

多注速调管——一种新型大功率微波放大器¹

丁耀根 彭 钧

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 本文介绍了一种新型大功率微波放大器——多注速调管。扼要地评述了多注速调管的发展概况,详细地介绍了基于速调管谐振腔基模的多注速调管的工作原理和主要特点。研究了多注速调管参数对工作带宽和输出功率的影响。给出了多注速调管的功率限制。指出了多注速调管的关键技术问题和发展趋势。

关键词 多注速调管, 导流系数, 谐振腔基模

中图分类号 TN122

1 引 言

多注速调管是在大功率速调管的基础上,采用多电子注技术发展而成的一种新型大功率微波放大器。通常,大功率速调管存在的主要问题有:(1)工作电压高。功率为 MW 级的速调管,其工作电压高达 70 ~ 80kV。高工作电压使电源调制器系统的复杂增加,成本提高,并容易产生高压击穿等问题。(2)体积和重量大。工作在 S 波段的 MW 级宽带速调管,其总长约 1.5m,管子重量达 70kg,而聚焦装置的重量近 300kg。在低频段(L 和 P 波段),管子和聚焦装置的体积和重量更大。(3)工作频带窄。在 MW 级功率电平上,速调管的瞬时带宽可达 5 ~ 10%。可以满足某些雷达系统的要求。但是,在几十千瓦至几百千瓦功率电平上,速调管的带宽较窄,不能满足雷达系统的要求。

多注速调管就是为了克服速调管的上述缺点而发展起来的一种新型大功率微波放大器。它的主要特点是:工作电压低,体积重量小,频带宽,效率和增益高。本文将扼要评述多注速调管的发展概况,阐述多注速调管的工作原理和主要特点,分析多注速调管的主要限制,指出多注速调管的关键技术问题和发展趋势。

2 多注速调管的发展概况

早在 40 年代初期,前苏联的 Kovalenko 和法国的 Bernier^[1,2]就提出了多注速调管的概念。由于当时技术条件的限制,不可能将它应用到实际器件中去。60 年代初,美国通用电气公司的研究人员开展了多注速调管的研究工作^[3-5]。他们采用波导型行波传输系统作为高频相互作用电路。他们研制的实验多注速调管,采用 12 个等间距排列的电子注和 3 个波导型行波电路,获得了 5MW 的峰值功率,12% ~ 16% 的带宽,23dB 的增益和 16%

¹ 1994-10-17 收到, 1995-03-05 定稿
国家自然科学基金资助项目

~ 21% 的效率。由于存在电子注聚焦系统复杂, 电子与高频系统互作用效率低, 稳定性差等问题。这种类型的多注速调管没有得到进一步发展。

60 年代末期, 前苏联科学家和工程师发展了基于速调管谐振腔基模 (TM₀₁₀ 模) 的多注速调管^[6-8]。经过 20 多年的努力, 俄罗斯科研生产联合体 Istok 和 Toriy 等单位已经研制出一系列高性能多注速调管。但是, 直到 1991 年, 他们才公开发表他们的研究成果。表 1 是 Istok 研制的多注速调管的主要性能指标。值得一提的是, Istok 研制的 L 波段 6kW 多注速调管, 采用 61 个电子注, 工作电压仅 2.7kV, 带宽高达 18%。效率 40%。增益 40dB。Toriy 研制的 S 波段宽带多注速调管, 峰值输出功率 150-250kW, 工作比为 5%。增益大于 45dB, 效率大于 40%。工作电压 17-19kV。该管采用周期反转永磁聚焦系统, 管长仅 800mm, 管子和聚焦系统的总重量仅 50kg。这类多注速调管具有工作电压低, 体积小, 重量轻, 频带宽, 增益和效率高等优点, 其综合性能指标明显优于同等功率电平的宽带速调管, 耦合腔行波管和正交场放大器, 成为新一代的大功率微波放大器。工作在基模的多注速调管的最关键技术问题是高发射电流密度阴极的制备。它限制了多注速调管的功率电平和使用寿命, 下面将详细进行讨论。

80 年代, 法国 Thomson-CSF 公司的研究人员提出利用多注速调管来减小低频速调管的体积和重量^[9-11]。表 2 给出该公司正在发展和计划发展的多注速调管和普通速调管性能指标的比较。该公司已完成多注速调管的原理性试验。该管工作在 425MHz, 采用 4 个电子注, 工作电压 18kV, 总电流 8.09A, 输出功率 64kW, 效率 44%。增益 34.6dB。此外, 该公司研究人员还申请了关于多注速调管高频互作用电路方面的专利^[12,13]。

从 1992 年开始, 中国科学院电子学研究所开始进行多注速调管的研究工作。目前正在研制 S 波段 200kW 多注宽带速调管。

表 1 Istok 多注速调管的性能指标

工作频段	X	S	L
输出功率 (kW)	25-50	1-1000	5-10
工作比 (%)	20-10	50-2	CW
带宽 (%)	2.5-6	5-10	15-20
工作电压 (kV)	12-15	2-35	5-7
效率 (%)	25-35	35-50	40
增益 (dB)	40	40	40
重量 (kg)	7.5-14	7-20*	20*

* 不包括聚焦装置

表 2 多注速调管与普通速调管性能比较

管型	I	II	III	IV	V
频率 (MHz)	425	425	500	500	850
输出功率 (kW)	100	100	1000	1000	500
电子注电压 (kV)	17	34	39	90	33
电子注电流 (A)	6 × 1.8	5.35	6 × 6.8	18.5	6 × 4.8
增益 (dB)	42	42	40	40	40
效率 (%)	55	55	64	62	53
腔数	4	4	4	4	4
总长 (m)	1.35	1.85	2.5	4.5	1.85
重量 (kg)	400	600	800	1700	600

注: I 为正在发展的多注速调管, II, IV 为普通速调管, III, V 为计划发展的多注速调管

3 多注速调管的工作原理和特点

本节着重讨论工作在速调管谐振腔基模的多注速调管。图 1 是它的工作原理图。与普通速调管一样, 它是由电子枪和聚焦系统, 高频互作用段和收集极等部分组成。多注速调管的最重要的特点是它包含 N 个分离的电子注。这 N 个电子注具有同一个聚焦系统, 与同一个高频互作用系统发生相互作用。下面讨论各部分的特点和工作方式。

3.1 多电子注的产生和聚焦

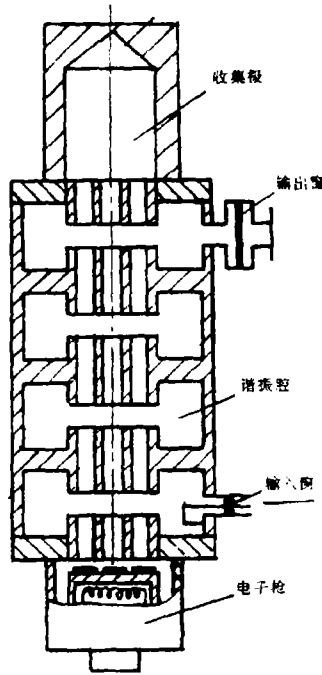


图1 多注速调管工作原理图

工作在 TM_{010} 模的多注速调管, N 个电子注均匀分布在以管子为轴心的圆柱上。典型的电子注数目为 7, 19, 37, 61 等。 N 个电子注分别由 N 个 Pierce 枪产生。每一个电子注分别通过分离的漂移管通道, 并由一个公共的聚焦系统聚焦。从电子注的产生和形成的角度来看, 它们是相互独立的, 其设计方法与普通速调管相同。但是, 多注速调管的电子光学系统有其特殊性。

(1) 由于采用 N 个电子注, 多注速调管的总导流系数可达 $10 \sim 20\mu P$, 而单个电子注的导流系数仅为 $0.3 \sim 0.6\mu P$ 。因此, 它的形成和聚焦比较容易。

(2) 由于电子注有效空间的限制, 电子枪收敛比很小, 阴极发射电流密度显著增加。通常, 多注速调管的阴极发射电流密度高达 $10 \sim 45A/cm^2$ 。因此, 高发射电流密度阴极的制备是多注速调管的最关键的技术问题。

(3) 由于电子注总导流系数高, 其工作电压大大降低, 有可能采用控制极调制方式。这种调制方式比栅极调制容易实现。一般控制极电压为工作电压的三分之一。加 200kW 多注速调管, 其工作电压低

于 20kV, 控制极电压 6 ~ 7kV, 可在实际系统中获得应用。

(4) 由于单个电子注导流系数小, 工作电压低, 电子注漂移管直径小, 容易实现周期反转永磁聚焦方式。这种聚焦方式将大大减小聚焦系统的体积和重量。如 S 波段 200kW 宽带多注速调管, 其相互作用长度 250mm, 聚焦磁场 1200GS, 采用 4 次反转, 其磁铁重量仅 13kg。

(5) 由于电子注分布在离磁场轴一定距离的圆周上。电子注位置上的径向磁场将影响电子注的通过率。文献 [6] 指出, 为了获得良好的电子注通过率, 要求 $B_{\perp}/B_{\parallel} \leq 0.01 \sim 0.02$ 。

3.2 高频相互作用系统

多注速调管采用工作在 TM_{010} 模的重入式谐振腔。由于谐振腔的漂移管头要容纳 N 个电子注通道, 因而其直径要比普通速调管的大得多。漂移管头的直径取决于总导流系数和阴极容许承受的发射电流密度。随着漂移管头直径增大, 谐振腔 R/Q 下降。同时, 处于不同圆周上的电子注通道的高频场分布变得不均匀, 从而影响了电子注与高频的相互作用效率。一般来说, 谐振腔的直径约为 0.5λ , 而漂移管头的最大直径为 $0.25 \sim 0.3\lambda$ 。在低频段, 当电子注数目较少时, 可采用分离式漂移管结构, 这种结构有较高的 R/Q 。对于高频段, 高功率多注速调管, 由于受阴极发射电流密度的限制, 必须采用工作在高次模式或同轴腔模式的谐振腔结构。

多电子注与谐振系统的相互作用的主要特点表现在以下两个方面:

(1) 每一个电子注通过谐振腔间隙时看到的间隙导纳相同。该导纳为谐振腔的总导纳 Y ,

$$Y = j \frac{1}{R/Q} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) + \sum_{i=1}^N G_{ei} + G_L, \quad (1)$$

式中 R/Q 为谐振腔总的 R/Q , G_{ei} 为第 i 个电子注的电子负载电导, G_L 为谐振腔外加负载电导。

(2) 谐振腔的间隙电压为 N 个电子注激励的间隙电压的总和,

$$V = \sum_{i=1}^N I_i / Y \quad (2)$$

此外, 由于漂移管头直径大, 输出耦合口的存在将会对某些电子注通道处的场形发生较大畸变。因此, 研究特殊的输出方式对于高性能多注速调管十分重要。Thomson CSF 公司的科学家提出了许多有趣的输出方式^[12,13]。

3.3 收集极

多注速调管的收集极可以是单个的, 也可以是 N 个分离的收集极。采用单个收集极时, 由于收集极区电位显著减小, 会形成虚阴极, 使电子返回互作用区, 造成寄生振荡或使信号频谱变坏。可通过合理设计收集极内表面形状或在收集极内放置特殊电极去掉慢电子来克服上述问题。

4 多注速调管参数对性能的影响

影响多注速调管的性能的因素很多, 这里着重讨论电子注数目, 导流系数, 阴极发射电流密度, 工作波长等参数对工作带宽和输出功率的影响和限制。

4.1 电子注数目和导流系数对工作带宽的影响

随着电子注数目和导流系数的增加, 电子注阻抗 R_0 减小。当阴极发射电流密度不变时, 谐振腔漂移管头的直径增大, 谐振腔的 R/Q 下降。因此, 随着电子注数目和导流系数增加, 多注速调管的带宽增加。图 2 给出电子注数目 N 对带宽的影响曲线。计算时, 假定工作带宽等于输出腔的 3dB 带宽, 即

$$\Delta f / f = (R/Q) / R_0. \quad (3)$$

其次, 假定随着电子注数目增加, 单个电子注导流系数和阴极发射电流密度不变。

4.2 阴极发射电流密度对工作带宽的影响

对于一定的电子注数目和导流系数, 谐振腔漂移管头的直径随阴极发射电流密度增加而减小, R/Q 增加, 带宽增加。图 3 给出阴极发射电流密度对带宽的影响曲线。

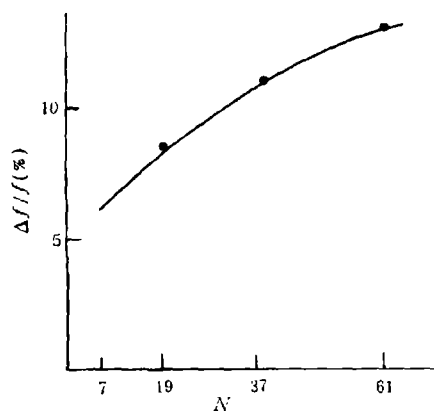


图2 电子注数目对带宽的影响
 $P_{out} = 200\text{kW}$, $j = 15\text{A/cm}^2$,
 $\lambda = 12.5\text{cm}$, $\beta_e d = 1.2$

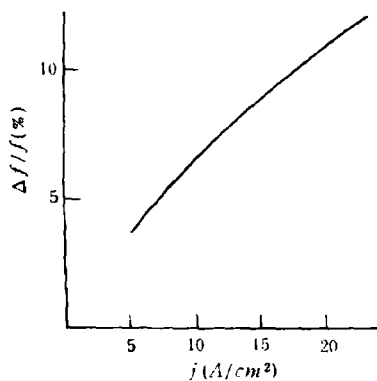


图3 阴极发射电流密度对工作带宽的影响曲线
 $\lambda = 12.5\text{cm}$, $P_{out} = 200\text{kW}$, $N = 19$, $V = 18\text{kV}$,
 $I_0 = 19 \times 1.457\text{A/cm}^2$, $\eta = 40\%$, $\beta_e d = 1.2$

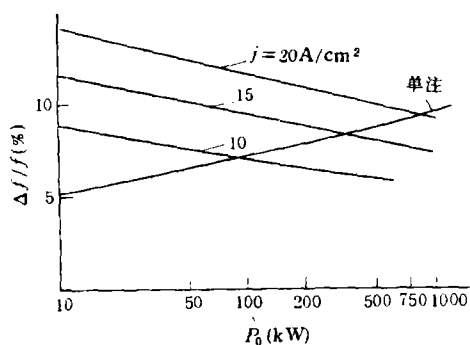


图4 输出功率对工作带宽的影响
 1. $N = 19$, $p_{er} = 19 \times 0.6\mu\text{P}$, $\eta = 40\%$,
 $\lambda = 12.5\text{cm}$, $\beta_e d = 1.2$
 2. $N = 1$, $p_{er} = 2.0\mu\text{P}$, $\eta = 35\%$,
 $\lambda = 12.5\text{cm}$, $\beta_e d = 1.2$

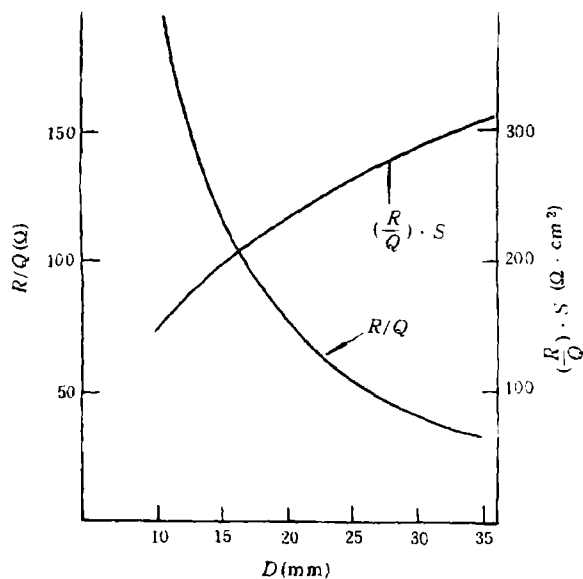


图5 漂移管头直径对谐振腔 R/Q 的影响
 $\lambda = 12.5\text{cm}$, 腔直径 = 6.25cm , 腔间隙 $d = 0.6\text{cm}$

4.3 输出功率对工作带宽的影响

对于单注速调管, 随着输出功率增加, R_0 减小比 R/Q 要快得多, 因而工作带宽增加。对于多注速调管, 随着输出功率增加, 在一定的阴极发射电流密度下, R_0 减小比 R/Q 的减小要慢, 因而工作带宽反而下降。图4给出输出功率对工作带宽的影响曲线。由图看出, 多注速调管作为宽带放大器的应用范围(指特定的工作波长)。在S波段, 当阴极发射电流密度为 10A/cm^2 时, 其输出功率小于 100kW , 当阴极发射电流密度为 15A/cm^2 时, 输出功率可达 300kW 。

4.4 漂移管头直径对谐振腔 R/Q 的影响

图 5 给出 S 波段多注速调管的谐振腔漂移管头直径 D 对 R/Q 的影响。当 D 从 10mm 增加到 20mm 时, R/Q 下降较快。当 D 继续增加时, R/Q 下降较慢。而随 D 增加时, 漂移管头的面积 S 成平方关系增加。由于电子注电导 G_0 随 S 增加而增加, 因而 $(R/Q)S$ 的增加意味着工作带宽增加。

4.5 输出功率与工作电压的关系

图 6 给出多注速调管与单注速调管的工作电压随输出功率变化的曲线。由图看出, 当注数目为 19 时, 多注速调管的工作电压仅为单注速调管的一半。

4.6 多注速调管的功率限制

工作在 TM_{010} 模的多注速调管, 由于受到阴极发射电流密度, 漂移管头直径大小 (即有效电子发射面积) 的限制, 其输出功率受到限制。图 7 给出对应于不同的工作波长和不同的阴极发射电流密度的功率限制曲线。由图看出, 在低频段, 其输出功率可达几百千瓦至几兆瓦, 而在高频段, 其输出功率仅为几千瓦至几十千瓦。通常, 窄带管要比宽带管的输出功率高一些。

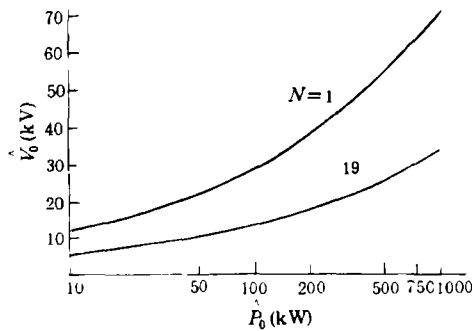


图 6 多注管与单注管工作电压的比较
1. 单注管 $\eta = 35\%$, $Per = 2.0\mu P$
2. 多注管 $\eta = 40\%$, $Per = 19 \times 0.6\mu P$

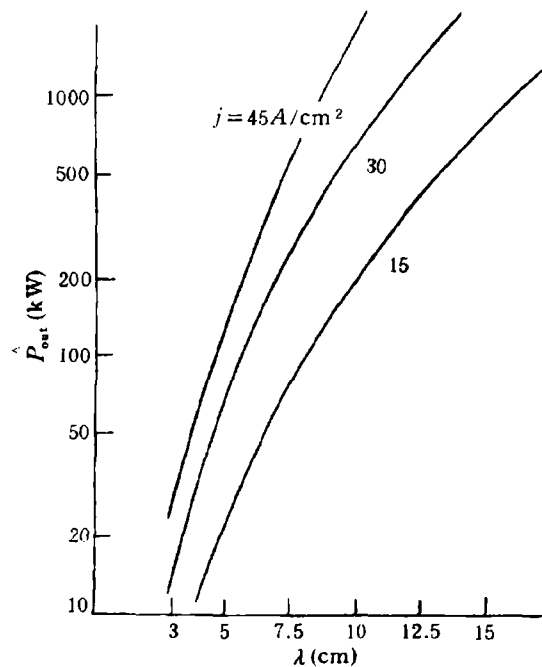


图 7 工作在 TM_{010} 模的多注速调管的功率限制曲线

腔直径 = $\lambda/2$, $N = 19$, $Per = 19 \times 0.6\mu P$,
电子注发射面占孔比 39.45%

5 多注速调管的关键技术问题以及发展趋势

在上面几节中, 我们比较详细地论述了工作在基模的多注速调管的性能和特点。这里评述多注速调管存在的关键技术问题, 主要包括:

5.1 高发射电流密度阴极的制备

这是研制高水平多注速调管面临的最关键的技术问题。目前, 俄罗斯研制的复膜浸渍钨钨阴极, 在长脉冲高工作比下, 当工作温度为 1100 °C 时, 发射电流密度可达 10–15A/cm², 工作寿命为 1000–2000h。研制发射电流密度高, 工作温度低, 寿命长的阴极, 对于多注速调管的发展是至关重要的。

5.2 多电子注的产生和聚焦

着重解决以下技术问题: (1) 带控制极的三极电子枪的设计和制造。降低控制极负偏压, 抑制控制极发射和保证阴极与控制极间的耐压。(2) 克服聚焦磁场的横向分量对电子注的影响, 提高电子注的直流和高频通过率。(3) 研制出波动小, 刚性好的周期反转永磁聚焦装置, 扩大其动态范围。(4) 多电子注通道的加工对中。此外, 为了降低阴极发射电流密度和提高管子工作寿命, 应发展收敛型多电子注电子枪。

5.3 高频相互作用系统

主要克服因漂移管头直径增大而引起的高频场不均匀性, 特别是输入和输出耦合器造成的场不均匀性问题。

多注速调管的主要发展趋势表现在以下几个方面:

1. 发展高次模多注速调管。主要目标是提高工作频率和输出功率。这类速调管的关键是工作在高次模的谐振腔。例如, 工作在 TM₂₂₀ 模的矩形谐振腔, 其输出功率为工作在 TM₀₁₀ 模的 4 倍。需要解决的技术问题有: (1) 压抑非工作模式的振荡。(2) 输入和输出腔与外电路的耦合。

2. 发展宽频带多注速调管。主要是雷达和通信方面的应用。其输出功率几十千瓦至几百千瓦, 带宽 5%–10%, 增益大于 40dB, 效率大于 40%。工作频段为 L, S 和 C 波段。

3. 发展低频段电视广播和同步辐射加速器用多注速调管。主要目标是减小体积和重量。

4. 提高多注速调管的可靠性和寿命。发展复膜浸渍阴极和合金型浸渍阴极, 发展高次模工作的谐振系统和收敛型多电子注电子枪结构等是提高可靠性和寿命的重要手段。

参 考 文 献

- [1] Kovalenko V F, Author's Certificate, No. 72756, Class 21, 13, Applied on Dec. 31, 1940, No. 304035, USSR.
- [2] Bernier J, Patent No. 992853, Sept. 15, 1944, France.
- [3] Boyd M R, *et al.*, IRE Trans. on ED, 1962, ED-9(3): 247.
- [4] Pohl W J, *et al.*, IRE Trans. on ED, 1965, ED-12(6): 351–368.
- [5] Branch G M, *et al.*, AD-807 515/2, AD-812 190/7, AD-815 777/8, Sept. 1966–March 1967.
- [6] Gelvich E A, *et al.*, IEEE Trans. on MTT, 1993, MTT-41(1): 15–19.
- [7] Pobedonostsev A S, 1993 IEEE MTT-S, Digest, 1993, 1131–1134.

- [8] Gelvich E A, *et al.*, 1991 IEEE MTT-S, Digest, 1991, 1319-1329.
- [9] Faillon G, Technical Digest of IEDM, 1986, 784-786.
- [10] Bearzatto C, *et al.*, ITG-Fachbericht, No. 120, 1992, 45-51.
- [11] Reod D W. 1988 Linear Accelerator Conference, 1988, 514-518.
- [12] Mourier G, European Patent EP O 440530 A1, 1991, 1-11.
- [13] Mourier G, European Patent EP O 440529 A1, 1991, 1-13.

MULTIBEAM KLYSTRON—A NEW TYPE OF HIGH POWER MICROWAVE AMPLIFIER

Ding Yaogen Peng Jun

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Abstract A new type of high power microwave—multibeam klystron has been described. The development of multibeam klystron is commented on briefly, the principle and main characteristics of multibeam klystron based on the fundamental mode of klystron cavity are given in detail. The effect of the parameters of multibeam klystron on the operating bandwidth and output power has also been studied, and the power limitation is given in this paper. Finally, the key technical problems and trend of multibeam klystron are pointed out.

Key words Multibeam klystron, Perveance, Fundamental mode of cavity

丁耀根：男，1942年生，研究员，现从事微波电子学和大功率微波器件的研究工作。

彭钧：男，1935年生，研究员，现从事微波电子学和大功率微波器件的研究工作。