

## 超宽带多注速调管的模拟研究

沈斌<sup>①②</sup> 丁耀根<sup>①</sup> Aleksandr N. Sandalov<sup>③</sup>

Vladimir E. Rodjakin<sup>③</sup> Aleksandra N. Chashurina<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

<sup>③</sup>(Radiophysics Chair, Physics Department, M.V. Lomonosov Moscow State University, Lenin's Hill, Moscow 119899 Russia)

**摘要** 本文介绍了多注速调管的发展历史和现状,以及速调管模拟软件的发展情况。用 1.5 维软件 Klystron-MSU 和 2.5 维软件 Arsenal-MSU 对超宽带多注速调管进行了设计计算,并对计算结果进行分析,得到了比较好的输出特性。计算结果表明可以实现该超宽带多注速调管,其带宽 10~14%,增益 40~50dB,效率 40~50%。

**关键词** 多注速调管, Klystron-MSU, Arsenal-MSU, 电子注通过率, 输出特性

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)01-0180-05

## Theoretical Investigations of the Super Broadband Multiple Beam Klystron Amplifier

Shen Bin<sup>①②</sup> Ding Yao-gen<sup>①</sup> Aleksandr N. Sandalov<sup>③</sup>

Vladimir E. Rodjakin<sup>③</sup> Aleksandra N. Chashurina<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

<sup>③</sup>(Radiophysics Chair, Physics Department, M.V. Lomonosov Moscow State University, Lenin's Hill, Moscow 119899, Russia)

**Abstract** The development, the computer simulations of klystron and design of super broadband multiple beam klystron are introduced in this paper. It shows some results of simulation of super broadband MBK by 1.5D code Klystron-MSU and 2.5D code Arsenal-MSU. Theoretical investigations of simulation results are described in details. The results show an opportunity of realization the multiple beam klystron with bandwidth about 10~14 %, gain 40~50 dB at electronic efficiency about 40~50 %.

**Key words** Multiple beam klystron, Klystron-MSU, Arsenal-MSU, Beam transmission, Output characteristic

### 1 引言

多注速调管的概念是在 20 世纪 40 年代提出的<sup>[1-4]</sup>,但是直到 60 年代末,才研制出实用型多注速调管,并在通信、广播、雷达和加速器等领域得到了广泛应用。近年来,多注速调管作为一种高功率、高效率、高增益、宽带宽、低工作电压、体积小和重量轻的紧凑型微波电真空器件,得到了世界各国的高度重视。

目前,研制多注速调管的主要单位有俄罗斯的 Istok, Toriy 和 Svetlana 等科研生产联合体,中国的中国科学院电子学研究所(IECAS)和北京真空电子技术研究所(BEVI),法国

的 Thales Electron Devices(TED)等,美国 Communications and Power Industries(CPI),斯坦福直线加速器中心(SLAC)和日本高能物理所(KEK)等单位也在开展多注速调管的研究工作。

法国 TED 公司和美国 CPI 公司正在发展用于加速器的高功率高效率多注速调管<sup>[5-7]</sup>。TED 发展的 L 波段多注速调管 TH1801<sup>[7]</sup>,工作频率 1.3GHz,脉宽 1.5ms,峰值输出功率 10MW,电子注电压 117kV,电流 132A,效率高达 65%。

近年来,宽带(带宽接近 10%)和超宽带(带宽大于 10%)速调管的研制受到了高度重视。中国科学院电子学研究所发展的宽带和超宽带多注速调管,其输出功率 100~200kW,

效率 35~45%，增益 35~45dB，带宽 8~12%。

本文介绍了速调管计算机模拟中存在的物理问题，2.5 维速调管模拟软件 Arsenal-MSU<sup>[8]</sup>的特点，以及中国科学院电子学研究所和莫斯科国立大学(MSU)在宽带和超宽带多注速调管的设计和计算机模拟方面开展的研究工作<sup>[9-12]</sup>。

## 2 速调管放大器中物理过程的计算机模拟

用计算机模拟来进行速调管放大器的设计和理论研究已经有超过 40 年的历史。最早的速调管理论模型是一维电子圆盘模型，该模型的建立对速调管设计计算起了重要作用。随着计算机技术的发展，出现了二维和三维计算软件，可以更精确地设计和模拟速调管的输出特性。

由于速调管放大器具有强烈的非线性特性，因此为了更好地模拟速调管，必需解决以下一些问题。

(1) 速调管谐振腔的分析，包括谐振腔的频率、 $Q$  值和特性阻抗  $R/Q$  值，腔内电磁场分布的分析。除了基模，还需要对高次模进行分析，因为它们会影响速调管的工作状态(如引起寄生自激振荡)。

(2) 电子光学和电子注在磁场中收敛性的分析，包括电子注能量分布、电流、电子注波动情况的分析。

(3) 电子注在速调管高频相互作用区的群聚分析。为解决这个问题，需要对电子注与谐振腔以及漂移管中群聚电流的非线性相互作用进行分析。

(4) 速调管与输出结构之间的能量交换。输出结构的优化是一个比较复杂的问题，需要对系统内部的能量交换情况进行分析。为了防止输出电路的振荡，还需要对输出电路的模式以及它们与电子注的相互作用进行分析。

(5) 经过输出腔后到达收集极的电子注的回收以及电子注在收集极表面分布的均匀性分析。此外还需要考虑到收集极表面二次电子发射的影响。

(6) 需要对速调管结构进行热分析。例如，考虑阴极膨胀等因素对电子注质量和速调管性能的影响。

近年来，发展了多种计算机软件作为现代速调管分析和设计的基本工具，这些软件对速调管中的各个独立的物理过程的分析以及对整管工作特性的分析，都具有很高的精度。

由于 2.5 维和 3 维软件计算需要大量的计算机时间，因此一般先使用一维模型对一些关键的参数进行初步优化。这里我们使用的是莫斯科国立大学无线电物理系开发的 Klystron-MSU 和 Arsenal-MSU 软件<sup>[8]</sup>。

Klystron-MSU 是一个 1~1.5 维软件，使用电子圆盘模型来模拟注波互作用过程。它可以用来设计和估算窄带和

宽带速调管。该软件经过了 30 年的实际使用检验，曾被用于研制效率超过 70% 的大功率、高效率多注速调管<sup>[13,14]</sup>。

Arsenal-MSU 是 2.5 维粒子模拟(PIC)软件。该软件用宏粒子来描述电子注，它的基础是相对论情况下电子注与电磁场相互作用的自洽性分析。它可以分析包含电子枪(可以是热发射阴极，场发射阴极)，线性和非线性群聚段(可以使用基波或二次谐波谐振腔)，分布式输出结构，普通或降压收集极的速调管放大器。使用时，只需输入速调管的结构和工作参数，就可以模拟速调管从阴极到收集极的全部物理过程。

Arsenal-MSU 软件在前苏联和俄罗斯的多个研究所中应用，用来设计制造相对论和非相对论速调管，其有效性得到了检验。日本高能物理所，法国 TED 公司以及中国科学院电子学研究所也使用了 Arsenal-MSU 来计算大功率多腔速调管，计算结果和实验结果符合得比较好。

## 3 超宽带多注速调管的初步设计

中国科学院电子学研究所正在研制的多注速调管放大器，工作在 L 波段，连续波输出功率 100kW，带宽 10~14%，增益 40~50 dB，效率 40~50%。

为了实现这些参数，选择电子注数目为 18，内层  $R=10\text{mm}$  处均匀放置 6 个电子注，外层  $R=18.5\text{mm}$  处均匀放置 12 个电子注，单个电子注的导流系数为 0.7 微朴，这样能保证在给定带宽内实现高效率(>40%)。为了在相互作用段得到比较均匀的磁场，使用电磁聚焦方式。

该速调管高频相互作用段由 6 个谐振腔构成的群聚段和一个工作在  $\pi$  模的滤波器加载双间隙耦合谐振腔构成的输出段组成，使用 1.5 维软件 Klystron-MSU 对群聚段谐振腔参数和漂移管的长度进行初步优化。由于 1.5 维软件不能计算双间隙腔，所以在计算时用调谐到中心频率的单腔来等效。

考虑到合适的电子注群聚以及电子注的等离子体缩减波长等因素，得出漂移管的长度；考虑到电子注群聚因素以及获得最大的频带特性，确定谐振腔参数(调谐频率  $f$ ，特性阻抗  $R/Q$ ，有载  $Q$  等)。

第 1 腔调谐到中心频率，第 2 腔调谐到频带的低端，第 3 腔调谐到频带的高端。前 3 个腔构成了速调管的线性放大部分。后面的腔则调谐到频带的高端以外，用以改善频带的高端特性，输出腔调谐到中心频率。

输入功率从 10W~50W，根据设计要求，频带内效率为 40~50%，用 1.5 维软件得到了谐振腔参数以及漂移管长度的初步值，作为进一步研究的基础。

### 4 超宽带速调管的电子光学系统

由于 1.5 维理论不考虑聚焦磁场的影响，在输入腔入口处使用均匀的电子注分布，它得到的最佳频带特性不一定是 2.5 维软件计算的最佳值，因此必须使用 2.5 维软件 Arsenal-MSU 检查 1.5 维软件得到的数据。

首先用 Arsenal-MSU 计算该速调管的电子光学系统，图 1 是用 Arsenal-MSU 计算的单个电子注情况。图的上半部分是电子注轴向磁场分布图。根据电子光学计算结果，电子注电流为 1.15A，与实验结果一致。并且在入口处的电子注径向分布比较均匀，有利于得到较好的输出性能。

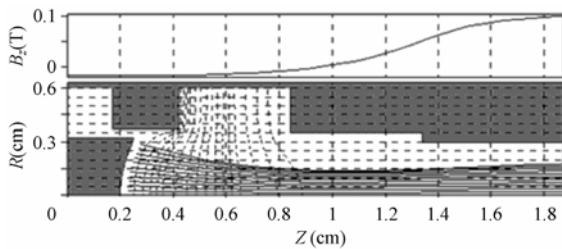


图 1 Arsenal-MSU 计算的单个电子注情况

为了得到最大的电子注通过率，选取电子注半径与漂移管半径比值  $r_b/r_d = 0.5$ 。

### 5 超宽带速调管的输出特性

用 2.5 维软件 Arsenal-MSU 对电子注以谐振腔的相互作用进行模拟，以检验 1.5 维软件计算的输出特性。由于多注速调管是非轴对称结构，因此用 3 维软件来模拟是最符合实际情况的，但是由于目前没有比较精确且便于使用的速调管专用模拟软件，因此这里使用 2.5 维软件来模拟。由于 Arsenal-MSU 在模拟时使用一个电子注来模拟多个电子注，因此有必要首先讨论其适用性。

要用单个电子注来模拟多个电子注与谐振腔的相互作用，需要满足以下 3 个条件。

(1) 要求各个电子注的状态基本相同。该管采用电磁聚焦方式，根据计算，轴向位置相同，半径不同电子注处的聚焦磁场差异低于 0.2%，而各电子注电压电流等参数一致，可以认为各电子注的状态相同。

(2) 要求各不同位置漂移间隙处高频电场分布相同。对于同一层电子注，多注速调管由于存在多个漂移管，因此其工作模式是变形的  $TM_{010}$  模式。由于漂移管排列的对称性，该模式在同一层不同位置漂移管间隙处的激励的高频电场是相同的。谐振腔的高次模式，其频率与电子注二次和三次谐波频率相差较远，不能被激励，因此同一层不同

位置漂移管处的高频电场是相同的。

对于不同层电子注，由于 L 波段速调管谐振腔体直径与漂移头直径相比大很多，因此内外层漂移管间隙处的高频电场差异比较小。用 3 维软件 MicroWave Studio 分别计算出内外层电子注中心处高频电场沿轴线分布的情况，如图 2(a)和图 2(b)所示。图 2(a)和图 2(b)之间场分布以及电场幅值的差异很小，根据计算，内外层处电场幅值差异约为 4%，R/Q 值差异不到 3%，可忽略内外层高频电场的差异，认为不同层漂移间隙处的高频电场分布相同。因此，可以认为各不同位置漂移间隙处高频电场分布基本一致。

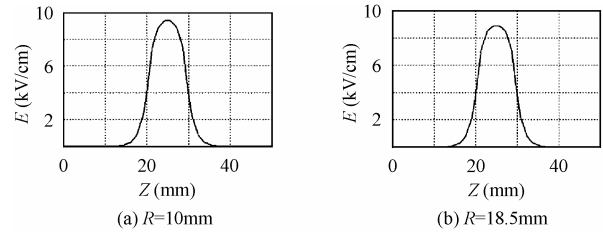


图 2 内层(a)和外层(b)电子注中心处高频电场沿轴线分布的情况

(3) 要求电子注之间的相互作用力可以忽略不计。电子注之间的相互作用力包括库仑力和磁场力。对于多注速调管，漂移管之间有一定距离，电子注之间的库仑力和磁场力值与电子注受到的其它作用力相比非常小，可以忽略。因此可以不考虑电子注之间的相互作用力。

由于以上原因，在使用 2.5 维软件模拟时，可用单个电子注代替多个电子注与谐振腔的相互作用。

调节谐振腔的 Q 和 R/Q 等参数，对速调管进行优化，从而得到最理想的频带特性和尽可能大的输出效率。图 3 是输入功率 12W 时的频带特性，带宽约为 14%，带内效率约为 50%。可以看到，1.5 维和 2.5 维软件的结果基本一致，这只有在频带内的电子注通过率接近或等于 100% 时才会发生。

根据电子注电流基波和二次谐波的幅值在轴向的变化可以看到电子注在速调管群聚段的群聚过程。为了得到平

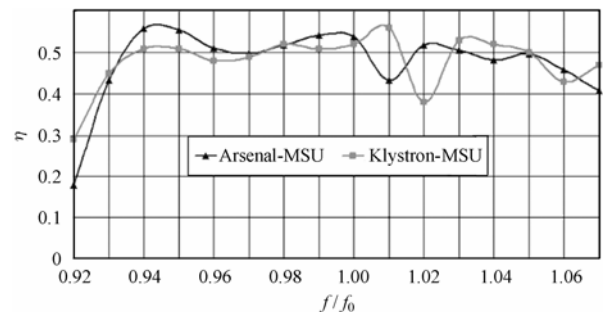


图 3 超宽带多注速调管的频带特性

坦的输出特性, 最理想的情况是在频带内不同工作频率, 电子注基波电流的幅值在输出腔入口处基本一致。

对各工作频率点电子注电流基波和二次谐波的幅值以及效率变化进行分析, 在中心频率(图 4)和频带高端它们的变化是基本一致的。

在频带低端的电子注谐波特性(图 5)与中心频率(图 4)和频带高端的差异比较明显。

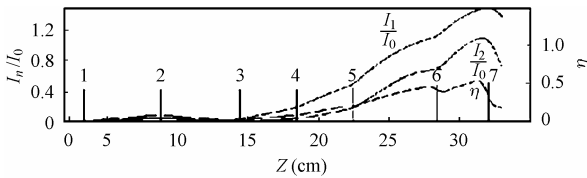


图 4 中心频率的基波和二次谐波幅值以及效率沿轴线的变化

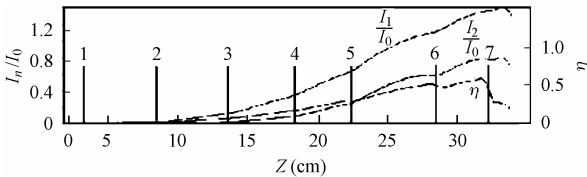


图 5 频带低端的基波和二次谐波幅值以及效率沿轴线的变化

该速调管是一个采用多腔参差调谐的宽带管, 调谐频率处于频带内的谐振腔是造成电流谐波特性差异的主要原因。不同工作频率下的电子注通过这些谐振腔时, 与腔的相互作用效果不同, 这必然导致电子注群聚的差异, 从而造成谐波特性的差异。但是可以看到, 频带低端和中心频率、频带高端时基波电流在输出腔入口处差异不大, 这是频带输出特性比较平坦的原因。

对电子注的传输进行分析。当速调管工作在中心频率时(图 6)以及更高频率时, 在输出腔没有发现电子截获现象, 但在这些频率点电子注半径的波动明显加大, 并且在第 6 腔后电子注半径增大。

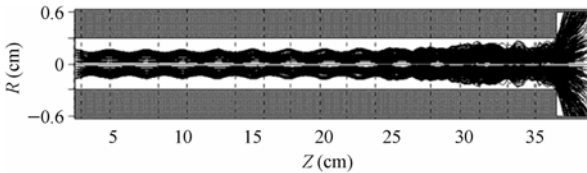


图 6 中心频率的电子注传输情况

图 7 是频带低端的粒子传输情况。电子注在输出腔和输出腔后有截获现象, 在增加了第 6 腔后漂移管的半径后, 电子截获现象有所改善, 但输出特性基本没有变化。频带低端电子注传输情况不佳的原因是由于第二腔调谐至频带低端, 因此工作频率降低时, 电子注群聚较早, 电子注发散相对严重一些。

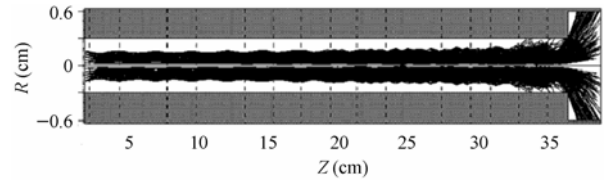


图 7 频带低端的电子注传输情况

### 6 结束语

本文采用对超宽带多注速调管群聚段进行了系统的研究, 研究表明, 实现带宽 10~14%, 增益 40~50dB, 效率 40~50%的超宽带多注速调管是可能的。

要精确地模拟超宽带多注速调管的特性, 最正确的方法是分析速调管从阴极到收集极的全部的物理过程。在当前还没有精确易用的速调管三维模拟程序时, 使用包含了计算电子枪, 电子光学系统, 相互作用区, 分布式输出结构和收集极等模块的 2.5 维软件, 可以对超宽带多注速调管进行比较精确的设计, 不失为一个有效的方法。

### 参考文献

- [1] Gel'vich E A, Zharyj E V, Zakurdaev A D, Pugin V I. Multiple beam klystrons. Tendencies of development. The Vacuum Microwave Electronics: the Collection Review. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics of RAS, 2002: 54 – 61.
- [2] Gelvich E A, Borisov L M, Zhary E V, Zakurdayev A D, Pobedonostzev A S, Pugin V I. The new generation of high power multiple-beam klystron. *IEEE Trans. on MTT*, 1993, 41(1): 15 – 19.
- [3] Pohl W J. The design and demonstration of a wide band multiple-beam traveling wave klystron. *IRE Trans. on ED*, 1965, 12(6): 351 – 358.
- [4] Boyd M R, Dehn R A, Hickey J S, Mihran T G. The multiple-beam klystron. *IRE Trans. on ED*. 1962, 9(3): 247 – 252.
- [5] Wright E, Balkcum A, Boheln H, Cattelino M, et al.. Development of a 10MW, L-band multiple beam klystron for Tesla. EPAC 2002, Paris, France, 2002: 2337 – 2339.
- [6] Wright E, Balkcum A, Boheln H, et al.. Design of a multiple beam klystron for TESLA. IVEC2003, Seoul, Korea, 2003, 263 – 264.
- [7] Beunas A, Faillon G, Choroba S, Gamp A. A high efficiency long pulse multiple beam klystron for the TESLA linear collider. DESY-M-2001-05-F; DESY-TESLA-2001-01. Hamburg: DESY, Feb 2001: 3 – 5.

- [8] Sandalov A N, Pikunov V M, Rodjakin V E. Program complexes for development high power high efficiency klystron amplifiers. The Vacuum Microwave Electronics: the Collection Review, Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics of RAS, 2002, 97 – 102.
- [9] Ding Yaogen, Xiao Xianghui, Rodjakin V E, Sandalov A N. Theoretical and experimental investigations of the high power MBK, based on 2.5D Arsenal-MSU Computer Code. Proceedings of the 2nd ICMMWT, Beijing, China, September 2000, 299 – 302.
- [10] Ding Y G, Rodjakin V E, Sandalov A N. Features of development and creation broadband klystron amplifiers. Proc. of VIII All-Russia a School-Seminar, Physics and Application of microwaves, Zvenigorod, May 26-30 2001, vol.1, 74 – 75.
- [11] Ding Y G, Rodjakin V E, Sandalov A N, Chashurina A N, Shen Bin. Features of electron bunching in the broadband klystrons. Proc. of IX All-Russia a School-Seminar, Physics and Application of Microwaves, Zvenigorod, 2003, vol.1, 23 – 24.
- [12] Ding Yaogen, Zhu Yunshu, Yin Xiuling, Shen Bin, Wang Caiying, Zhang Ding. 100 kW L-band CW broadband multiple-ceam klystron. IVEC 2003, Seoul, Korea, 2003, 368 – 369.
- [13] Kanavets V I, Lebedinsky S V, Vasil'ev E I, Granit Ya Sh, Zhuravlev S V, Kuchugurnyj V I, Sandalov A N. High power multicavity klystrons (parameters optimization). Electron. Tech., Ser. 1, Electronica SVCh, 1976, no.11: 33 – 45.
- [14] Lebedinsky S V, Kanavets V I, Vasil'ev E I, Granit Ya Sh, Kuchugurnyj V I, Sandalov A N. High power multicavity klystrons (Comparison of the theory and experiment). Electron. Tech., Ser. 1, Electronica SVCh, 1977, no.1: 41 – 54.
- 沈 斌: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为大功率微波器件.
- 丁耀根: 男, 1942 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波电子学和大功率微波器件.
- Aleksandr N. Sandalov: 男, 1945 年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为无线电物理学和大功率微波源.