

晶 體 二 極 管 和 三 極 管

(半 導 體 二 極 管 和 三 極 管)

蘇聯 E. Я. 普姆別爾 著
張 謹 譯

人 民 郵 電 出 版 社

Е. Я. ПУМПЕР

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИОДЫ И ТРИОДЫ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1953

內 容 提 要

本書專門敘述晶體二極管和三極管的作用原理以及它們在無線電技術中的應用。此外，對晶體二極管技術應用的發展作了歷史性的論述，並說明了蘇聯的科學在這一個學術部門中所起的作用。

本書可供具有中學程度熟練的業餘無線電愛好者的參考。

晶體二極管和三極管

原 著 者：蘇聯 Е. Я. ПУМПЕР 編 譯

譯 者：張 謙

出 版 者：人 民 郵 電 出 版 社
北京東四區 6 條胡同 13 號

印 刷 者：人 民 郵 電 出 版 社 南 京 印 刷 廠
南京太平路戶部街十五號

發 行 者：新 華 書 店

書號：15045, 0105 1956年8月南京第一版第一次印刷1-9,300冊

76×109 1/32 93頁 印字數108,000字 定價 0.65 元

★北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號★

目 錄

序

前 言

第 一 章 晶體二極管的一般性質

特性曲線的非線性·····	(17)
晶體二極管的基本情況·····	(22)
具有下降特性曲線的晶體二極管·····	(23)
新型晶體二極管的特性曲線·····	(31)

第 二 章 半導體的性質

導體、半導體、和電介質·····	(36)
金屬內部電子能級圖的概念·····	(39)
電介質和半導體內的電子能級圖·····	(45)
半導體的雜質電導性·····	(47)

第 三 章 在半導體的接觸層內所發生的過程

金屬——半導體交界處的整流作用·····	(50)
在兩種不同類型的電導性的半導體間的交界面上的整 流作用·····	(52)
點接觸的性質·····	(60)

第 四 章 矽和鍺二極管的製造特點

對矽和鍺提出的要求·····	(66)
獲取鍺和矽的特點·····	(69)
鍺和矽的表面性質對晶體二極管特性曲線的影響·····	(79)
處理半導體表面的新方法·····	(72)

第 五 章 晶體二極管的噪聲

電系統內的噪聲的基本特性·····	(74)
晶體二極管內的噪聲·····	(80)

第 六 章 晶體二極管在目前的用途

新型晶體二極管的分類.....	(83)
礦石收音機的晶體二極管.....	(84)
視頻檢波器.....	(85)
晶體二極管用作超外差式接收機內的變頻器.....	(89)
具有高逆向電壓與下降特性曲線的晶體二極管.....	(94)
電力用鍺二極管.....	(106)

第 七 章 晶體三極管

晶體三極管的作用.....	(108)
由 $n-p-n$ 和 $p-n-p$ 型的單晶體鍺組成的晶體三極管.....	(124)
晶體三極管和電子管之間的對比.....	(127)
晶體三極管的構造型式.....	(130)
晶體三極管的技術數據.....	(133)

第 八 章 晶體三極管的參數及其基本聯接電路

晶體三極管的電流放大係數.....	(143)
以基極為公共點的晶體三極管的等效電路.....	(148)
以發射極為公共點的晶體三極管電路.....	(156)
以集流極為公共點的電路.....	(160)
晶體三極管的三種接綫圖的對照.....	(161)

第 九 章 晶體三極管的應用

晶體三極管電路的結構.....	(163)
晶體三極管在電子管電路內的應用.....	(167)
參考文獻.....	(178)

前 言

目前業餘無線電愛好者在他們的實際工作中很少有機會和晶體檢波器相接觸。這是因為：在絕大部分的近代無線電收音機中，電子管能勝任愉快地完成收音機各元件的必不可少的不同功用。電子管可以用作高頻和低頻放大器，檢波器，變頻器，及整流器等等。蘇聯國內各種電子管的大量生產使得蘇聯的業餘無線電愛好者和無線電聽眾都很容易獲得它們。使用濾波作用相當好的整流器和能以交流電作為傍熱式電子管的燈絲電源已使我們無需再用乾電池和蓄電池作為廣播無線電收音機的電源。只有在缺乏交流市電的遙遠邊區以及便移式設備中才感到使用電子管的不便，因為它們必須應用特殊的電源。

最初使用的晶體檢波器 在50年以前，當卓越的俄國學者、無線電發明人、亞歷山大·斯捷潘諾維奇·波波夫將他所發明的、不用導線收發信號的方法運用到實際中去時，那時的情況和目前的情況當然是完全兩樣的。

A·O·波波夫在他的接收無線電信號的初期實驗中，把他自己製造的金屬屑檢波器用作變換信號的檢波器，這種檢波器在構造方面比當時早已知道的其他類型更為完善。這儀器是一個內部充盛微細鉄粉的玻璃管（圖1），鉄粉填塞在緊貼着玻璃管下半部內壁的兩個金屬電極（白金帶）之間的空間內。玻璃

管內的鉄粉並不是填得滿滿的，因此當敲動時，鉄粉的顆粒還能在管內移動。



圖 1. 金屬屑檢波器的構造(上視圖)

1—玻璃管；2—鉄粉；3—白金電極；4—軟木塞。

金屬屑檢波器具有一基本特性，藉此它才能夠用來接收無線電信號。這特性就是：在它的電極上加上微弱的高頻電壓後，它的電阻會減小為原值的 $\frac{1}{10}$ 至 $\frac{1}{100}$ 。A.C. 波波夫就利用這個特性，藉助於高頻電磁信號來控制接有金屬屑檢波器的直流電路。就像剛才所講的那樣，當金屬屑檢波器受到高頻信號

的作用時，它的電阻就應該突然下降。因為金屬屑檢波器聯在電池電路內，所以只要高頻信號一旦開始對金屬屑檢波器起作用，流過金屬屑檢波器的直流電流便大大增加。

但是在信號的作用終止後，檢波器的電阻仍保持着低的數值。因此電路只能將信號起作用的開始記錄下來，但不能告訴我們，信號是在什麼時候停止的。

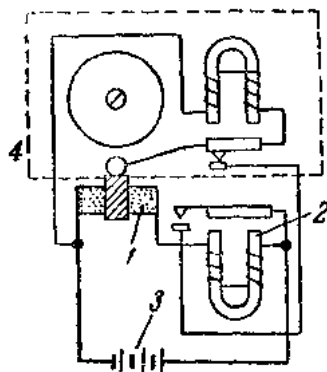


圖 2. A.C.波波夫所發明的第一部無線電信號接收機的電路。

1—帶有橡皮圈的金屬屑檢波器；
2—繼電器；3—電池；4—電鈴。

爲了使金屬屑檢波器恢復它在信號開始作用以前所有的高電阻狀態，就必須抖動它。

將金屬屑檢波器的外殼和電鈴的鈴錘相接觸，A·C·波波夫就克服了這一缺點。流經金屬屑檢波器的電流流過繼電器，就使電鈴動作起來（圖2）。當高頻電壓加到檢波器上時，它的電阻就減小。通過檢波器的電流也就增加，而使繼電器的觸點閉合，接通了電鈴的電路。電鈴的鈴錘開始振動，它撞擊檢波器的外殼，因而抖動了鐵粉。假使電磁信號繼續作用，則在抖動後，金屬屑檢波器的電阻立刻又變得很小，於是鈴響繼續不已。倘若信號停止，則在抖動後，檢波器的電阻便升高，使繼電器的觸點分開，並切斷了電鈴的電路。

A·C·波波夫所發明的這套裝置使他有可能裝成一部無線電接收機，利用這部接收機他於1895年5月7日在俄國物理—化學學會的大會上表演了第一次無線電信號的收發。

金屬屑檢波器、繼電器、及電鈴等這一套裝置在A·C·波波夫的接收機內起了將高頻電磁信號變成低頻電流的變頻器的作用，亦即起了檢波器的功用。

在A·C·波波夫晚年所從事的進一步改善無線電報的工作和關於無線電話的實驗中，他又發現了金屬屑檢波器的某些新特性。這些特性使他提出了一種新型的檢波器。A·C·波波夫於1900年1月召開的第一屆全俄電機工程人員代表大會上所作的報告中報導了這種新型的檢波器，並在1900年2月12日獲得了它的專利權[參考文獻1]。

A·C·波波夫稱這種新的檢波器為改良的金屬屑檢波器。它實際上就是一個普通的晶體檢波器。以後在無線電收音技術的發展上它曾起過很重要的作用。這種新的檢波器是由A·C·波波夫在下述情況下發明的。在某一次和他的同事П·Н·雷布金和А·С·特隆次基所共同進行的實驗中，波波夫發覺，利用與金屬屑檢波器串聯的耳機，可以直接聽到從火花無線電報發送站的信號。這種效應只有在信號不大強烈的情況下才能觀察到。在這種條件下，耳機內可聽到火花信號的聲音，即頻率等於發射機在一秒鐘內火花放電次數的音調。在微弱信號的作用下，金屬屑檢波器的電阻雖然不能降到像強烈信號作用時那樣低的數值，但是在信號停止以後，它可以回復到信號作用前的原有數值。A·C·波波夫對金屬屑檢波器在信號作用期間的電阻估計為1000至10000歐。注意到這種現象以後，A·C·波波夫又發覺，當金屬屑檢波器的電極是用與金屬針接觸的石墨製成的時候，所得效果最為良好。

因此從作用的特點和技術特性方面看來，A·C·波波夫的改良金屬屑檢波器和晶體檢波器是完全一致的。照A·C·波波夫看來，高頻衰減振盪變為低頻振盪的過程是發生在石墨表面和金屬尖端間的接觸處。這就表示，A·C·波波夫的改良金屬屑檢波器和以後在無線電接收設備中用來達到同樣目的的晶體檢波器沒有任何區別。

因此無線電發明人A·C·波波夫最先利用了半導體和金屬間的點接觸來完成無線電收音機中的信號檢波作用，也就是最

先利用了接觸層的電阻能隨着其上所加電壓的大小而改變的能力。金屬層檢波器改進後事實上就等於 A·C·波波夫發明了晶體檢波器，因為只有從構造形態上看來，它才和以後幾年內應用在無線電工程中的檢波器有所不同。

晶體檢波器在無線電工程中的進一步的應用 無線電工程以後的發展使晶體檢波器一致公認為接收設備中能保證對接收信號起反諧幅作用所不可缺少的重要元件。在第一次世界大戰以前，一切商用和軍用的接收設備中總是裝置着晶體檢波器，它相當了將高頻信號變為低頻信號的變頻器的任務。

在第一次世界大戰時期內，無線電工程中開始採用電子管了，出現了第一批電子管檢波器。最初用來檢波的是二極管，後來則也用三極管。和當時的晶體檢波器比起來，電子管檢波器具有一主要優點。它能保證收音機可靠和穩定地工作，這是依靠當時的晶體檢波器所不能辦到的。

在那個時候，晶體檢波器都是用各種礦物的自然結晶體製成的，例如方鉛礦、紅鋅礦、黃鉄礦和其他一系列電導率低的礦物（半導體）。當其中某一種半導體和繞成彈簧形的細金屬絲的尖端形成點接觸時，就能獲得檢波效應。但並不是晶體表面的所有各點都具有同樣的《靈敏度》。只有當彈簧輕輕地壓在晶體表面上時，檢波作用才最為良好。因此值機員在調整收音機時，除了要調諧高頻迴路外，還要調節檢波器，因為在當時所用的檢波器內，晶體和金屬彈簧之間還沒有固定的觸點。彈簧通常固定在球形的特種鉸鏈上，使我們能夠用手來調節觸點

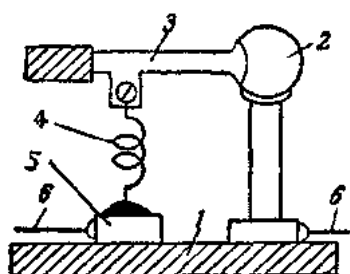


圖 3. 晶體檢波器的典型構造
1—底座；2—裝置鉗鏈的支柱；
3—杯桿；4—接觸彈簧；5—裝晶
體的容器；6—引線

(圖 3)。觸點總是很不穩定的，容易由於震動而鬆脫，以致檢波器不能工作。

這樣，晶體檢波器雖在無線電工程的發展初期中起過巨大的積極作用，但同時也具有一系列的缺點，隨着對於接收機的要求日趨嚴格，這些缺點也就更明顯了。上面講過，晶體檢波器的主要缺點就是工作的不穩定和調節起來很複雜。

電子管沒有這些缺點。因此儘管它的價格高昂並且供電比較複雜，在第一次世界大戰期間，商用和軍用收音機都開始採用了電子管。三極管的應用還能增加電子管檢波器的靈敏度，它可以同時用作為檢波器和放大器。

此外，電子管還宜於對強烈信號進行檢波。這點是晶體檢波器所不能辦到的，因為在強烈信號的作用下，晶體檢波器很快就會損壞。同時高頻放大器的採用和後來超外差式收音機的發明使得加在收音機檢波器上的高頻電壓的電壓相當高。在這種情形下，電子管檢波器比晶體檢波器好的優點就很明顯了。在第一次世界大戰以後的時期內，主要的特點是電子管技術的發展無比迅速，晶體檢波器事實上已從商用通信和軍用的無線電收音機中被排擠出來。自 1922 年起，蘇聯的工業已開始生產電子管的無線電廣播收音機，這些收音機大半都用電子管檢波

器來檢波。

當時在很多專家之間都存在着這樣的見解，他們認為使用晶體檢波器的時代已過去了。但是事實已證明，這種見解是十分錯誤的。直到現在為止，*A·C·波波夫*發明的晶體檢波器在無線電工程中仍在應用，而且在最近幾年內它還得到了特別重大的意義。

儘管在第一次世界大戰以後，接收設備中的晶體檢波器都能用電子管來代替。但它在無線電愛好者的收音機中繼續獲得廣泛的應用。和電子管收音機比較起來，礦石收音機的價格低廉，構造簡單，而且無需電源也能工作，這些優點使得礦石收音機許多年來仍廣泛地流行於無線電愛好者和無線電聽衆之間。利用良好的天綫和調諧迴路，無線電愛好者用礦石機也能收到很遠的電台。

***O·B·洛謝夫*的晶體再生器** 在以 *B·H·列寧* 命名的 *尼日哥羅得* 實驗室工作的、以前是無線電愛好者的 *O·B·洛謝夫* 於 1922 年間做出了一個偉大的發現，這發現在蘇聯國內和國外都得到了公認，並激起了人們對於晶體檢波器的興趣。當 *O·B·洛謝夫* 在蘇聯科學院通信院士 *M·A·蓬奇—布羅也維奇* 和 *B·K·列別金斯基* 教授指導下進行晶體檢波器的研究工作時，他發覺晶體檢波器的某幾種晶體的特性曲綫含有負電阻的一段，就是說增加通過晶體檢波器的電流將引起其上電壓的降低。當時大家已經知道，具有這種電流電壓特性曲綫的系統能夠用來作為振盪器。特別是在無線電工程中，高頻電弧振盪器已為大家所知

道，這種振盪器就是以電弧的特性曲線的負電阻的現象為基礎的。

O·B·洛謝夫提出了他所發現的晶體檢波器的新特性的用途，他建議利用它們來製成再生式收音機和無電子管的高頻及低頻振盪器。O·B·洛謝夫的再生式礦石收音機的電路稱為晶體再生器。這就是一個不用電子管而用晶體檢波器的收音機，其靈敏度比單管再生式收音機稍差一些，但其選擇性並不較遜。

O·B·洛謝夫在晶體再生器電路內所應用的檢波器是由紅鋅礦和鋼絲組成的。紅鋅礦預先按照 O·B·洛謝夫研究出來的方法加以特種處理。在這種條件下，如果在檢波器上加以適當大小的直流電壓，則金屬彈簧和紅鋅礦表面上某些點的接觸可以使檢波器處於負電阻狀態。

從兩個觀點看來，O·B·洛謝夫的發現具有很重要的意義。第一，利用它所發現的檢波器的負電阻狀態，我們得到一種簡單的廉價方法，藉此能夠製成靈敏的收音機和功率小的振盪器。第二，O·B·洛謝夫所發現的現象是一件很重要而饒有興趣的事實。它可以使我們深入一步來研究發生於晶體檢波器的接觸層之間的過程。

從另一觀點來看，O·B·洛謝夫的工作也具有很重要的意義，他的工作第一次推動了人們去更廣泛地應用檢波器的接觸特性。如果說 A·C·波波夫第一個應用了金屬與半導體的接觸作用來檢出無線電收音機中的信號，那麼可以說 O·B·洛謝夫第

一個應用了這種接觸作用來放大信號和產生振盪。毫無疑義，O. B. 洛謝夫的工作對於現代基於接觸作用的半導體設備的發展，尤其對於晶體三極管的發展，起了很大的作用。依照晶體再生器電路裝成的收音機若干年來頗受無線電愛好者的歡迎，因為這種沒有電子管只要兩三個小電池作為電源的電路可以代替單管再生式收音機。至於依照晶體再生器電路裝成的振盪器在當時並不風行。這是因為振盪器主要是應用在測量技術中，所以在運用的穩定性和可靠性方面的要求比洛謝夫的晶體檢波器內的振盪器所能滿足的要更高些。要在晶體檢波器中找出具有負電阻的觸點是很不容易的。紅鋅礦表面和彈簧接觸的壓力應該很小，所以觸點很容易鬆脫。因此，儘管電子管振盪器的價格較貴，但是對用於測量上來說，它還是比較合式的。

我們應當着重地指出，目前情況已有本質上的改變。現在我們已能夠做出幾種晶體檢波器，它們的特性曲線的負電阻段特別明顯，而且還具有固定的觸點。在這些檢波器中值得注意的是銻檢波器，它可以用來製造無電子管的測量用振盪器，它是根據O. B. 洛謝夫最初提出的原理而工作的。

在五年計劃的幾年中，蘇聯電真空工業的發展使得各種類型的電子管的出產數量飛速增加，並且還降低了它們價格。濾波程度良好的整流系統的採用和旁熱式電子管的生產使我們已能夠完全使用交流市電作為無線電接收設備的電源。

自從我們能夠製造具有高度選擇性和輸出功率足以推動揚聲器的多管收音機以後，用品體檢波器來代替電子管檢波器已

成爲不合理的事了。用晶體檢波器來代替多管收音機中的電子管檢波器並不能使價格降低多少，因此也沒有多大意義。在收音機中使用晶體檢波器限制了應用高頻放大的可能性，所以也限制了收音機的選擇性。在超外差式電路中採用晶體檢波器顯然是不適當的。

在這種條件下，不論在蘇聯的城市地區或有交流電網的鄉村地區，電子管收音機已逐漸將收聽無線電廣播用的礦石收音機排擠出去了。

晶體檢波器的新穎應用 但是我們不應當認爲晶體檢波器已完全被電子管排擠出去而被遺忘。從兩個觀點來看，晶體檢波器仍舊是值得注意的。

第一，它吸引了對發生在檢波器接觸處的過程感到興趣的物理學家的注意。直到現在爲止，晶體檢波器的作用還不十分清楚。爲了對發生於晶體檢波器接觸處的現象建立一明確概念起見，很多學者曾做了許多工作。在這方面應指出，蘇聯物理學家所進行的工作具有無比重要的意義，特別應指出 A.Φ. 約飛院士領導的一批物理學家以及 B. E. 拉喜卡連夫教授與他的同事。在這一領域中蘇聯學者的工作具有領導的意義。

第二，在研究超高頻時，仍使用着晶體檢波器，因爲它最宜用於超高頻。這是因爲，它的輸入電容和電荷通過晶體檢波器的時間遠小於電子管。由於這些原因和其他一系列的優點，用晶體檢波器來研究超高頻比電子管還來得合式。在偉大的衛國戰爭時期中以及在戰後時期內，由於雷達、放射光譜學、與

其他應用的發展，研究超高頻的興趣激烈上升。由此不難瞭解，為何這些年來晶體檢波器重新吸引了人們的注意。

在近代的公分波接收機中，晶體檢波器可以完成不同的功用。在公分波的頻帶中，利用諧振方法來增強收到的高頻信號在目前實際上還做不到，但晶體檢波器通常能擔當在接收機輸出端將高頻信號變為中頻的變頻器的任務。除了這一基本應用之外，晶體檢波器還往往可用作視頻脈衝檢波器，即持續時間在 10^{-6} 秒左右而發送波長在公分波範圍的短促脈衝檢波器。晶體檢波器能將這種脈衝變為持續時間相同的直流脈衝，然後用寬帶放大器放大之。晶體檢波器在無線電指標站的接收機中往往擔當這一任務。

自從偉大的衛國戰爭開始以來，晶體檢波器的研究工作也開始加緊了，開始研究發生於晶體檢波器內部的物理現象，並開始設計新的檢波器。這種新的檢波器沒有老式檢波器所特有的一些缺點。研究結果證明：將特殊處理的矽和鍺作為檢波器內的半導體可以獲得最良好的效果。所以目前矽和鍺的檢波器最為風行。

新型的晶體檢波器的觸點用不到調節。在製造檢波器時金屬彈簧的尖端和半導體之間的觸點就已經加以固定。檢波器裝在插座內，內部再灌以特種蠟質絕緣物。依靠這種方法，接觸彈簧和半導體的相對位置在使用檢波器時就不會改變。新型晶體檢波器的插座形式如圖 4 所示。

圖 5 中介紹了兩種陶質插座的形式。這種插座通常適用於

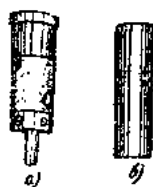


圖 4. 新型晶體檢波器的插座外形
a—陶瓷插座; b—同軸插座

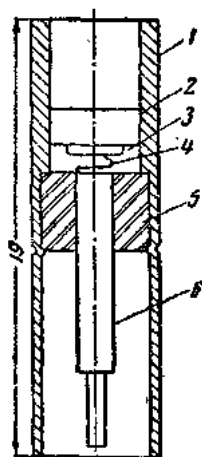


圖 6. 同軸插座的結構

1—外部導體; 2—銷釘; 3—砂; 4—接觸彈簧; 5—絕緣墊圈; 6—內部導體

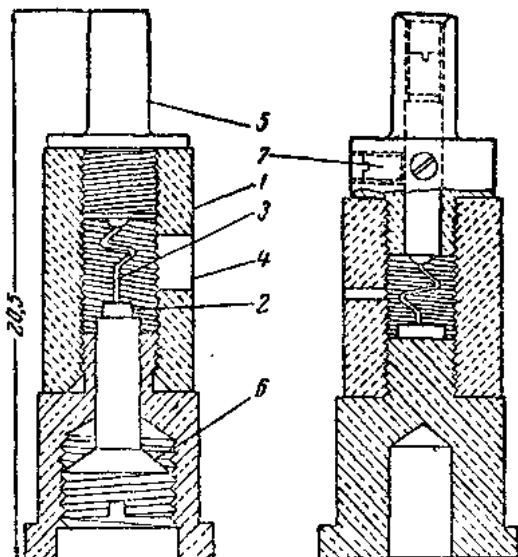


圖 5. 陶瓷插座的結構

1—陶瓷外殼; 2—砂; 3—鎔製接觸彈簧; 4—爲了在空腔內填塞絕質, 在陶瓷外殼上特設的空洞; 5—插頭腳; 6—螺絲帽; 7—將彈簧固定在需要位置的固定螺絲

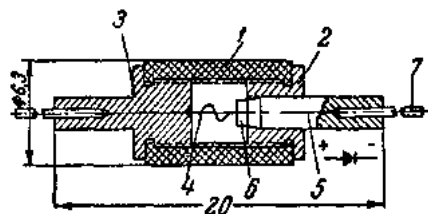


圖 7. 國產 2A1-114 鎢二極管的構造和外形
1—陶瓷親管; 2和3—金屬法蘭盤; 4—鎔製彈簧; 5—晶體握持器; 6—鎢; 7—接觸頭

波長為 3 公分的波段。

對於波長為 1 公分的信號，我們用金屬同軸插座（圖 4, 6）。它們還能夠用作為波長在 3 公分範圍內的視頻檢波器。同軸插座的構造一般是做得差不多和同軸電纜的形式相仿，它的波阻抗具有一定的數值（通常為 65 歐）。同軸插座的構造示於圖 6 中。

圖 7 中所示的是國產 $4I-U4$ 型鎢二極管的外形和構造（參考文獻 2）。

鎢二極管具有若干獨特的性質，因此它可以用在若干為其他類型晶體檢波器所不能勝任的場合中。沿導電方向通過鎢檢波器的電流很大。鎢檢波器在這一方向的電阻遠小於其他的檢波器。當較高的外加電壓（50—200 伏）反向加在鎢檢波器上時，它的逆向電阻很大；當電壓更高時，特性曲線上就出現了很明顯的負電阻段，這相當於 $O \cdot B \cdot$ 洛謝夫在紅鋅礦中發現的負電阻段。由於能利用鎢檢波器特性曲線的所有這些性質，它就開始應用在電子管電路中作為小功率二極管的代用品。目前這種電路很多。

採用鎢二極管可以降低設備的價格，減小它的尺寸，和節省電能的消耗。鎢二極管的特性曲線的負電阻段已採用於無電子管的小型振盪器電路中。這種振盪器在原理方面和 $O \cdot B \cdot$ 洛謝夫的振盪器毫無區別。不同點僅在於新型的具有插座結構的檢波器因為改用鎢來代替紅鋅礦，所以這種振盪器的穩定性和可靠性遠高於 30 年前 $O \cdot B \cdot$ 洛謝夫時代的振盪器所能辦到的。