶體三極管在一定限度內可以看成是一個陰極在室溫下就具有發射能力，並能發射出正電荷（ n 型鏽）或負電荷（ p 型鏽）的真空三極管。

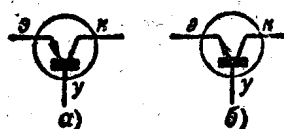


圖 5. 晶體三極管的常用符號
a— n 型鏽三極管，b— p 型鏽三極管。

為了用原理電路圖画出晶體三極管，我們用了幾個三極管常用的符號，如圖 5。此處箭頭表示發射極，箭頭的方向就是通流的方向。

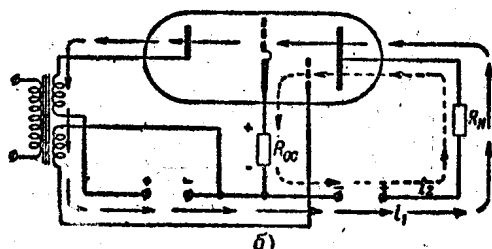
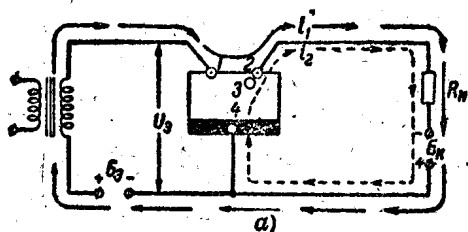


圖 6. 晶體三極管與真空三極管之間的相似點
a—晶體三極管的原理圖，b—晶體三極管的真空管模型圖。

為了更好地了解點接觸型晶體三極管的工作原理，可以將晶體三極管和真空三極管作以下的對比。

圖 6, a 是點接觸型三極管的原理圖，讓我們分別看一下發射極—集電極電路

中的电流 i_1 (實綫所示) 和控制極—集電極电路中的电流 i_2 (虛綫所示)。

在电源 E_c 的作用下, 电流 i_1 流通, 它的大小决定于偏压的大小。从發射極—集電極电路的观点看来, 点接触型三極管的作用完全象一个共柵極真空三極管: 發射極和控制極間的电压变化 Δu_c , 就使發射極电流变化 Δi_1 。

由于同一电源 E_c 的作用, 在控制極—集電極电路內流过一个反向的电流 i_2 , 在紧接集電極的区域内, 由于特殊的条件, 电流 i_1 的变化 Δi_1 会使电流 i_2 成比例地变化 Δi_2 。这个現象可以这样來想象: 在电流 i_2 的通路中靠近集電極的某一点 3 上, 設想有一个和輸入端耦合并且能反映輸入端电压变化的控制極。輸入端的电压变化 Δu_c , 由于真正的控制極的作用, 电流 i_1 变化 Δi_1 , 由于設想的控制極的作用引起电流 i_2 变化 Δi_2 。

因此, 点接触型晶体三極管可以看成是一个特殊的兩級电路, 兩級均工作于公共負載 R_c , 流过晶体的电流 i_2 在發射極与控制極間引起一个电压降, 这个电压降是一个回授电压, 由第二級的輸出端回授到第一級的輸入端。点接触型三極管的这个特点使它特別宜于应用在脈冲电路里。

應該指出, 輸入电压变化 Δu_c 引起輸入电流 i_1 变化 Δi_1 , 而輸出端的电流 ($i_1 + i_2$) 則变化 ($\Delta i_1 + \Delta i_2$)。

在輸出端电压不变的情况下, 輸出端电流的变化量与輸入端电流的变化量的比值, 称为电流放大系数:

$$\alpha = \left| \frac{\Delta i_1 + \Delta i_2}{\Delta i_1} \right|_{u_c = \text{常数}}$$

將晶体三極管上述过程用真空管电路表示如圖6,6。

两个三極管有公共的陽極（集電極）和公共的負載。两个栅極（控制極和設想的控制極）也接用了同一信号，第一級的栅極与第二級的陰極联接（控制極是第一級的栅極和第二級的陰極），在公共電極电路里接了一个电阻 R_{cc} ，它代表晶体三極管的同授內阻，其上的电压是由第二級的电流流过它而產生的。

这个比喻并不能完善地反映在晶体中和接触範圍內的物理过程，只是用來說明点接触型三極管的工作原理而已。

以后要研究的面接合型三極管在集電極範圍內沒有第二个过程（如果面接合型三極管沒有規定有附加的 $p-n$ 型接面的話），因此將它比作真空管更近似一些，因为它只有第一級。

我們暫不分析晶体三極管的工作原理和电路的联接方法，而先來分析几种点接触型晶体三極管的結構型式。

以上所研究的晶体三極管都是圓筒型的，在大多数情況下，这种三極管都有兩個引出端——發射極与集電極，控制極（基底）直接和裝三極管的黃銅壳相接。这种三極管的触鬚尖端彼此相距0.05—0.07毫米。为了使机械震动时接触点平穩，为了防止触鬚在光滑的表面沿压力切向分力方向移动，在壳內填充石腊或別的黏性介質。

上述結構型式并不是唯一可能的型式。圖7中画出了一个同軸式晶体三極管。在金屬壳的中間放一个直径为3毫米、厚为0.5毫米的

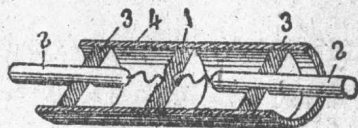


圖 7. 同軸式晶体三極管
1—棍子內的晶体，2—發射極和集電極的引出端，3—絕緣塞，4—金屬壳