

— 內部讀物 —

# 微波电子元件

一、二、三、四、五、六、七、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十五、十六、十七、十八、十九、二十、二十一、二十二、二十三、二十四、二十五、二十六、二十七、二十八、二十九、三十、三十一、三十二、三十三、三十四、三十五、三十六、三十七、三十八、三十九、四十、四十一、四十二、四十三、四十四、四十五、四十六、四十七、四十八、四十九、五十、五十一、五十二、五十三、五十四、五十五、五十六、五十七、五十八、五十九、六十、六十一、六十二、六十三、六十四、六十五、六十六、六十七、六十八、六十九、七十、七十一、七十二、七十三、七十四、七十五、七十六、七十七、七十八、七十九、八十、八十一、八十二、八十三、八十四、八十五、八十六、八十七、八十八、八十九、九十、九十一、九十二、九十三、九十四、九十五、九十六、九十七、九十八、九十九、一百

# 目 录

第一章	概論	1
§1.	微波电子器件发展簡述	1
§2.	微波电子管的共同特点	3
第二章	速調管	13
§1.	双腔速調管的工作原理	13
§2.	双腔速調管放大器及其他双腔速調管	29
§3.	多腔速調管	40
§4.	反射速調管	59
§5.	反射速調管的电子調諧	82
§6.	反射速調管的調制、应用及参量	92
第三章	行波管	104
§1.	行波管概述	104
§2.	行波管的慢波系統及其一般特性	105
§3.	螺旋綫慢波系統行波管	123
§4.	行波管放大器的分析及主要特性	129
§5.	低噪声行波管放大器	147
§6.	电子注中的波——空間电荷波	152
§7.	电子波管——双注行波管	164
§8.	返波管及其电子調諧特性	167
§9.	行波管的使用和維護	182
§10.	行波管的应用和发展方向	193
第四章	磁控管	193
§1.	电子在恒定电場磁場中的运动	193
§2.	多腔磁控管的基本結構和振蕩系統	200

---

§ 3.	多腔磁控管的工作原理	206
§ 4.	磁控行波管放大器(M型行波管)	214
第五章	参量放大器	225
§ 1.	参量放大器的基本原理	226
§ 2.	非线性电抗元件的一般能量关系	240
§ 3.	负阻式参量放大器的特性	248
§ 4.	负阻式参量放大器的实际结构及设计考虑	262
§ 5.	行波式参量放大器	272
§ 6.	参量放大器的应用和发展	284
第六章	隧道二极管在微波中的应用	286
§ 1.	隧道二极管的电特性和物理特性	286
§ 2.	隧道二极管放大器和振荡器	290

# 第一章 概 論

## §1 微波电子器件发展簡述

无线电技术的发展，要求人們掌握波长越来越短的无线电波。現在由米波至厘米波波段(波长10米至1厘米，頻率30兆赫至30000兆赫)已广泛用于无线电技术及其他科学部門，如通信、雷达、电视、遙控以及天文、气象等。今天正向更短波长的毫米波及亚毫米波进军了。

微波振蕩的产生及放大是开拓任何新微波波段的基本問題。微波电子器件就是产生、放大(包括变换)微波振蕩器件的統称。微波领域中各技术部門近几十年来的飞速发展，是与微波电子器件的发展分不开的。无线电技术各部分的发展对微波电子器件提出越来越高的要求，而微波电子器件的每一改进和新型电子器件的出現又促进了各部分技术的发展。

微波电子器件的发展也是与軍用密切联系的，不但在軍用通信、雷达等方面要用到它，而且制导、宇宙通信的发展也提出了新的要求。目前世界各国都集中不少人員从事这方面的研究制作。58年以来，随着我国各无线电部門的建立和发展，在微波电子器件的研究制造方面也开始积极进行，得到迅速发展。

普通的静电控制三、四极管，当工作頻率提高后，由于电子管的超高频效应，特别是其中的电子渡越效应(即电子惰性效应)，使电子管的功率效率显著下降，放大作用降低以至最終失去放大作用。结构上经过重大改革后的超高频三、四极管(如塔形管、金属陶瓷管、諧振腔管等)，由于相器程度克服了这种效应，使这类电子管能用于厘米波段的低端(3000兆赫左右)并給出几瓦的功率。进一步提高这类电子管的頻率极限遇到制造上的巨

大困难，而使人们早在几十年前就寻求基于不同于普通电子管工作原理的新型器件。

近二、三十年来，一些建立在对运动电子动态控制的新型电子器件不断出现并获得飞速发展，成为微波范围中产生和放大微波振荡的主力。这些电子管的主要共同之点，就是有效地利用电子在极间的渡越现象，从而使原来的不利因素成为有利因素。

先是30年代出现的直射式速调管，用作功率放大、倍频或振荡。在40年代左右又在直射速调管的基础上出现了用作小功率振荡的反射速调管。在这同时，由于雷达方面发展的需要，出现了产生大功率振荡的多腔磁控管。第二次世界大战后，一种以电子和电磁行波长久相互作用的行波管研制成功，由于它具有许多明显的优点，在短期内得到迅速发展，并出现了一些新的分歧。

除了上述以对电子的动态控制为基础的微波电子管外，近些年来，由于半导体、铁氧体技术的发展，出现了一类称为固态微波电子器件，其中有参量放大器、量子放大器、隧道管放大器、振荡器等。

以上所述只是目前应用最广的主要微波电子器件，由于这门科学的迅速发展，有些新型器件还正在研究中，更新型微波电子器件的出现和应用，也是完全可以预料得到的。

所有微波电子器件按其应用大致可以分为三类：功率放大器和功率振荡器、小功率振荡器、小信号放大器。上述微波电子器件中，有些既可以作放大器也可以作振荡用，而有些一般只宜于某种应用。功率放大器和振荡器主要用于各种发射设备中作为它的输出级（如雷达发射机、散射通信发射机、接力通信发射机等）。小功率振荡器可以用作发射机的激励器，接收机的本机振荡器，测量设备中的振荡器（如微波信号产生器）或其他辅助振荡器（如参量放大器及量子放大器中的泵浦源）。小信号放大器则主要用于接收机的前置放大器。

对各类器件的基本要求也是各不相同的，对功率放大器和振荡器，基本要求是：振荡功率和总效率，工作频率的机械（或电子）调谐范围，放大器的放大系数，振荡器的振荡频率的稳定性等。对小功率振荡器，功率效率虽有一定要求但不起决定的作用，机械或电子调谐性能，实施振幅，频率调制的可能性，结构及使用的简便等则成为主要的要求。对于小信号放大器，提出的要求本质上与上面的要求不同，对这种放大器的主要要求是：放大器输入端的噪声系数，固定调谐下的工作频带宽度，放大系数，放大器的输出功率的绝对值，甚至其放大系数都只起着比较次要的作用，而效率一般可以不加考虑。因此对这种放大器，当信号与噪声可以相比拟时，则起着主要作用的不是信号放大的本身，而是在输入端及放大器输出端信号对噪声的比值。

本课程的任务，就是在进行一定分析的基础上，研究上述几种微波电子器件的工作原理，性能及实际应用。

## § 2 微波电子管的共同特点

### （一）概述

各种微波电子器件的功用，不外产生和放大超高频振荡和普通电子管一样，各种微波电子器件事实上只是起了能量转换的作用，也就是将直流电源的能量（或者另一种超高频能量）转换为所需的超高频能量。作为放大器来说，这种转换还要受到被放大信号的控制。

除了参量放大器及隧道管外，这里的所有微波电子管，它的能量转换作用，都是通过电子管中运动的电子而进行的。各种微波电子管原理上的主要区别，就在于电子受控制的方式以及运动的方式有所不同，而交换能量的本质是相同的。因此，为了要了解各种微波电子管的工作原理，就必须着重了解其中电子运动和

交換能量的过程。在学习每种具体器件之前，首先建立电子运动和交換能量的基本概念是很必要的。

在普通高频振荡器、放大器中，一般都采用集中常数的振荡回路作电子管的负载，或者说作为轉換能量过程中的儲能元件。在微波电子管中，由于在微波范围集中常数回路不能滿足諧振和儲能的要求(因諧振波长长，損耗大)，通常是采用分布参数的振荡回路，最常用的分布常数回路是同軸綫諧振器和环形空腔等，如图 1-1 所示。

这种振荡回路可以和通常一样，在电子管外部和电子管的电极相連。但在許多情况下，由于它的尺寸小到与电子管的电极差不多，这时为了减小引綫电感和分布电容，减小連接处的接触損耗，而且也为了結構上的方便，將振荡回路和电子管的电极連成一体，而成为微波电子管的一个組成部分。在这种振荡回路中，极間电容通常是回路电容的主要部分，考虑到諧振器的本身損耗及回路与外部负载的耦合，其等效电路如图 1-2 所示，其中  $G_c$  及  $G_L$  分别为損耗电导和负载电导。

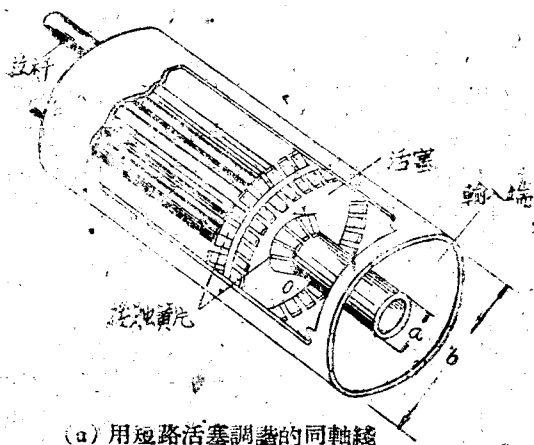
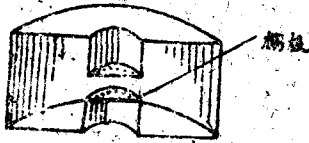


图 1-1



(b) 环形諧振腔

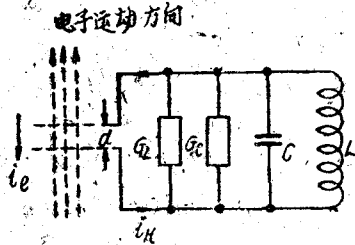


图 1-2 諧振器的等效电路

图 1-1 微波电子管中用的振荡回路

微波电子管諧振器中的超高频振荡，是由通过諧振器的交变电子流激励起的(正如探針和耦合环一样，交变电子流也是一种激励方式)。諧振器中的超高频振荡和电子流的关系，可以通过流过回路的感应电流和电子流的普遍关系决定：

$$i_R = \frac{1}{d} \int_0^d i_e dx \quad (1-1)$$

其中  $i_R$  为感应电流， $i_e$  为通过电子管极間的电子流，設电子流在截面积  $s$  上是均匀分布的，則它与电荷密度  $\rho$  电子速度  $v$  的关系为

$$i_e = s\rho v \quad (1-2)$$

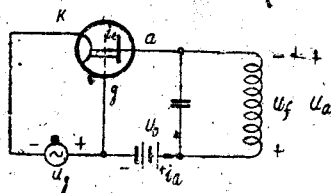
为了闡明各种微波电子管的原理，在以后的討論中，我們將主要研究电子管内部发生的現象，因此所研究的物理量将不仅限于外电路的电流电压，而要研究空間的电場 ( $E$ )、电荷密度 ( $\rho$ )、电子速度 ( $v$ )、电子电流 ( $i_e$ ) 等。

### (二) 电子管中交换能量的基本概念

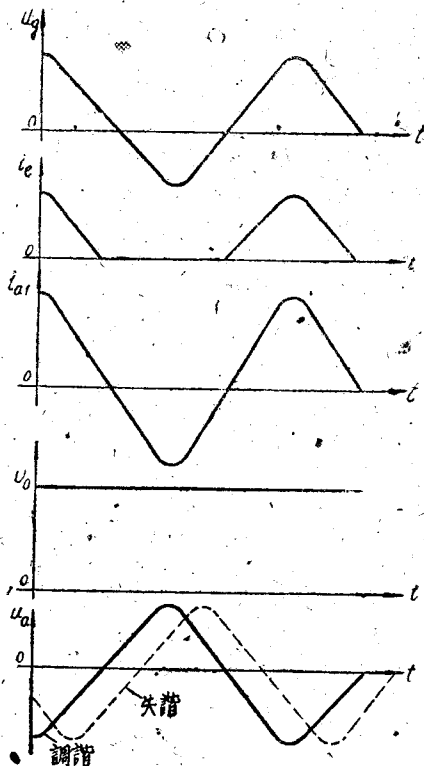
为了建立电子管中运动电子和高频場交换能量的基本概念，我們以普通的三极管共栅放大器为例，从运动电子的工作过程得出交换能量的必要条件。

图1-3(a)是放大器的等效电路。由普通电子管放大器的原理





a) 放大回等效电路



(b) 电流电压波形

图 1-3 三极管放大器交换能量过程

我們知道，这种綫路的放大作用是这样的：由于栅极阴极間高频电压  $U_g$  的控制作用，在阳极电路中除了有直流电流外，还有高频电流分量，( $I_{a1}$ ) 流过，当振荡回路对信号频率調諧时， $I_{a1}$  便在回路兩端产生同相电压，于是有功功率送給这回路。振荡回路的高频功率是直流电源供給的功率的一部分，它远大于栅极激励电压供給的激励功率，因而起了放大作用。

显然这个放大作用(即能量轉換作用)是在电子管內部进行的，現在从电子管內部来看这一过程。

在阴极栅极空間 ( $gK$ 間)，阴极附近的空間电荷受到輸入电压产生的交变电場的作用，在电場的正半周中通过阴极栅极空間，电流的大小随所加电压变化(按二分之三次方关系变化)。因此进入栅极阳极空間的电子流  $i_e$  有如图 1-3(b) 所示的波形，并可以分解为一些頻率的分量：

$$i_e = I_0 + I_1 \cos \omega t + I_2 \cos 2\omega t + \dots + I_n \cos n\omega t$$

进入栅极阳极空間的电子流，同时受到两个电場的作用。一个是受阳极直流电源产生的直流电場的加速作用，电子从直流电源中获得能量。与此同时，运动的电子在栅极阳极电路中引起感应电流  $i_a$ ，其方向如图所示。感应电流流过接在  $g-a$  間的振荡回路，产生电压降  $u_f$ ，同时也就在栅极阳极空間产生高频电場，电子便受此高频場的作用。設电子在  $g-a$  的渡越時間远小于振荡周期，并設高频电压振幅不很大，因而可以忽略电子流在  $g-a$  空間的变化，則感应电流  $i_a$  大小与穿过栅极的电子流  $i_e$  相等

$$i_a = \frac{1}{d_{ga}} \int_0^{d_{ga}} i_{ega} dx = i_e$$

$$= I_0 + I_1 \cos \omega t + I_2 \cos 2\omega t + \dots$$

当振荡回路調諧时，回路兩端电压  $u_f$  与基波电流  $i_{a1}$  同相，阳极对栅极的高频电压  $u_a$  与  $i_{a1}$  反相，此时高频电压  $u_a$  在栅极阳

极空间建立的高频电场对全部电子流来说，正好是减速场，如图 1-3(b)所示。于是所有电子将由直流场得来的部分动能交给高频场，补偿了回路的损耗和负载的输出，完成转换能量的作用。电子剩下的部分动能最后以热能形式消耗在阳极上。

电子交给高频场的功率，我们知道可以从回路的电流电压来计算，当回路调谐时

$$P = \frac{1}{2} U_f I_f$$

若从电子受高频场减速失去的动能出发，也可以得上面同样的结果。

每个电子从直流场得到的动能为

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = c U_0$$

其中  $m$ ,  $e$  各为电子质量及荷电量，设高频一个周期  $T$  内通过的电子数为  $N$ ，总电量为  $q$ ，则电子从直流场得到的功率为

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} m v_0^2 \cdot N = \frac{1}{T} \cdot c U_0 \cdot \frac{q}{e} \\ &= \frac{1}{T} \cdot U_0 \int_0^T i_e dt = U_0 I_0 \end{aligned}$$

电子到达阳极的末速，当忽略渡越时间的影响时，由下式决定

$$\frac{1}{2} m v^2 = c(U_0 - U_f \cos \omega t)$$

因此消耗在阳极上的热功率为

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{T} \int_0^N \frac{1}{2} m v^2 dN = \frac{1}{T} \int_0^q c(U_0 - U_f \cos \omega t) \frac{dq}{e} \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (U_0 - U_f \cos \omega t) i_e dt \end{aligned}$$

$$= U_0 I_0 - \frac{1}{2} U_f I_1$$

电子交给高频场的功率为

$$P = P_0 - P_a = \frac{1}{2} U_f I_1$$

如果振荡回路不是正好调谐，则高频场与电子流将有一附加相位差（见图1-33上的虚线波形）。这时处于高频减速场的部分电子将仍然交出能量，而部分处于加速场的电子则将从高频场取得能量。但只要大部分电子在减速场的期间通过，则总的来说电子将交出能量，仍能起放大作用。作为接收能量的负载来说，失谐的相角最大不会超过  $90^\circ$ ，因此减速场的电子总是比加速场的电子多些。从能量守恒的观点来说，无论负载如何，消耗在阳极上的热能，只能小于最多等于直流电源供给的能量，因此振荡回路将多少总会得到能量。

显然，均匀的电子流通过高频场时，由于处于减速场的电子和加速场的电子数目相等，不能与高频场交换能量。事实上，在上述三极管放大器中，通过  $g-a$  空间的均匀电子流，不能在外电路上引起高频感应电流，不能建立起高频场。

以上就是三极管内交换能量进行放大的物理过程，对于所有利用电子交换能量的器件，基本上都是适合的。

归纳起来，所有放大高频振荡的电子器件，都必须具有以下三个最基本的工作过程：

1. 电子被直流电场加速，获得必需的动能；
2. 运动的电子必须被所要求放大的信号控制，最后形成随信号频率变化的电子流；
3. 大多数的电子落入高频减速场，将能量交给高频场。

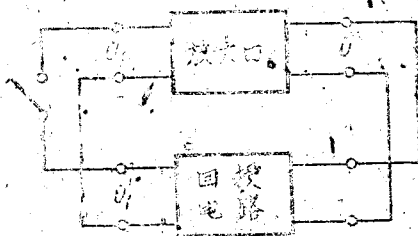
这三个过程缺一不可，因此也是各种电子管中交换能量的必要条件。在不同的电子管中，这几个过程可以分别或同时进行，

先后顺序也可以不同。而控制电子的方式不同，更是区分各种类型电子管的重要原因。

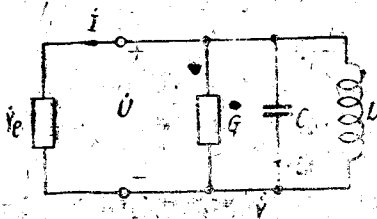
### (三) 微波振荡器的概念

微波振荡器的基本工作原理和普通振荡器一样，是建立在自激的基础上，即不需要外部信号控制，就能进行直流能量与高频能量转换，自行建立稳定的超高频振荡。

振荡器的自激原理通常可以采用两种方法分析。第一种方法就是将振荡器看成具有能量回授的放大器，如图1-4(a)所示。放大器将电压  $\dot{U}_1$  放大到  $\dot{U}$ ，通过回授电路将  $\dot{U}'$  送到放大器的输入端。振荡器的自激条件就是要求  $\dot{U}'$  与  $\dot{U}_1$  的相位相同、大小相等。前者就是振荡器的相位平衡条件，后者就是振幅平衡条件。



(a) 放大回授式振荡器



(b) 负阻式振荡器

图 1-4 振荡器的原理图

通常相依平衡条件与工作频率密切相关，因而决定振荡器的工作频率；振幅平衡条件通常决定振荡的振幅大小，改变放大器放大量或回授的大小，就可以改变振荡的强弱。

有些微波振荡器(电子器件以两端与负载回路连接的振荡器)可以看作如图1-4(b)表示的负阻振荡器。具有能量转换作用的电子器件，既可以看成一高频能量发生器，同时也可以看成具有负电阻或负电导的器件，因为我们知道，从电路上来看，电源和负载的区别，只是电流和电压的方向不同。图上将电子器件用一等效导纳  $\dot{Y}_e$  表示，一般情况下其中除了有负电导外，还有电纳分量。图上电流与电压的方向是按通常负载上电流电压的关系规定的。

设电子器件的等效导纳为  $\dot{Y}_e = G_e + jB_e$ ，负载导纳为  $\dot{Y} = G + jB$ ，则并联电路两端的总导纳为

$$\dot{Y}_e + \dot{Y} = (G_e + G) + j(B_e + B)$$

由单回路自由振荡的分析可知，回路两端电压有如下的形式

$$\dot{U} = \dot{U}_0 e^{-\alpha t} e^{j\omega t}$$

其中

$$\alpha = \frac{G_e + G}{C}$$

振荡频率  $\omega$  由

$$B_e + \omega C - \frac{1}{\omega L} = 0 \quad \text{确定}$$

当电子器件负电导的绝对值大于回路电导时，

$$G_e + G < 0$$

任何微小的激励(电子器件中不可避免的热扰动，接通电源时的暂态等)就会增长起来，建立振荡。

由于各种电子器件的非线性作用，等效导纳是随振荡振幅变化的。一般情况下振荡振幅的增加，会使等效电导的绝对值变小，当  $G_e$  变化到

$$G_e + G = 0 \quad (1-3)$$

时，于是振荡振幅不再增加，形成稳定的振荡。稳定振荡振幅的大小，就由(1-3)式的振幅平衡条件决定。

研究这种振荡器时，首先应找出电子器件的等效导纳，然后分析它与各因素的关系，从而找出外界因素如何影响振荡器的工作。

## 第二章 速調管

速調管是一种基于对电子进行速度調制的微波电子管，它的发展比較早，应用范围也很广。

目前速調管的主要类型有兩種：

一种是直射式速調管，它是利用直向运动的电子来交换能量。直射速調管中又分双腔速調管和多腔速調管。这种速調管主要用作功率放大器、倍頻器、振荡器。目前大功率速調管的脉冲功率可以达 20 兆瓦以上，放大系数可以到 30 分貝以上，效率約为 40~50%。

另一种是反射式速調管，它是利用返轉运动的电子交换能量，产生超高频振荡的小功率振荡器。由于它只有一个諧振腔結構和使用很簡單，并有电子調諧的特性，因而生产类型很多，应用极广。

本章目的，在于闡明这两种类型速調管的基本原理，特性及实际应用。

### §1 双腔速調管的工作原理

双腔速調管是发展得最早的一种速調管。速調管的一些理論也是最先在分析双腔速調管中逐步建立。虽然目前双腔速調管的应用已日見减少，但为了了解速調管的基本原理，首先分析双腔速調管仍然是适宜的。

#### (一) 双腔速調管的基本結構

图 2-1 是一双腔速調管的結構图和示意图。它是由以下几个主要部分组成：

1. 电子枪：速調管是一个电子长距离运动的电子束管，电



子枪的作用就是产生一定速度的均匀电子束(也称电子注)。它包括阴极、加速极(有时还有聚焦极及控制栅极)。在加速极上通常加有几百至几千伏直流电压。

2. 输入谐振腔: 通常是环形金属谐振腔, 腔的中心就是两个栅极, 电子就从其中通过。输入信号通过耦合装置(通常是耦合环)在谐振腔空间激起电磁场, 两栅极间有着最强的高频电场, 电子就受此电场的速度调制。

3. 输出谐振腔: 其结构通常与输入腔完全相同。电子与高频场的交换能量就在它的两栅极间进行, 放大的高频能量就从该腔耦合输出。

两谐振腔上都加有与加速极相同的直流电压。

两谐振腔的调谐, 可以通过壁上的柔性膜的变形进行, 即改变栅网间的距离或谐振腔的体积, 调谐的范围一般不宽。

4. 渡越空间(或称漂移空间): 电子通过输入腔和输出腔之间的空间称为渡越空间。它的周围被谐振腔壁屏蔽着, 其中既没有高频电场, 也没有直流电场。

5. 收集极: 它的功用是收集交换能量后的电子, 构成直流通路。收集极上联结有散热的金属片。

## (二) 双腔速调管工作物理过程

### 1. 物理过程简述:

阴极放射的电子, 受电子枪的加速作用后, 得到一定的直流速度  $v_0$  和动能, 形成均匀的电子注通过输入腔的栅网。在两栅网间(见图2-2), 输入电压  $u_1$  的作用下, 电子注的速度随着变化, 从输入腔出来的电子围绕直流速度上下变化, 即管  $u_1$  加速的电子具有较大的速度, 受  $u_1$  减速的电子具有较小的速度。这过程也就是电子受到了速度调制, 速调管的名称也由此而来。

受到速度调制的电子注, 在进入渡越空间以后, 由于没有电场的存在, 电子作匀速运动。不同速度的电子在渡越空间运动的