

# 速 調 管

清华大学無線电系电子器件教研組譯

人民邮电出版社

73.86

КЛИСТРОНЫ  
 ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО  
 ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
 Е. Д. НАУМЕНКО  
 СОВЕТСКОЕ РАДИО 1952

龙  
136

速 调 管

譯 者: 李 傳 信 張 克 潛  
 出版者: 人 民 郵 電 出 版 社

北京东四6条13号

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八号)

印刷者: 北 京 市 印 刷 一 厂  
 發行者: 新 华 書 店

开本850×1163 1/4	1958年8月北京第一版
印张7张 頁数114	1958年8月北京第一次印刷
印刷字數192,000字	統一書号: 15045·总783—無202
印数1—3,100册	定价:(10)1.20元

7035/01

### 內 容 提 要

本書共分七章，專門討論速調管，首先討論各種類型超高频电子管的应用，进而討論超高频电子現象，再逐步进到空腔諧振器及速調管中的电子群聚理論，最后很詳細地討論了速調管放大器，倍頻器与振盪器等。

這本書可供大学無綫电系师生参考，也可供無綫电工程师及研究人員参考。

# 目 录

<b>第一章 緒論</b> .....	1
1. 超高頻电子管 .....	1
2. 厘米波領域 .....	2
3. 厘米波技术 .....	4
4. 厘米波电子管的主要类型 .....	6
5. 速調管和超高頻三極管的比較 .....	12
<b>第二章 各种类型的厘米波电子管的应用</b> .....	13
1. 混頻器 .....	13
2. 放大器 .....	14
3. 倍頻器 .....	19
4. 振盪器 .....	21
<b>第三章 超高頻电子現象</b> .....	26
1. 超高頻頻段的主要电子現象 .....	28
2. 运动电荷所感应的电流 .....	33
3. 电子流的控制 .....	35
4. 在窄縫情况下的基本关系式 .....	44
5. 大电子速度的情况 .....	53
6. 低速电子在隙縫中运动的情况 .....	61
<b>第四章 超高頻振盪綫路中的基本現象</b> .....	74
1. 空腔諧振器 .....	74
2. 在基本型时諧振腔中的电场 .....	88
3. 激励空腔諧振器的主振盪型 .....	96
4. 柵極上的高頻損耗 .....	100
<b>第五章 速調管中电子速度的調制与电子的羣聚</b> .....	101
1. 引言 .....	101
2. 电子速度調制和羣聚的初步理論 .....	102
3. 速調管中的去聚 .....	110

4. 隙縫电压的振幅值和直流加速电压相比不可忽略时与任意特性的羣聚空間中的羣聚情况	118
5. 隙縫間渡越角对羣聚的影响	124
6. 隙縫电压与加速电压可比拟时的羣聚情况	132
7. 隙縫电压与加速电压可比拟时羣聚过程的分析	135
8. 多級羣聚	140
9. 存在諧波相位調制或振幅調制时的羣聚	145
10. 电子相互作用系数 $M$	147
<b>第六章 放大速調管</b>	<b>158</b>
1. 直射速調管的类型	158
2. 小訊号放大器的一般关系式	159
3. 小訊号双腔速調管放大器增益	161
4. 小訊号速調管放大器的噪声	167
5. 双腔速調管——功率放大器、羣聚的条件	171
6. 速調管功率放大器的一般关系式	173
7. 双腔速調管理論与实验的比較	178
8. 多級电压放大速調管	182
9. 多級电压放大器的增益与实验的比較	189
10. 多級速調管功率放大器	192
<b>第七章 倍頻速調管与双腔速調管自激振盪器</b>	<b>197</b>
1. 倍頻速調管	197
2. 理論与实验的比較	202
3. 双腔速調管振盪器	207
4. 自激条件	209
5. 导納圖	214
6. 振盪器的一般特性	216

# 第一章 緒 論

近二十年来<sup>①</sup>，無綫电通信、無綫电測位和电视的發展日益要求应用更高的頻率。在这个时期中很長的一段时间內，更高頻率的需要是由于多路無綫电通信的發展而产生的。对于無綫电測位來說，是由于要使小型天綫具有尖銳的方向性而提出这个要求的。超高频技术領域中的成就是在創制了具有足够高的效率的振盪电子管的基础上获得的。

## 1. 超高频电子管

普通电子管的工作頻帶上限决定于下列因素中的一个或几个：

1) 引綫电感，2) 电子在电極間的渡越時間，3) 能量的輻射損失，4) 管子的电極必須小，但又要能散去一定的热量。减弱这些因素的影响，就可以在普通电子管的制造工艺下获得显著的进展，使电子管可以产生直到几百兆赫的頻率。

在厘米波段，采用了完全新的电子管結構和新的工作原理。全新的电子管結構几乎可以完全消除上面列举的前三个因素的影响，并且减弱了第四个因素的作用。厘米波段的电子管与普通电子管之間的基本区别在于：~~空腔谐振器式的振盪系統~~成为电子管本身不可分的一部分，这就可以免除由于引綫电感和輻射損失所产生的現象。厘米波段电子管与普通电子管的进一步的区别就是应用了新的电子学原理。控制电子过程的基本規律是可以应用在所有頻率的，但是高频时和低频时發生的現象的特征是不同的。在超高频时电子流还在各电極間的作用空間里和~~高频場~~存在着能量交換的現象，而不是等到电子落在电極上时才交換能量。超高频电子管与普通电子管的区别还在于电子渡越時間成为有限量（即不等于零了）。在普

<sup>①</sup> 譯者註：原書出版于1948年，因此所指的近二十年系指1948年以前的二十年，下同。

通电子管例如三極管中当提高頻率时渡越時間是有害的。然而在速調管和磁控管中渡越時間却成为其工作原理的基础。大多数厘米波段电子管的構造与普通电子管的構造有很大的差别，以致于它們之間唯一类似的元件就只有連接电源用的标准管底了。新型电真空器件的工作原理和設計方法所取得的巨大成就使得近年来在無綫电通信和其他技术領域中所应用的無綫电頻譜至少扩展了三十倍。除此以外，厘米波技术的进展还使提高能量輻射的方向性成为可能，因而使得利用能放在飞机上的小型天綫就可以得到角度差不多只有一度的波束。在研討厘米波电子管的各种問題以前，我們先簡單地看一下这个波段的特点。

## 2. 厘米波領域

**頻率範圍** 首先应当指出，厘米波的頻率範圍决定于用以产生和傳輸这一波段的电磁波的設備的特点，而沒有一个明确的頻率界限。这个波段的無綫电技术的特点是应用了具有分佈常数的电路，而在低頻率时是用具有集总常数的电路的。普通的电路元件（电容器、綫圈和电阻器）在这样高的頻率下已經不能認為是只有單純的电容、电感和电阻的元件了。超高頻設備可以按照頻率的不同分为兩类，即 300 到 3000 兆赫的波段（波長从 1 米到 10 厘米，即所謂分米波段）和高于 3000 兆赫的波段（厘米波段）。这种划分方法还没有确定。

空腔諧振器甚至可以应用到 100 兆赫或者更低的頻率；只是在这种情况下它太龐大就是了。波导可以用到低于 600 兆赫的頻率。另一方面，对于高于 1000 兆赫的頻率，有时也采用具有类似于集总常数迴路的开式迴路的振盪器。从以上的例子可以看出，没办法确定波段的严格的界綫。实际上可以認為，超高頻的範圍差不多是从 1000 兆赫直到 30000 兆赫以上的頻率，更精確地說就是直到与紅內綫交界的頻率。在本書中所研討的大多数情况都是在 1000 到 30000 兆赫的頻率範圍內（相当于波長 30 厘米到 1 厘米）。

**厘米波段电磁波的性質** 从物理光学的定律中我們知道，只有在輻射器的尺寸比波長大的时候才可能得到有方向的束狀輻射。因此，在天綫尺寸不大的情况下要得到方向性很尖銳的波束必須应用足够短的电波。这就是超高频的主要优点。这个波段的第二个也很重要性的性質就是可以运用的頻帶非常寬。

超高频波的傳播实际上是限于直接可見的範圍內。但是由于散射和折射作用也有些場的能量傳播到直接可見範圍以外去。在合适的气象条件下大气的反射可以使电波沿地面傳播到很远的距离，比直接可見距离大好几倍。

厘米波段的电波在水面和金屬物体表面上会發生强烈的反射。在各种土壤和其他物体上这种电波也有不同程度的反射。因为有反射的关系，故在某些远的地点所接收的电波，除去直接的波束外还有一个或几个反射波。由于电波是經過不同的途徑达到这一点的，因此就产生了干涉圖。当兩波束的路徑之差等于半波長的整倍数时就發生抑制干涉，也就是信号的衰落。

**厘米波段接收机的性質** 在以后的几章中將要具体地說明，为何至今还没有令人滿意的电子管可以作为超高频頻帶的放大器。在对灵敏度要求很高的接收机中必須应用外差的原理。这种接收机的混頻器几乎总是应用晶体檢波器（普通是由鎢絲和硅晶体構成的）。虽然晶体混頻器在变频时总有一些損耗，但是与現有的电子管比較起来还是用它較为合适。在低频时应用多柵管作为变频器通常既有混頻作用又有放大作用。但超高频頻帶的变频器給出的中頻信号的功率却比輸入信号的功率小。这种变频器的衰减可以在以后由中頻放大器来补偿。必須指出，晶体混頻器在变频时虽然引起了損耗，但是它本身的噪声是非常小的。

在頻率不太高时接收机的灵敏度通常是受外部噪声电平所限制的。外部噪声的主要来源是大气干扰（例如，远处的大雷雨）和电气设备的火花。在“噪声”地区接收机的灵敏度高是无用的，而在“靜”的地区接收机的灵敏度高就能保証接收極微弱的信号。当頻率



增高时外部噪声越来越小，这有两个原因：1)只有差不多是在可见距离以内的噪声源才起作用。2)在电火花的频谱中不包含超高频。但是当频率提高时接收机内部的噪声源仍然是存在的。这就是说大部份的噪声是在接收机的第一级中产生的。在超高频频段，特别在波长较短的一部分，外部干扰不是限制接收机灵敏度的因素。灵敏度是被发生在接收机本身的噪声所限制的。

**噪声系数** 内部噪声的存在促使我们引用噪声系数这个概念，用它来比较实际接收机与理想接收机。这个概念并不限于应用在超高频接收机的范围，也可以应用到许多其他的仪器中，例如检流计。

在理想接收机中唯一的噪声源（接收机内部的）就是输入电阻的热运动噪声。这种噪声的数值可以根据热力学计算出来，若此接收机的通频带为  $\Delta f$ ，那么它的噪声功率将等于  $kT\Delta f$  瓦，其中  $T$  是绝对温度， $k$  是波兹曼常数，它等于  $1.38 \cdot 10^{-23}$  瓦·秒/度。

实际接收机中有许多附加的噪声源，这些噪声源增加了输出端的总噪声。按照定义，机器的噪声系数等于输出噪声的总功率与仅仅由于输入电阻而产生的输出噪声的功率之比。噪声系数也可以视为最小输入信号的功率与噪声功率  $kT\Delta f$  之比（当在输出端信号功率等于噪声功率时）。如果有一些能产生自身噪声的器件依次级联，那么前面一级的噪声就被后面几级放大。这时算噪声系数时就要将各点所发生的噪声折算到公共输入端的噪声。噪声系数通常用分贝表示。理想器件的噪声系数等于 1，用分贝来表示则为零分贝。

外差式接收机的噪声系数决定于变频器和中频放大器。当变频器前面有高频放大器时，如果高频放大倍数很大，以致把变频器的噪音折合到输入端的噪声可忽略不计时，那么整个接收机的噪声系数就仅由高频放大器的噪声来决定。

### 3. 厘米波技术

**同轴线和波导** 在超高频频段，因为有辐射损耗，所以各种形式的开线是不采用的（用作天线时除外）；而只是采用同轴线和波

導。同軸綫其實也是一種波導，但是分用兩個名詞可以比較明確和方便，因為這樣可以區別開有沒有心綫。在同軸綫中為支持心綫，採用了損耗很小的電介質，或四分之一波長的短綫段。當要求往遠距離傳送大功率時，後一種支持心綫的方法是較好的。但是，當損耗不起主要作用時，例如，在近距離間傳送小功率時，則用電介質支持心綫更方便些。

任何截面形狀的空心導體或者實心的介質棒都可以用作波導，只要它的橫向尺寸不比所傳輸的電波的波長（在空氣中的）小得太多就可以了。在這種波導里可以激勵出各種的振盪型。但是除開極少的情形以外，實際上用的波導都是矩形截面的金屬空管，它的較大的邊的尺寸（內部的）是在半個波長到一個波長之間（指在空氣中的波長），也就是說工作在基本型。與同軸綫相比波導具有很多優點，因為沒有心綫，所以怎樣支持心綫的問題也就不存在了。

用波導可以傳送很大的功率尚不致有击穿之虞。但是在波導中有彌散現象，即電磁波傳播的相速與頻率有關。這在傳送寬頻帶時就會引起不良的後果。

**空腔諧振器** 大家都知道，一段兩端封閉的同軸綫或波導，它的長度如果等於半波長，則它的性質就與一個諧振電路相同。由於它既沒有輻射和介質損耗，而壁的面積又很大，因此這種諧振電路的品質因數  $Q$  可以比普通由集總的電感和電容組成的迴路的品質因數高很多。可以說，被導體面所包圍的區域所形成的諧振空腔中，對應於不同的振盪型存在有無窮個諧振頻率。通常我們只注意具有最低諧振頻率的振盪，但不考慮到其他的振盪型的存在是不安全的。

普通的具有集總常數的迴路的性質決定於電阻電感和電容的數值。這些性質同樣也可以用諧振頻率，品質因數  $Q$  和并連等效電阻來表征。在厘米波段這幾個參量也可以很方便地表示出諧振腔的性質。在這個波段里應用  $R$ ， $L$  和  $C$  的概念已經不方便並且不準確了，因為準確地確定諧振腔某一部分的電感或者電容一般是不可能的。因此，當用具有集總常數的等效電路來表示空腔諧振器的性質

时必须谨慎从事。

显然，空腔谐振器的可能形式是很多的。例如为了作波长计时应用圆波导中的高型振盪，因为这样用可以比低形振盪有更高的品质因数。在电子管中谐振腔应当满足下列两个要求：1) 谐振腔的几何尺寸必须适合所要求的谐振频率，2) 必须有一个空间，在那里电子流可以有效地与交变电场相互作用。为了满足第二个要求，空腔谐振器应当有一部分电场比较强的空间，同时这一空间沿电力线方向的距离应当很小，使得电子渡越这段空间所花的时间小于振盪周期。因此，用在厘米波电子管中的空腔谐振器必须有一个类似于普通电容器的区域（即电子流与交变电场发生相互作用的隙缝）。所以当研究这种谐振腔时通常可以采用具有集总常数的等效线路。

**重入式空腔谐振器** 由于知道了必须有一隙缝使电子流与高频场有效地相互作用，引导我们去创造一种重入式空腔谐振器。这种谐振腔就是一个中心部分伸入得差不多相互接触的圆筒。这种谐振腔的两个极限形状一个是很短的圆筒它的伸入部份极不显著，另一个是一端短路而另一端是工作隙缝的同轴线。后者可以看成是一个四分之一波长的短路线，而在开路的一端连接着由工作隙缝所形成的电容。在所有的情况下，形成工作隙缝的壁都有小孔，有时张成网栅状，都为的是保证电子流能自由地穿过。在厘米波段几乎无法把电子管与振盪回路分开来研究。因此，那些表征空腔谐振器的性质的量，诸如品质因数  $Q$ ，并联电阻和工作隙缝的大小等，都将在以后讨论电子管的各章中一并讨论。这三个参量以及谐振频率是由谐振腔的尺寸和其材料的电导率决定的。设计厘米波段电子管时主要要兼顾到高值并联电阻和隙缝的有效相互作用。

#### 4. 厘米波电子管的主要类型

在现在应用于厘米波段的电子管有三种主要的类型：多腔磁控管、超高频三极管和速调管。

**多腔磁控管** 多腔磁控管的發明是厘米波技术的巨大進展。到第二次世界战争結束時已經可以制出 3000 兆赫脉冲功率達 1 兆瓦、連續功率達 1 千瓦的磁控管了。

**高頻三極管** 具有盤形引綫結構的电子管的制成，克服了三極电子管用于超高频的困难。这种管中很著名的一种就是“灯塔管”（由其外形而得名），它的各極和低频电子管具有圓筒狀結構不同，而是平板形的。

電極的引綫呈盤形，是与玻璃熔封起来的，整个管的結構使得它很容易插到諧振腔中去。在灯塔管中氧化物陰極放在圓筒形支持物的一端，它与柵極的距离約为十分之几毫米；陽極就是放在柵極另一端的圓柱的頂面。在圖 I.1 中是两种灯塔管（沒有諧振腔）。其中之一—2C40 的剖面圖画在圖 I.2 上。陽極引綫就是位于管頂部的一個小帽，柵極引綫是中間的盤，陰極則从管基引出。当这种管放到同軸綫形的諧振腔中时，引綫电感实际上已經消除，因为电子管

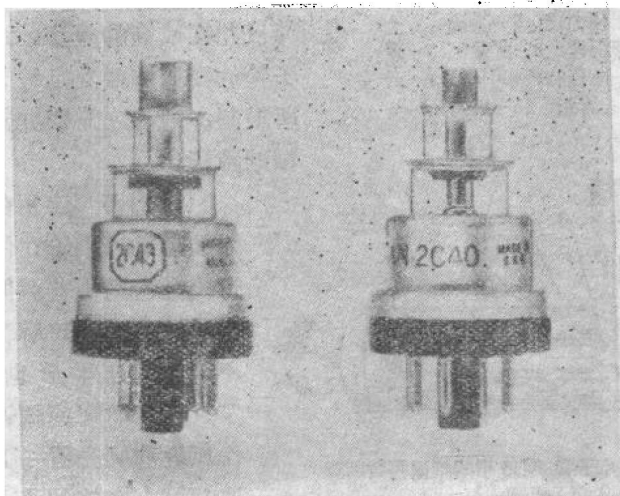


圖 I.1 灯塔管  
左—2C43，右—2C40

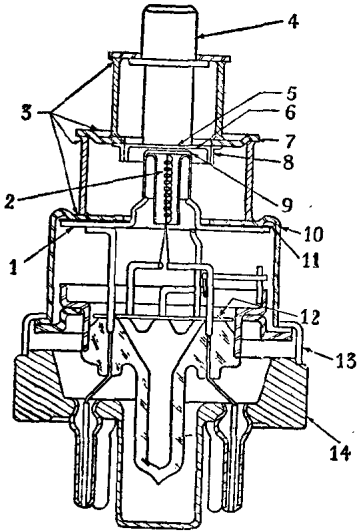


圖 I.2 电子管 2C40 的剖面圖

1—陰極支架；2—灯絲；3—金屬与玻璃熔封；4—陽極引綫；5—陽極；6—柵極；7—柵極引綫；8—屏蔽；9—氯化物陰極；10—陰極的高頻引綫；11—云母电容器；12—屏蔽；13—压边；14—入脚管基

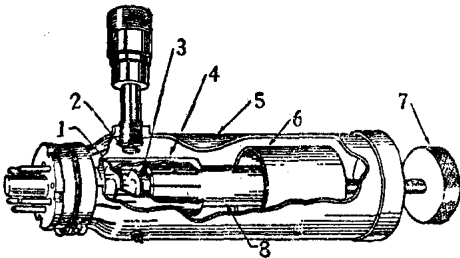


圖 I.3 为电子管 2C43 用的諧振腔截面圖  
(管子已插入)

1—柵極盤；2—能量輸出耦合元件；3—陽極帽；4—柵極导体；5—陰極导体；6—短路活塞；7—調諧旋鈕；8—陽極导体

的電極就是諧振腔腔壁的一部分。同时这种結構也消除了輻射損耗。为了能够显著地减小由于电子渡越時間所产生的有害效果，厘米波三極管電極間的空间应当非常小。例如，在圖中所示的 2C40 中，陰極和陽極的直徑是 4.6 毫米，陰極——柵極距离約为 0.1 毫米，柵極——陽極距离約为 0.3 毫米。

圖 I.3 表示 2C43 型电子管 (圖 I.1 中的一种) 裝在同軸綫型諧振腔中。厘米波三極管是普通三極管的發展，使它能应用在很高的頻率。这种电子管的發展主要受机械的困难所限制，因为它需要非常小的極間隙縫。

**速調管** 应用在超高频頻帶的速調管在作用原理上是与基于普通低频电子管的原理的灯塔管有所不同，并且外形也改变了。为了研究速調管的工作原理我們先看一下双腔速調管。在这种速調管中电子槍所發生的电子流首先被加速到很大的速度。

然后这电子流通过輸入諧振腔工作隙縫。在这个隙縫中电子得到正的或負的附加速度，这决定于电子渡越时隙縫上的高频电压的相位和振幅。輸入諧振腔有时称为“調制腔”。

經過輸入諧振腔隙縫后的电子具有不同的速度。經这个隙縫后电子进入所謂漂移空間或羣聚空間，在这个空間里各电子速度的差異轉变为电子密度的变化。由于每个电子的速度决定于它通过輸入諧振腔隙縫的时刻，因此那些获得正加速度的电子赶上了那些較早飞出的但获得負加速度的电子。这样在电子流里的电子就集聚成羣。已羣聚的电子流通过輸出諧振腔的工作隙縫，这个諧振腔有时称为“获能腔”。輸出諧振腔隙縫中的电子电流中的高频分量激励了这个諧振腔。

輸出諧振腔和輸出裝置类似于一个交連降压变压器，通过它把有用的功率傳送給負載。如果輸出功率中有一部分以一定的相位反饋給輸入諧振腔，則可以得到自激振盪的工作状态。

在所述的速調管作用原理中，电子流密度不是像在三極管中一样直接在很小的陰一柵空間里加以控制，而是通过間接的过程的。这个过程是在經過由下面三部份所組成的控制区域时完成的：1) 恆定場加速电子的区域；2) 輸入諧振腔的高频隙縫，在这里形成速度調制，和3) 电子羣聚空間，在这里电子速度調制轉变成密度的变化。这个新的控制密度的方法的最大的优越性在于：原始的控制(速度)是在电子被恆定場加速以后才进行的，而不是像三極管一样在加速以前进行。因此，虽然电子在三極管中通过陰一柵空間的时间以及在速調管中通过輸入諧振腔的工作隙縫的时间同样都必需小于一个振盪週期，然而在后一情况下电子是以較大的速度通过的。因此，就速調管來說，对于極間距离的要求就比較低了，而可以达到的頻率上限至少增加了一个数量級。粗看来虽当速調管輸入諧振腔的工作隙縫上的电压非常小的时候只要羣聚空間有足够長的距离就可以工作。但是考虑到散焦力的作用，經詳細分析，知道当增長羣聚空間时电子的去聚就大到不能容許的程度。因此，必須使羣聚空間的

長度力求減短而使高頻隙縫間的交变电压足够高，也就是讓諧振腔具有够高的并聯阻抗，這就要求諧振腔的品質因數  $Q$  很高。然而高  $Q$  使得兩個諧振腔——輸入的和輸出的——的互調問題變得更複雜了。因此在所有各種形式的速調管振盪器中最簡單的就是反射速調管。反射速調管與其他類型的速調管之間的主要差別在於它只有一個諧振腔，它既起輸入諧振腔的作用又起輸出諧振腔的作用。在反射速調管中電子在羣聚空間里受反射極電場的作用反轉回來（反射極是一個具有對陰極為負直流電位的電極）。在反轉回來的電子流中，因渡越時間的變化決定於速度而得到電子的密集與疏散。反射速調管的羣聚過程與雙腔速調管的差別就是相位差  $180^\circ$ ，其餘方面則是完全類似的。

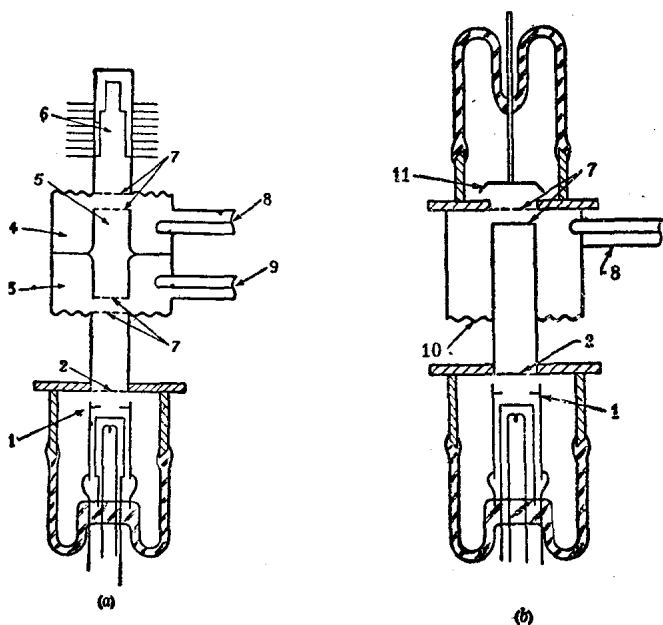


圖 1.4 雙腔速調管(a)和反射速調管(b)的截面圖

1—電子槍；2—加速柵；3—羣聚器；4—輸出諧振腔；5—羣聚空間；  
6—集電極；7—諧振腔的柵；8—輸出端子；9—輸入端子；10—軟  
膜片；11—反射極

在反射速調管的羣聚空間里較快的电子經過較長的路徑，因而比慢的电子耗費較多的時間。因此那些在高頻隙縫中受到斥拒的电子將要赶上那些較早通過高頻隙縫且得到正加速度的电子。

反射速調管只有在下述条件下才产生振盪，即在反轉的电子流里的电子羣到达工作縫隙的相位正好可以把能量傳給諧振腔高頻電場。改變反射極的电压或位置就可以得到这个条件。反射速調管和双腔速調管的原理圖画在圖 I.4 中。在圖 I.5 里是几种工業生产的速調管外形。

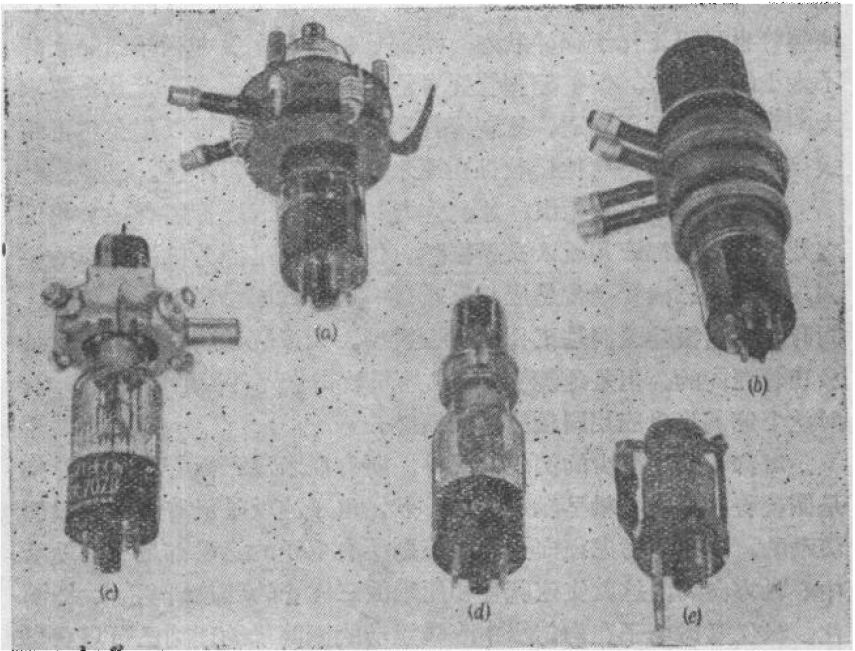


圖 I.5 几种速調管外形

*a*—反射速調管 417A; *b*—双腔速調管 410R; *c*—帶外諧振腔的反射速調管 707B; *d*—不帶諧振腔的 707B; *e*—帶內諧振腔的全金屬型反射速調管 723A/B



## 5. 速調管和超高频三極管的比較

虽然厘米波段三極管与速調管的結構和作用原理都不相同，但它們仍然有許多共同之处。首先这些电子管的应用范围是一样的。其次在这些电子管中应用相类似的空腔諧振器。最后这些电子管都有一个直的軸对称的电子流。

**小功率厘米波电子管的应用** 厘米波三極管和反射速調管都用在厘米波段接收机中作为本地振盪器。这些电子管也可用作信号發生器或小功率發射机。厘米波三極管可很好地工作在脉冲情况下。速調管也可以工作于脉冲状态，特别是在脉冲宽度与脉冲間隔之比不太小的情形下。反射速調管还可以用为調頻振盪器，尤其在要求大的頻率偏移时更合适。速調管和厘米波三極管也可以用在超再生式接收机中，但是这种接收机在厘米波段中应用得不多。

**諧振腔** 以前曾指出，速調管与厘米波段三極管还有一个相似之处就是它們都应用重入式諧振腔。但是純粹是因为机械方面的原因，厘米波三極管通常是应用終端接一电容的同軸綫型諧振腔的。同时这种諧振腔照例是工作在主振盪型。大多数速調管的諧振腔是放在管壳內的。但是速調管 707B 是用放在管壳外面的諧振腔，有时这个速調管也应用同軸綫型諧振腔。

**对称** 除了很少的例外情况外，所有厘米波三極管和速調管都是圍繞着一个中心軸呈軸对称的形狀。电子流就是沿着这对称軸而流动的。如果不考虑徑向聚焦效应則所有电子的运动都是平行地沿中心軸方向的。这就使速調管和厘米波三極管的理論研究大大簡化。仅仅考虑电子在均匀場中直綫运动的極簡單的理論已可以获得实际应用上已够准确的結果。

**主要的差別** 厘米波三極管和速調管之間存在着的原則性区别，正像以前曾指出的，主要是控制电子流密度的方法不同。和这种差別相对应，就出現了两种类型的电子管：空間电荷控制的电子管和速度控制（或速度調制）的电子管。在空間电荷控制的电子管中