

簡單的 半导体放大器和 收音机

苏联 B. K. 拉布琴 著

涂 象 初 譯

人民邮电出版社

В. К. ЛАБУТИН
ПРОСТЕЙШИЕ КОНСТРУКЦИИ НА
ЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ
ГОСЭНЕРГСИЗДАТ 1958

內 容 提 要

本書首先談談半导体三極管的优点和它为什么能
后举出了几个最簡單的半导体放大器和收音机的例子
明半导体三極管的作用原理和特性。讀者不但可以按
具体制作，而且可以通过这些电路对半导体三極管的
有一个初步的了解。

簡單的半导体放大器和收音机

著 者：苏联 В. К. 拉 布 琴
譯 者：涂 象 初
出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京東四 6 条 13 号

(北京市書刊出版登記證出字第 0448 号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂
發行者：新 華 書 店

开本 787×1092 1/32

印张 1 张 页数 21

印刷字数 34,000 字

1959 年 5 月北京第一版

1959 年 5 月北京第一次印刷

印数 1—33,000 册

統一書号：15045·总1031-無270

定价：(9) 0.15 元

目 次

电子管的新对手.....	1
半导体三极管是怎样产生放大作用的.....	9
供检波式收音机用的省电的放大器.....	20
电唱机.....	26
用半导体三极管制成的袖珍收音机.....	33
半导体三极管最简单的测试.....	41

电子管的新对手

10年前，全世界各杂志上飞快地傳遍了發明新型“电子管”这个激动人心的消息，这种新“电子管”既不需要真空，又不需要灼热灯絲。新型放大器件有下列特点：尺寸極小，非常省电，使用期限要比普通的电子管長很多倍。这类器件的主要部份是一块从半导体晶体中切下来的薄片。

这样，在电子技术蓬勃發展的年代，当电子管經過了長期的技术發展道路而成为十分完善的器件，从而在現代技术中取得巩固地位的时候，半导体放大器也开始了它的第二个青春时代。

它的第一段生活时期却是处在完全不同的条件下。

……20年代来到了。开始了組織無線电广播和長途無線电通信的第一次嘗試。虽然电子管問世已將近20年，但由于电真空技术和無線电工業还没有多大發展，人們仍然不得不广泛地采用火花式發射机，并寻找其他的器件来产生、察

覺、以及放大無線电信号。于是尼热哥罗得無線电實驗室工作人員O. B. 洛謝夫完成了一項發明，它被广泛地轉載在各地的無線电杂志上，这项發明告訴我們，不仅結構复杂的电子管具有振盪和放大的作用，簡單的晶体檢波器也可以起这样的作用。欧洲和美洲也在出产洛謝夫的接收机——“晶体再生器”——，有人預料电子管將很快地被晶体管所排挤。……

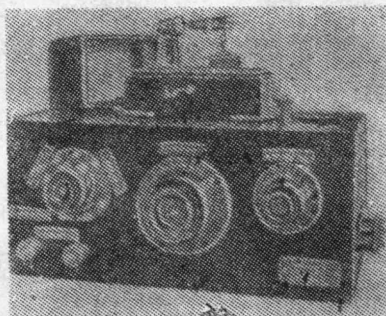


圖 1 洛謝夫的晶体再生器——第一架利用半导体放大器的接收机(1922年)

然而，由于当时在晶体的电学性質方面的科学知識还很缺乏，实验技术又發展得很慢，因此無法对發生在半导体內的那些过程进行深入的研究，也無法制造出足以赛过电子管的可靠的高效率半导体放大器件。随着电子管的进一步改进，晶体再生器遂讓位于电子管接收机，而到了20年代末，晶体再生器就已失去实用的价值了。

30年代是电子管大踏步胜利前进的年代。放大性能的改善、多栅管和强功率振盪管的創造、以及供超高頻用的特殊电子管的發明等事实，使得电子管变成了一个万能的器件，可以解决各种各样科学技术部門中的許多綜合性任务。电子技术的一系列成就促成了下列的奇蹟：“不用紙張和沒有距离的报纸”，大規模的無綫电广播，有声电影和电视，雷达和無綫电天文学，自动控制技术和遙控技术中的現代化的快速作用体系，無綫电导航和电子計算机，超声技术和核反应的控制等。

而电子管的应用愈广泛，它所具有的某些原則性缺点也就暴露得愈尖銳。

早在第二次世界大战期間，軍用無綫电設備就往往不够可靠，而且大部分故障的成因都是由于电子管出了毛病。电子管的使用期限和机械强度已經成为問題了。

無綫电接收机和电视接收机的广泛使用又揭露出現代电子管的另一严重缺点——它們太費电了。下面的情况足以說明这一点：在1946年，苏联的收音机和电视接收机所耗費的电能，已等于世界上最大的庫比雪夫水电站所發出的全部电能。

电子計算机以及其他含有几千个电子管的特殊設備的發展，对电子管的可靠性和使用期限、对省电以及縮小尺寸等問題，都提出了很严格的要求。

电子管的一些主要缺点都跟下面兩点有关：第一，电子管中有

灼热的陰極，而灼热陰極所耗的能量很大，使用期限又短；第二，必須使得大量的、制造精巧的電極都維持其精确的几何形狀，并且必須把这些電極安置在真空中，这就使得电子管的机械强度不高，而制造小型电子管就非常复杂了。还必须注意到，省电的要求跟延長使用期限的要求是矛盾的，而且，对質量的要求也一方面跟对机械强度的要求相互矛盾，另方面又跟使外型縮小的要求相矛盾。因此，如何按現代技术所提出的各种要求的总和来进一步改善电子管——这是一件極其复杂的任务。

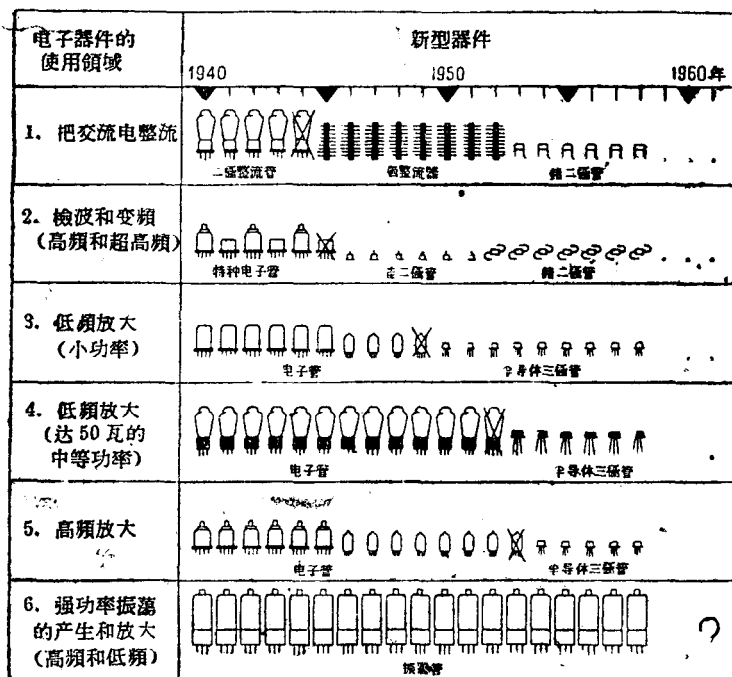


圖 2 从 40 年代起，电子管开始被半导体器件所排挤。现在只剩下下面这个区域内的电子管还没有被代替掉：强功率的振盪与放大。

早在 40 年代，就有人企圖在很多情況下把電子管的某些功能轉加在別的器件身上：二極整流管開始被硒整流器所替代，此外，開始使用具有穩定的工作點的硅二極管與鎘二極管來代替檢波和混頻的電子管。當然，這些器件以及磁放大器、電動式放大器都只能解決少量的特殊任務，還無法和所有類型的電真空器件作競爭。最通用的放大和振盪器件仍然是電子管。

但是，在電子技術發展的同時，人們對物質本性的概念也在不斷擴展和深入，而且後者在很大程度上正是得力於電子技術的發展。這些有關物質本性的概念之發展有下列幾個方面：金屬電子論發展了，它豐富了有關金屬導體物理學以及金屬導電機構的一些概念；量子力學闡明了有關電子的性質以及電子跟其他粒子相互作用的性質等方面的真相。最後，還發現了能帶理論，這種理論使我們能用一個統一的觀點——用電子可能有的能量狀態的觀點來說明電介質、導體以及半導體等三種迥然不同的物質的特性。在這過程中，科學不僅勝利地解釋了許多以前無法明了的現象，而且还揭露出物質的許多新特性，並使這些特性處在人類意志的控制之下。以上這些成就致使半導體放大器獲得了第二次生命。人們不僅學會了如何在真空中按自己的意願来控制電子的運動，而且也學會了如何在晶体中控制電子的運動（在晶体中，電子不斷地跟其他粒子相互作用）。1948 年，美國人約翰·巴丁和華爾特·布拉金制成了基於利用半導體晶体接觸特性的第一個三極放大器件——所謂的“點接觸型”半導體三極管。

這種新型放大器件不需要真空和熾熱燈絲，它的尺寸非常小。這種新器件在現在被發明，真是再巧沒有了。雖然第一個半導體三極管在放大性能方面難以跟現代的電子管相比，但立刻有大批專家投入了改進半導體放大管的工作。

維里揚姆·肖克萊在很短時期內建立了半導體三極管的理論。

并發明了一種較為完善的新型三極管——所謂“面接合型”半導體三極管。對半導體理論和半導體技術作了原則性貢獻的還有下列蘇聯專家們：

А. Ф. 約飛院士，
Б. И. 達維多夫，
И. Е. 塔姆院士等。

第一個半導體

三極管有幾個嚴重的缺點：噪音很大，工作頻帶有限，電參數很容易隨溫度改變，功率有限等等。其中大部分都屬於年青技術所難免的幼稚病，隨著經驗的積累以及理論的進一步發展，這類缺點是可以克服的。問題很明顯，由於出現了半導體三極管，舊時的電子管碰到了一個勁敵。

一個短時期以後，半導體三極管的最高工作頻率便從几百個千赫增加到了幾千個兆赫。除了小功率的半導體器件以外，還創制了輸出功率為幾十瓦的半導體三極管。又制出了工作溫度可達 500°C 的半導體。半導體三極管的固有噪音大大地降低了。現在，噪音最小的放大器常常正是用半導體三極管做成的，而不是用電子管做成的。至於談到機械強度、經濟性以及體形小等方面，那麼，從半導體三極管剛一發明時起，它在這方面就已首屈一指了。

在許多的用途上，電子管已經不能跟半導體三極管匹敵了。這方面，首先應該談一談助听器；如果改用半導體，那麼助听器的大小和重量可以減少到 $\frac{1}{3} - \frac{1}{5}$ ，而能量消耗則可以減少到 $\frac{1}{20} - \frac{1}{50}$ 。其

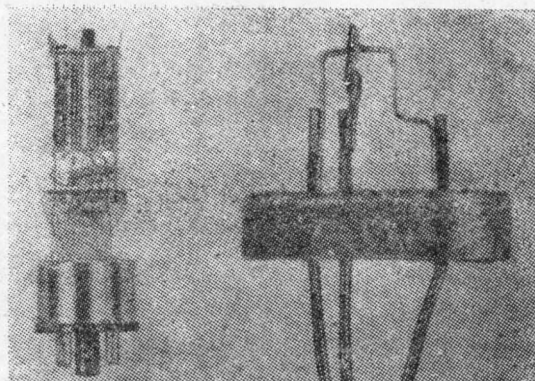


圖 3 只要把電子管和半導體三極管的罩子都取掉，就可以很清楚地看到後者的結構是多麼簡單（在圖中，把電子管縮小了，而半導體三極管則放大了）。

次，應該談一談袖珍（“烟盒”）收音机，如果采用电子管来做它，往往还得不到滿意的結果。半导体三極管已卓有成效地运用到計算机中，以及在無人管理的情况下長期工作的裝置中（例如，用到長途通信系統的中間放大器中），在这类裝置中，需要高度的可靠性、經濟性以及使用期限很長等。

現在，工業出产的半导体三極管可以解决下列各种任务。

多用途的小功率三極管。这类半导体管的典型代表是苏联出产的 $\Pi 1$ 和 $\Pi 6$ 型面接合型鍺三極管。这种非常省电的小型放大器件可以放大并产生低頻的以及中等高頻的信号(达 500—1000 千赫)。一个用这类三極管接成的放大級可以把信号功率放大 30,000 倍。在單迴路綫路中，最大的輸出功率可达 10—30 毫瓦。为了使这类三極管正常地工作，需要在几个伏特的条件下供給电流达 1 毫安；然而，即使当供电功率極其微弱、微弱到对普通电子管失去意义时，例如当电流为 10 微安而电压为 0.2 伏时，半导体三極管还是具有放大性能的。

低頻强功率器件。这类器件包括供低頻放大器的末級以及强功率前置級应用的面接合型三極管。它們也已經有效地应用在能把电压由 1 伏或几十伏提高到几百伏甚至几千伏的直流变换器中，应用在对执行机构（繼电器，电动机）發生作用的直流放大器中，应用在低頻（达几万赫）振盪器中，以及中等頻率的脉冲綫路中。屬於这类器件的有 $\Pi 2$ 、 $\Pi 3$ 和 $\Pi 4$ 型三極管，它們在乙类状态的推挽綫路中可以供給 0.5—1 瓦($\Pi 2$)至 30 瓦($\Pi 4$)的有用功率。

高頻小功率器件。在很長一段时期里，人們一直認為頻率最高的三極管可能是点接触型的。因此，虽然發現了更完善和更可靠的面接合型三極管，人們仍繼續在改进并生产点接触型三極管。苏联出产的各种点接触型三極管可分成四类($C 1$, $C 2$, $C 3$, $C 4$)，它們所能放大的最高頻率达 10 兆赫。

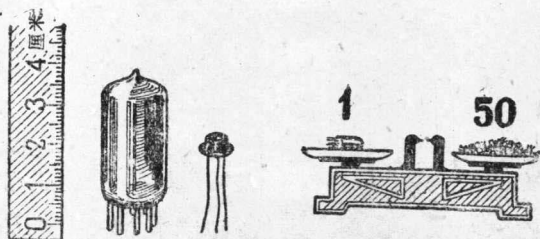


圖 4 半导体三极管的最主要优点在于它的尺寸和重量都很小。

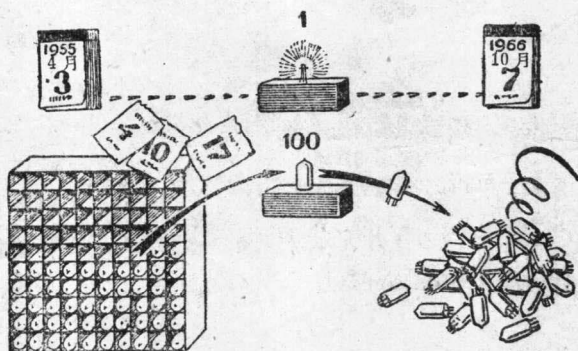


圖 5 半导体三极管的使用期限可达到几万小时。

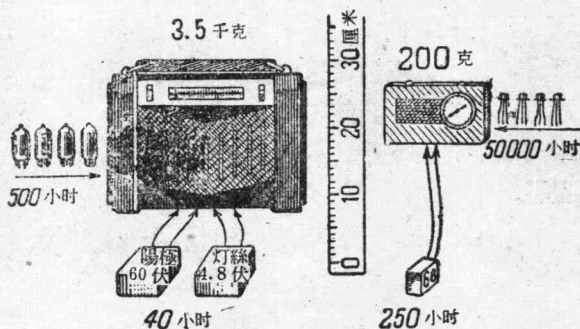


圖 6 在携帶式袖珍收音机中，如采用半导体三极管，則效果最好。

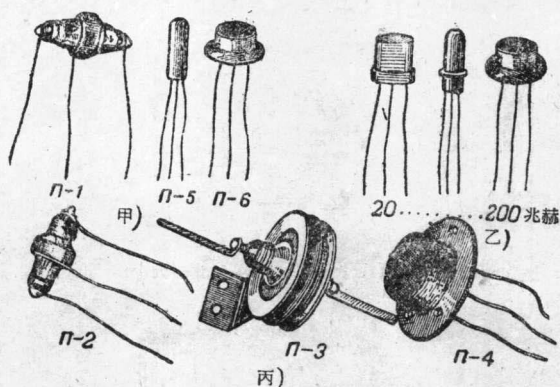


圖 7 半导体三極管的外形。

甲—用来放大微弱的低频信号；

乙—用来放大微弱的高频信号；

丙—用来放大强功率的低频信号。

可是，近年来的新成就说明，最高频的器件是面接合型三極管的特种变型管和面接合型四極管（所谓的“表面阻挡層”管，双基極三極管，“扩散型”管，等等）。这类器件現在已走出了實驗室的大門，开始

大量生产了。它們适于用来放大几个兆赫到几百兆赫的信号。这类三極管对快速作用的脉冲綫路以及对寬頻帶放大器來說，也是很好的器件。

面接合型高频三極管和四極管在丙类状态时所能給出的最大功率，高达十分之几瓦。

由此可見，現在我們有了很多种半导体器件，它們可以解决許許多多的任务，而不久以前，这些任务全都是由电子管来完成的。很遺憾，直到今天为止，我們还没有創造出能代替强功率振盪电子管的强功率高频半导体器件。不过，报导这方面的首批成就的消息已开始出現了。

即使不解决这个問題，今天的这批半导体器件也足以成为进一步改进現代無線电电子学裝置的强有力工具了。B. 肖克萊，П. 巴定和 B. 布拉金等三人获得了 1956 年的諾貝尔獎金，这表达了全人类对这三位半导体放大器件創制人的謝意。

半导体三极管是怎样产生放大作用的

半导体三极管与真空三极管的一般作用情况有某些类似之处。

在半导体三极管中，也可以找到跟电子管的阴极相类似的电极——所谓的**发射极**，它的功用是发射基本的带电粒子。其次，还有一个被称作**基极**的空间，发射极所发出的粒子便在这个空间内传播。最后，有一个跟板极类似的电极——**集电极**，它收集了发射极所发出的大部分电荷。

当基极相对于发射极加上了某一个电位时，就可以控制集电极的电流。由此可见，基极是跟控制栅极相似的。

不过，这个类似只能对发生在半导体三极管内的过程提供肤浅的近似情况。事实上，这个过程要复杂得多，而且跟电子管的原理有着本质上的不同。根本的区别在于：半导体三极管中的一切过程都不是发生在真空内，而是发生在特制的半导体晶体格子内——大多数情况下，是发生在锗晶体格子内。

虽然化学家把锗元素划归金属之列，但它在电学性质方面却跟我们所熟悉的金属导体大不相同，而且锗的导电机构完全是另一种形式。在金属导体中，有大量的电子尚未跟某一确定的原子结合在一起，因而这些电子可以在导体内自由地把电荷带来带去，如果外加一个电压，便可以

产生电流了。锗晶体的情形跟上述情形不一样，绝大多数的电子都

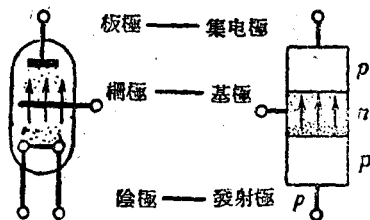


图 8 从图上可以看出，半导体三极管跟电子管在作用原理方面有某些类似之处。

种有规律的原子間結合鍵，使得鍺具备了晶体結構。因此，純鍺的电阻往往比金屬的电阻大好几千倍。

然而当溫度升高时，当晶体受到光照或受到別的作用时，鍺的电阻会显著地降低。現代物理学用下面的說法来解釋上述現象：某一部分电子跟鍺原子結合得不太牢，当受到一定的外界作用时，这种結合很容易被破坏掉，并且馬上釋放出两种类型的載流子——一种是电子（負的載流子），另一种是所謂的“空穴”（正的載流子）。

空穴这个名称是一种比喻性的說法，所謂“空穴”，是指脱离了結合鍵的电子原来所处的那个地方。事实上，空穴并不是某种特殊的粒子，而仅仅是出現在原子之間的过剩正电荷（这些原子之間的結合鍵由于电子的离开而破坏掉了）。而且还可以看到，空穴是可以移动的，就象脱离了結合鍵的电子能移动一样。空穴之所以能移

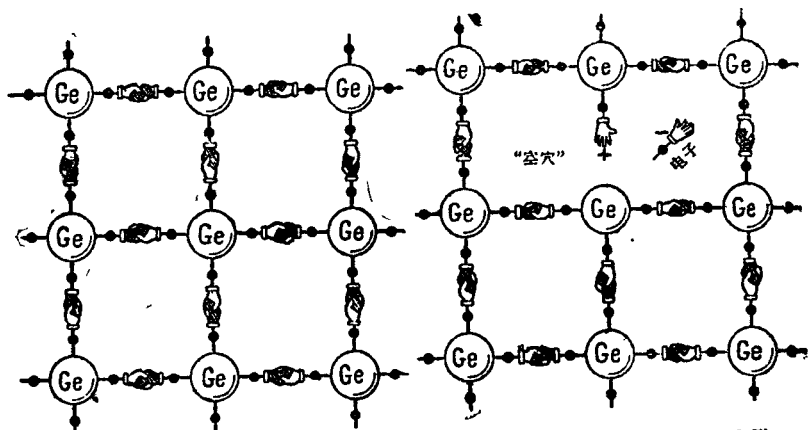


圖 9 鍺的晶体格子之所以牢固，是由于每个鍺原子都借四个外層电子而跟四个鄰近原子形成了結合鍵，并沒留下自由电子，因而晶体不能傳导电流。

圖 10 如果有一个电子脱离了結合鍵，立刻便出現了两个載流子：电子（-）和“空穴”（+）。

动，并不是由于帶有未被补偿掉的正电荷的原子的移动——这些原子都很牢固地呆在晶体格子的相应节点上；而是由于鄰近原子的結合鍵中的某一个电子能够跳到被破坏了的那个結合鍵中，这时，原来的那个空穴消失了，而在近旁則另外出現了一个空穴，如此繼續不已，就像接力棒的情形一样。

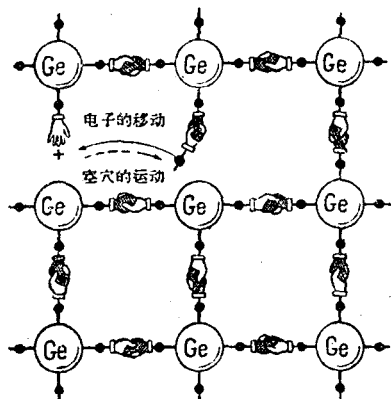


圖 11 空穴之所以能移动，可用下面的說法来解釋：处在結合鍵上的电子可以从这一个鍵“跳到”另一个鍵上，这时空穴則沿着跟电子跳动相反的方向移动。

在外电压的作用下，鍺晶体内的自由电子和空穴作定向运动，于是，晶体中便有电流流过。这时，电子的运动情况跟在导体中的情况一样，是由負極到正極，但由于空穴是正的載流子，它的运动方向正好反过来——由正到負。总的电流等于电子电流与空穴电流之和。

上述的导电机构不單單是鍺所特有的，任何类型的半导体材料（例如，目前最常用的硅）的情况都是如此。

在半导体中，載流子的活动情况有一个最显著的特点：它們能够扩散和复合。

借某种方式釋放出来的电子与空穴，在晶体內作乱运动。但是它們除了乱运动以外，往往还同时伴随着載流子的定向运动——向載流子数量較少（更确切地說，是濃度較小）的区域移动，这样就使得整个晶体內的載流子濃度逐渐趋于一致。載流子的上述自發性的、濃度均匀化的过程，称作扩散，按本性來說，这过程跟热量在金屬物体內从热端傳到冷端的情形很类似。

复合的實質如下：在晶体內移动的、符号相反的兩种載流子，

將在相遇時消失掉——自由電子掉進空穴中，某一個原先破裂了的結合鍵又恢復成為完整的，這個自由電子往後便喪失了移動的自由。當然，空穴也同時消失了。由於這個緣故，我們要考慮到，半導體中的載流子的“壽命”是有限的。

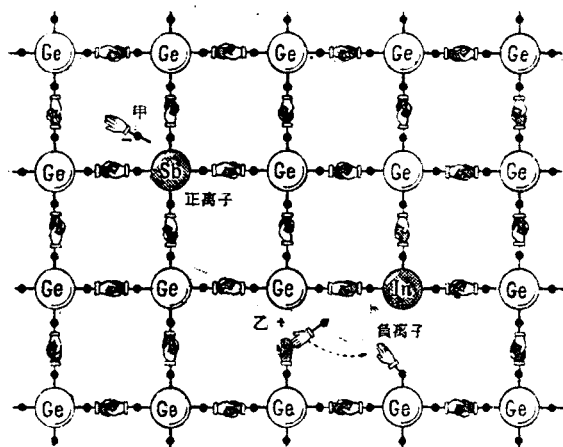


圖 12 如果個別的鍺原子被其他物質的原子所替換，例如，如果被具有五個價電子的銻 (Sb) 原子替換時，就可以在晶體得到附加的自由電子 (甲)，如果被具有三個價電子的銦 (In) 替換時，則可得到附加的空穴 (乙)。

如果加入極微量的雜質，便可以大大增加半導體的導電性。選擇相應的雜質，可以使鍺的電子導電性顯然地蓋過空穴導電性 (所謂的 n 型鍺)，或者相反地，使空穴導電性佔優勢 (p 型鍺)。事實是這樣：雜質原子可以代替個別的鍺

原子而進入到晶體格子的節点上，並且不會因此使得晶體格子的結構遭到破壞。這時，如果雜質原子的外層電子數不等於鍺原子的外層電子數，那麼，或者就是電子過剩了，或者就是多有了一些空穴，借此便可以解釋，為什麼導電率增加了，以及為什麼是這種或那種類型的導電性佔優勢。

典型的近代半導體三極管 (面接合型) 是一個單晶薄片，其中由於加入了特殊雜質而形成導電類型交替出現的三個區域： $p-n-p$ 或 $n-p-n$ 。

以下所說的情況都是按最常用的 $p-n-p$ 型三極管而言的。 $n-p-n$ 型三極管的工作原理與此完全類似，唯一的不同點是：電子與空穴應該調換它們的作用。

所謂電子-空穴結（ $p-n$ 結），即導電類型不同的兩個區域的交界面，能對半導體三極管內所發生的過程起着特別重大的作用。

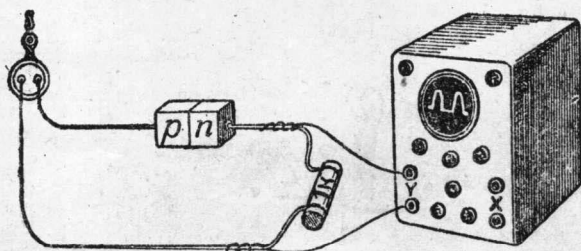


圖 13 如果把 $p-n$ 結接入交流電迴路中便可以發現，這 $p-n$ 結具有整流器的性能。

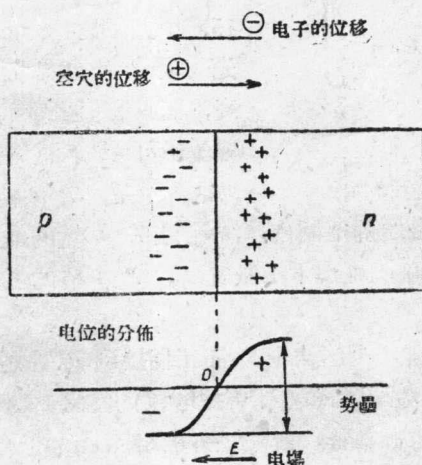


圖 14 在形成 $p-n$ 結時，由於載流子擴散而通過 $p-n$ 結，交界面上乃出現了勢壘。

在半導體三極管內，有兩個這樣的結。

如果在交流電迴路中接入一個 $p-n$ 結（圖 13），則不难看出，這 $p-n$ 結具有整流器的性能：它對於某一方向的電流，電阻很小（幾個歐姆）；但對反方向的電流，則電阻很大（幾十萬歐姆）。

這現象的解釋如下：

由於自由電子以及空穴在 n 型與 p 型區域內的濃度各不相同，所以當形成 $p-n$

結时，載流子便立刻开始扩散，并滲过 $p-n$ 結：空穴从其濃度大的 p 型区域移入濃度小的 n 型区域，而电子的情况正好相反，它們由 n 型区域进入 p 型区域。由于这个过程，遂使得 n 型区域帶正电，而 p 型区域則帶負电（圖14）。就在这两个区域的交界面上，出現了由这些电荷所造成的电场，这个电场 E （圖14）阻碍載流子繼續移过边界。

結果，在 n 型区域和 p 型区域的交界面上出現了一个稳定的势壘，它表征着載流子的扩散力跟反向电场力之間的动态平衡。

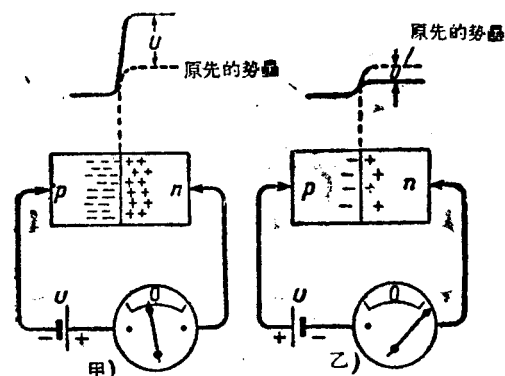


圖 15 当外加电压后， $p-n$ 結的情况。（甲）加反向电压时，（乙）加正向电压时。

的电阻將增加，而在整个工作电压的範圍內，流过这 $p-n$ 結的电流都極其微弱（对于好的 $p-n$ 結，可小于1微安）。 $p-n$ 結的这种接法称为反接。

但如果把外电源的負極接到 n 型区域上，而正極接到 p 型区域上（圖15，乙），那么，由 p 型区域送入 n 型区域的空穴，將極容易跟来自接在 n 型区域的电源負極，并通过外电路而来的电子相复合；同时，由 n 型区域进入 p 型区域的电子，將走向跟 p 型区域相接的电源正極。势壘降低了，載流子通过 $p-n$ 結的条件比

如果現在再在 $p-n$ 結上加一个外电压，并且把正極接到帶正电的 n 型区域上，把負極接到帶負电的 p 型区域上（圖15，甲），那么，原先的势壘將更为加高，而只有極少量的載流子可以穿过 $p-n$ 結。于是， $p-n$ 結