

内 容 简 介

本书一般介绍了无线电通讯和雷达等整机中使用的微波电子管及其发展过程和现状。本书着重于物理概念的介绍，避免了冗繁的数学分析；只讲述了实际工作中应用较多的器件（线型束管和交叉场器件）和使用这些器件时应注意的问题。

本书是为已经具有无线电基础知识和具有一定实践的技术工人、技术人员写的，可作为进一步研究微波电子管技术的参考书。

微波电子管概述

肖 羽 编

(限 国 内 发 行)

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张2 41千字

1974年7月第一版 1977年10月第二次印刷 印数：11,001—19,500册

统一书号：15034·1363 定价：0.24元

前 言

运动在发展中，又有新的东西在前头，新东西是层出不穷的。

电子学的发展正是如此。普通三极管的出现对于推动电子学及通信事业的发展曾起了极大的作用。它的基本作用是放大。在放大器中电子管和电路元件基本上是分离的。很长时间内，电子管是作为无惯性的元件而享有声誉。随着通信事业进入越来越高的频段，普通电子管就受到限制，超过一定频率时，它就不再具有放大作用。这种限制主要在两个方面。一是电子的惯性变得不可忽略，也就是说电子在电极之间的渡越时间和高频的周期可以相比拟了。第二个限制是电极本身及其引线的分布阻抗和外电路的阻抗也变得可以比较了。

电子管放大
的电流能保持

为了克服分布阻抗的影响，仔细设计电极结构，将管内的电极作为振荡回路的一部分，这就发展成所谓“灯塔管”和“陶瓷管”。现代微波管也无一不是将电路作为管子的一部分来考虑的。

为了克服电子惯性的有害作用，变有害为有利，这就要求打破原来普通管所谓“静态控制”的概念[●]，而代之以完全新的原理。

- 普通电子管假定电子运动没有惯性，电流随控制栅极电压的变化是一瞬间完成的，没有时间的滞后，栅极-阴极间的电场和静电场的作用相似，称为“静态控制”。考虑到电子运动的惯性，即电子的速度是有限的，电流与电压之间有相位差，这就称之为“动态控制”。

最早的微波管是速调管和磁控管，是所谓“动态控制”的。以此为基础迅速发展，大体上分成两大类，即O型器件和M型器件^①。按一般习惯，速调管、行波管、返波管等等属于O型器件，其特点是电子束的横方向没有静电磁场，也称线型注管或直形管。M型器件是指磁控管、泊管、前向波放大器等，其特点是直流电场和磁场方向互相垂直，而且又与电子束方向垂直，所以又称交叉场器件。

一切客观事物都是互相联系的。微波管的分类也不是绝对的。由于各种管型之间的技术渗透，它们之间的差别也变得越来越模糊。行波管与速调管的混合产生了所谓“行波速调管”(Twystron)及“分布作用速调管”，已经很难把它归成那一类。磁控管最初是作振荡器，自从发展了M型放大器之后，出现了名目繁多的类型，它们采用慢波结构，和行波管一样利用慢电磁波与电子束同步以实现能量交换，它和行波管或返波管在原理上是十分相似的。

以下简单介绍几种主要的微波管的基本原理，以及与使用这些管子有关的几个问题。本书着重于物理概念的叙述，而回避了较复杂的数学分析。对想深入了解微波管的读者，可以参阅这方面的专著。

本书原是为某学习班准备的讲稿，因有关方面要求略加整理、增添注释而成此书。由于编者水平有限，整理时间匆促，错误必定很多，希读者批评指正。

① O型器件及M型器件名称的来源取自法文 TPQ(Tubes à propagation des ondes) 及 TPOM (Tubes à propagation des ondes à champs magnétique) 的字母 O 及 M，原意是行波管及磁控的行波管，是行波管的分类，后来这个词被推广，将速调管也包括进 O 型管，磁控管等称为 M 型管。

目 录

前言	5
第一章 线型束管(O型器件)	7
1-1 从三极管到速调管	7
1-2 多腔速调管	10
1-3 反射速调管及漂移速调管	14
1-4 静电聚焦速调管	17
1-5 行波管	20
1-6 慢波线空间谐波	25
1-7 返波管	28
1-8 O型器件小结	30
第二章 交叉场器件(M型器件)	33
2-1 磁控管	33
2-2 交叉场放大器	39
2-3 M型器件小结	47
第三章 有关其他问题	50
3-1 聚焦	50
3-2 冷却	55
3-3 收集极降压	59
3-4 阳极调制和栅极调制	62
3-5 钛泵	63

内 容 简 介

本书一般介绍了无线电通讯和雷达等整机中使用的微波电子管及其发展过程和现状。本书着重于物理概念的介绍，避免了冗繁的数学分析；只讲述了实际工作中应用较多的器件（线型束管和交叉场器件）和使用这些器件时应注意的问题。

本书是为已经具有无线电基础知识和具有一定实践的技术工人、技术人员写的，可作为进一步研究微波电子管技术的参考书。

微波电子管概述

肖 羽 编

(限国内发行)

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张2 41千字

1974年7月第一版 1977年10月第二次印刷 印数：11,001—19,500册

统一书号：15034·1363 定价：0.24元

目 录

前言	5
第一章 线型束管(O型器件)	7
1-1 从三极管到速调管	7
1-2 多腔速调管	10
1-3 反射速调管及漂移速调管	14
1-4 静电聚焦速调管	17
1-5 行波管	20
1-6 慢波线空间谐波	25
1-7 返波管	28
1-8 O型器件小结	30
第二章 交叉场器件(M型器件)	33
2-1 磁控管	33
2-2 交叉场放大器	39
2-3 M型器件小结	47
第三章 有关其他问题	50
3-1 聚焦	50
3-2 冷却	55
3-3 收集极降压	59
3-4 阳极调制和栅极调制	62
3-5 钛泵	63

前 言

运动在发展中，又有新的东西在前头，新东西是层出不穷的。

电子学的发展正是如此。普通三极管的出现对于推动电子学及通信事业的发展曾起了极大的作用。它的基本作用是放大。在放大器中电子管和电路元件基本上是分离的。很长时间内，电子管是作为无惯性的元件而享有声誉。随着通信事业进入越来越高的频段，普通电子管就受到限制，超过一定频率时，它就不再具有放大作用。这种限制主要在两个方面。一是电子的惯性变得不可忽略，也就是说电子在电极之间的渡越时间和高频的周期可以相比拟了。第二个限制是电极本身及其引线的分布阻抗和外电路的阻抗也变得可以比较了。

电子管放大
的电流能保持

为了克服分布阻抗的影响，仔细设计电极结构，将管内的电极作为振荡回路的一部分，这就发展成所谓“灯塔管”和“陶瓷管”。现代微波管也无一不是将电路作为管子的一部分来考虑的。

为了克服电子惯性的有害作用，变有害为有利，这就要求打破原来普通管所谓“静态控制”的概念[●]，而代之以全新的原理。

- 普通电子管假定电子运动没有惯性，电流随控制栅极电压的变化是一瞬间完成的，没有时间的滞后，栅极-阴极间的电场和静电场的作用相似，称为“静态控制”。考虑到电子运动的惯性，即电子的速度是有限的，电流与电压之间有相位差，这就称之为“动态控制”。

最早的微波管是速调管和磁控管，是所谓“动态控制”的。以此为基础迅速发展，大体上分成两大类，即O型器件和M型器件^①。按一般习惯，速调管、行波管、返波管等等属于O型器件，其特点是电子束的横方向没有静电磁场，也称线型注管或直形管。M型器件是指磁控管、泊管、前向波放大器等，其特点是直流电场和磁场方向互相垂直，而且又与电子束方向垂直，所以又称交叉场器件。

一切客观事物都是互相联系的。微波管的分类也不是绝对的。由于各种管型之间的技术渗透，它们之间的差别也变得越来越模糊。行波管与速调管的混合产生了所谓“行波速调管”(Twystron)及“分布作用速调管”，已经很难把它归成那一类。磁控管最初是作振荡器，自从发展了M型放大器之后，出现了名目繁多的类型，它们采用慢波结构，和行波管一样利用慢电磁波与电子束同步以实现能量交换，它和行波管或返波管在原理上是十分相似的。

以下简单介绍几种主要的微波管的基本原理，以及与使用这些管子有关的几个问题。本书着重于物理概念的叙述，而回避了较复杂的数学分析。对想深入了解微波管的读者，可以参阅这方面的专著。

本书原是为某学习班准备的讲稿，因有关方面要求略加整理、增添注释而成此书。由于编者水平有限，整理时间匆促，错误必定很多，希读者批评指正。

① O型器件及M型器件名称的来源取自法文 TPQ(Tubes à propagation des ondes) 及 TPOM (Tubes à propagation des ondes à champs magnétique) 的字母 O 及 M，原意是行波管及磁控的行波管，是行波管的分类，后来这个词被推广，将速调管也包括进 O 型管，磁控管等称为 M 型管。

第一章 线型束管(O型器件)

1-1 从三极管到速调管

普通三极管在超高频波段就失去了放大作用。上面已经讲到基本原因有两条：一是电子有惯性，二是管内电极的寄生参量。

我们知道，电极间有电场就有电容，有电流就有电感，所以电极之间的寄生电容是不可避免的。开始曾用缩小尺寸的办法来减少电容，与此同时功率也相应地减少。另一个有效的办法是将电极电容作为振荡回路的一部分来考虑。在超高频波段，通常的谐振回路要用谐振腔代替，电极也就成为谐振腔的一部分。粗略地看，极间电容将充当谐振腔的电容部分，而外部则为电感部分，

电容
电感

图 1(a) 是超高频三极管放大器示意图，图 1(b) 是四极管放大器的示意图。

以上改进没有克服电子惯性的影响。为了减小电子的渡越时间，可以减小极间距离，但这样却增大了极间电容，同时在工艺上能做到的最小距离是有限的。另一个办法是提高电子的速度。可以设想，如

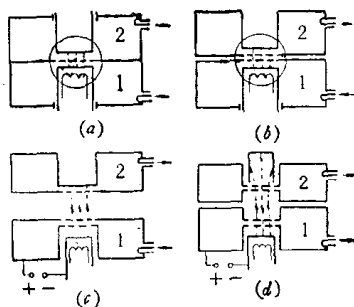


图 1 从三极管到速调管
a—三极管放大；b—四极管放大；c—过渡形式；d—双腔速调管。1—输入腔；2—输出腔。

图 1(c) 所示, 把阴极放在输入谐振腔之外, 并加上直流负高压, 那么电子在进入输入腔栅网间隙之前已经获得很大加速, 穿过间隙的渡越时间就可以大大减小。这样的结构与普通管已有本质的不同: 在紧挨着阴极的空间没有高频场, 阴极发射电流没有受到高频电压的调制, 而三极管正是利用栅极-阴极间的高频电压调制阴极电流, 从而也调制了板流, 才能实现放大的。

图 1(c) 的改进似乎是无益的。进一步研究发现, 电子流穿过输入腔的栅网后, 电流虽然没有受到调制, 但电子的速度受到了输入腔的高频电场的调制, 即电子在高频的负半周穿过栅网间隙时受到减速, 而在正半周穿过的电子受到加速。如果把输出腔与输入腔之间的距离拉大 (在超高频波段电场只存在于谐振腔的内部, 因此在两个腔之间的空间是没有高频场的, 称为“漂移空间”或“漂移管”), 电子在漂移空间继续行进的过程中, 快电子将逐渐赶上慢电子, 于是电子流变得有稀有密, 好像一群一群的, 这就是所谓“群聚”。图 2 表示了这一群聚过程, $z = 0$ 是输入腔的位置, 横座标表示时间, 每一根斜线代表一个电子的运动轨迹, 斜率大的代

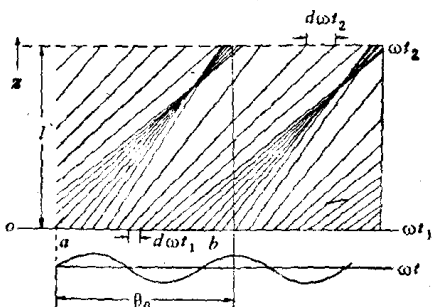


图 2 电子渡越的空间-时间图

表快电子，斜率小的代表慢电子，斜线交叉的地方表示快电子已经赶上慢电子，在输入腔电子（或电流）随时间的分布是均匀的，而在 $z = l$ 处表示输出腔的位置，显然其电流的分布是不均匀的，或者说是交变的。其交变分量的大小取决于在输入腔产生的速度调制的深度。包含高频电流分量的电子束穿过谐振腔，就会在谐振腔内感应起高频电流，它将使输出腔激起振荡，将能量经耦合环从同轴线[●]引出就实现了放大。

图 1(c) 的结构有一个缺点，阳极是谐振腔的一部分，它的发热是一个问题，同时被打出的二次电子也将引起有害的效应。为此，把阳极用栅网代替，而在栅网后面另外放一个专门收集电子的阳极，称“收集极”，它可以做得比较大，便于散热，如图 1(d) 所示，这就是双腔速调管的锥形。

速调管与三极管不同，后者阴极到阳极的距离很短，而前者却很长，因此电子流又细又长，称为“电子束”。用普通三极管的结构电子不会自动聚成一束，为此专门研究了“电子枪”以产生一束规则的电子束，并且要采取措施以维持电子束在行进的过程中不发散，这种措施称为“聚焦”。电子枪与聚焦已成为专门的学科，称“强流电子光学”。

综上所述，双腔速调管的原理可简述如下。从阴极发射的电流经电子枪的作用形成一个均匀的电子束，穿过输入腔及输出腔最后打到收集极上。如果有了高频输入信号，在输入腔中激起高频振荡，它将使电子束速度受到调制，然后在

● 当然能量不一定通过同轴线引出，也可以改为波导引出，相应地耦合环改为耦合膜孔。

漂移空间逐渐群聚。已群聚的电子流穿过输出腔时，就在腔内激起高频感应电流。如果输出腔也调谐到输入信号频率上，就会谐振起来并在栅网间隙上建立起很强的高频场，它反过来又作用于电子束。多数电子聚集成的群聚块[●]将在感应电场的负半周通过间隙，受到减速而减小了动能，其余少数电子在正半周穿过间隙受到加速。总的来说，电子束失去的能量比获得的多，两者之差即转变为高频场的能量。高频场获得能量，谐振腔的振荡就得以维持，同时大部分能量通过耦合环(或耦合膜孔)传输出去，完成了放大作用。图3是双腔速调管的结构。

一般来说，群聚后的电流不一定是理想的正弦波。这并不奇怪，事实上普通三极管放大除了甲类运用以外，

电流都不是正弦的。非正弦的电流中包含着丰富的谐波，如果将输出腔调谐到信号的谐波频率上，输出腔也可以振荡起来，只不过这时输出的信号频率是原来信号的谐波频率，这就是倍频速调管。一般用一级就可以得到十倍频。

1-2 多腔速调管

双腔速调管的增益及效率都很有限。为了进一步改善速调管的性能，采用了多腔的结构，它在提高增益，带宽，效

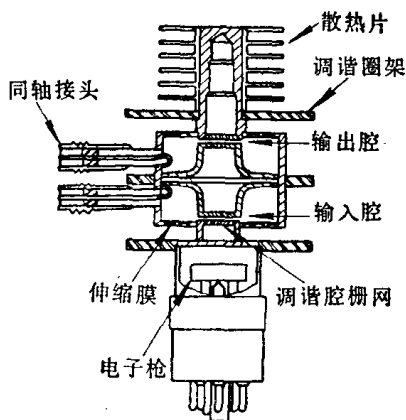


图3 双腔速调管

● 电子集中的地方称为“群聚块”。

率等方面都获得了显著的成效，因而得到广泛应用。

为了提高增益，我们很容易想到利用级联放大的方法。图4(a)绘出两级双腔速调管放大装置。如果将第二只管的输入腔与第一只管的输出腔合而为一，且共用一个电子束(如图4(b)所示)就成了三腔速调管。它显然有许多优点，例如：减少了一个腔使调谐方便，结构简化了，减少一个电子束使效率提高，一只管子完成了两只管子的放大任务，而且增益还至少“超额”6分贝，因为少了一个腔的损耗，第二腔的电压将提高一倍，相当于6分贝(这里还没有计算传输损耗)。

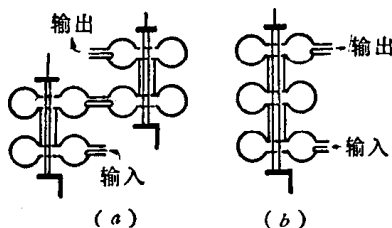


图4 级联放大与
三腔速调管示意图

这种“级联放大”的三腔管中的物理过程是这样的。在第一腔存在的输入高频电压，使电子束产生速度调制，经过第一段漂移管形成群聚，电子束中有了一定的密度调制。在穿过第二间隙时，它对第二腔的感应电流使间隙处建立起高频电压，这一电压反过来又使电子束受到第二次速度调制。通常第二腔没有外加负载， Q 值很高，第二腔电压比第一腔大得多，这样，在第二段漂移管中的群聚过程就主要决定于第二次调制。然而，如果第一次调制已经相当强大，或者第二腔偏谐很多，因此高频振荡不太强，则第二漂移管中的群聚过程与两次调制电压的大小相位都有直接关系。

在低频电子管级联放大中，级与级之间被电子管所隔离。但在多腔速调管中，如前所述，前一级的放大过程直接影响

后一个过程。这种“非相邻腔之间的耦合”作用，称为“直馈”（是“反馈”的反意语）。

多于三腔的速调管，物理过程和三腔管基本上是一样的。为了获得最大的增益，显然应该使各个腔都调谐到信号频率，这称为“同步调谐”，或简称“同调”。一般四腔速调管的小信号增益可以达到60分贝。

速调管的谐振腔 Q 值通常都很高，因此瞬时的通频带很窄。为了增宽频带则要采用所谓“参差调谐”技术，简称“差调”，即将不同的腔调谐到不同的频率，这样就可以有效地展宽频带。

通常速调管的输出腔因为与负载相耦合， Q 值比前面各腔都低，因此早期速调管的频带主要受前面各腔的限制。但是，“一切矛盾都依一定条件向它们的反面转化着”，当成功地采用了“差调”之后，输出腔反而成为展宽频带的主要限制了。因为，即使整个频带以内电子束都能实现良好的群聚，但当频率偏离输出腔的中心频率，腔的阻抗下降，电流激发谐振腔的电压也下降，就不能与电子束充分作用，“功率取不出来”，总的频带仍然不能宽。为了克服这个缺点，在输出腔之外再加上一个耦合腔，类似中放的双调谐回路，可以展宽“输出频宽”。更进一步可以采用三节的耦合回路。这时称之为“滤波器”，因为它将利用滤波器的设计方法。当然它的真正作用并不是滤波，而是一个宽频的阻抗变换器，保证在整个频带内从输出腔间隙所看到的负载阻抗都足够高，而且波动不大。实践证明，这种办法是成功的。

理论证明，速调管的峰值功率越大，频宽的潜力也越大。定性可以作如下的解释。电子束本身的直流阻抗是 $Z_0 = V_0 / I_0$ 。

而 $I_0 = P_{er} V_0^{3/2}$ ●, 电流正比于电压 $3/2$ 次方, 电压越大, 电子束阻抗越小。相应地, 输出腔的阻抗也可以降低, 这样就可以降低腔的 Q 值, 从而展宽了频带。目前, 在兆瓦级的速调管中, 固定调谐的 3 分贝频带可达 8%, 个别的达 11%。它与同样功率级的行波管的带宽是完全可以比拟的。但功率小的速调管, 频带特性就大不如行波管了。

速调管的优点是: 功率可以做得很大, 增益高和稳定, 效率比行波管高。主要缺点是频带比较窄。多用于发射机的末级。速调管的发展现状简述如下: 速调管的功率在目前还是水平最高的, S 波段达 30 兆瓦峰值功率, 实验室水平达 40~50 兆瓦, L 波段达 50 兆瓦, 连续波最大达 1000 千瓦 (X -波段)。

速调管的新发展重点在提高频宽和效率, 特别是吸收了行波管频带宽的优点(参看 1-5 节及 1-8 节)。例如将输出腔用三叶草的慢波线代替, 称之为“行波速调管”(Twystron), 3 分贝的频宽达 14%, 1 分贝的频宽达 12%, 效率达 48% (VA-145)。有的将输出腔用几个互相连通的谐振腔代替, 它可以看成是一个拉长了的、包括几个与电子束相互作用的高频间隙的谐振腔, 称多间隙腔, 又称扩展作用腔, 鉴于有的慢波线是用耦合的(即相互连通的)谐振腔链构成的, 因此这种多间隙腔又可以认为是两端短路的慢波线。多

● 根据二极管的理论, 空间电荷限制的二极管电流随电压的变化是遵循二分之三次方定律的, 即 $I_0 = P_{er} V_0^{3/2}$ (P_{er} 是电子枪的导流系数, 单位为微朴 [10^{-6} 安/伏 $^{3/2}$]), 也有许多文献用符号 K 或 P)。电子枪实际上也是一个二极管, 通常也工作于空间电荷限制情况, 它是表征电子枪和电子束的重要参量。

间隙腔速调管曾达到65%的效率。两端短路的其他慢波线（如螺旋线或环-杆慢波线——图11）也可以构成谐振腔，称之为分布作用腔，用这种腔做成的中等功率管（分布作用速调管）比同样功率的普通速调管的频带宽得多。

提高效率的其他办法有：谐波调制（在腔之间另插入一个小腔，谐振于二次谐波频率上，曾做到75%的高效率）、收集极降压（参看3-3节）、速度跳变（在末腔与末前腔之间加上正电压使电子得到新的加速）和采用空心电子束等。另外，利用现代电子计算机进行设计，决定最佳的调谐以得最大的频宽和效率，对于速调管的进一步发展也是有贡献的。

1-3 反射速调管及漂移速调管

反射速调管在三十年代就诞生了。直到现在，它作为小功率微波振荡器仍广泛地用于信号源和本地振荡。它的工作原理如图5所示。电子从阴极出发经电子枪加速后，通过谐振腔的栅网（间隙），然后进入到谐振腔与反射极的空间，在反射极上加有比阴极更负的电电压，因此电子受到拒斥场，达到某一个高度（零等位线）时，电子速度为零，然后就反向运动，重新进入谐振腔。正如从地上向天上抛石子的运动一样。电压越负，拒斥场越强，电子所能达到的高度越低。很容易算出电子从第一次穿过间隙到第二次重返间隙的渡越时间是：

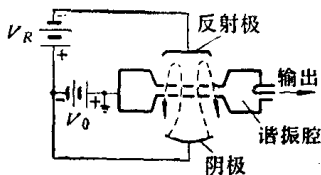


图5 反射速调管示意图

$$t_2 - t_1 = \frac{2m}{eE} v_0 \quad (1)$$

其中 $v_0 = \sqrt{\frac{2e}{m} V_0}$ 是电子进入拒斥场的初速，亦即

从电子枪获得的速度， E 是拒斥电场，如为平面电极，则 $E = (V_0 + V_R)/d$ ， d 为极间距离，显然改变反射电压就可以改变渡越时间。

如果谐振腔内有高频振荡，那么电子穿过栅网将受到速度调制。受到加速的电子将“抛”得更高，渡越时间增加，被减速的电子则相反。这样就产生了群聚现象。从图 6 可以看到群聚块将以 t_b 为中心。如果它返回间隙的时间正好是高

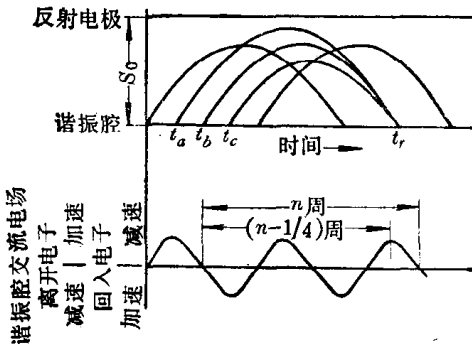


图 6 反射速调管电子群聚

频的正相位（它对入射电子是加速，对反射电子则为减速）就被减速而将能量转给高频场。如果这种正反馈的能量足以补偿腔内的损耗，就将引起自激振荡。

从图 6 上可以看出渡越时间满足以下条件都是正反馈：

$$2\pi\left(n - \frac{1}{2}\right) < \theta_0 = \omega(t_r - t_b) < 2\pi n \quad (2)$$

而满足下式时，反馈最强，能量交换最大：