

多注速调管电子光学系统的研究¹

丁耀根

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 本文比较系统地阐述了在多注速调管电子光学系统中开展的研究工作。给出了周期反转永磁聚焦系统的设计方法和设计考虑,讨论了控制极调制多注电子枪设计中遇到的特殊问题和解决方法,建立了计算电子光学系统的二维磁场和电子轨迹计算软件,并应用这些软件设计和研制了 S 波段 200kW 多注宽带速调管的电子光学系统。该管输出功率 180kW,带宽 7.6%,效率 44.4%,增益大于 45dB,电子注通过率 89%,高频通过率 69~83%。设计计算与实验结果有较好的一致性。

关键词 多注速调管,多注电子光学系统,周期反转永磁聚焦,控制极调制
中图分类号 TN122, O463.1

1 引 言

多注速调管是在大功率速调管的基础上,采用多电子注技术而研制成功的一种新型大功率微波放大器件^[1]。在多注速调管中,由于采用多个电子注增加电子注导流系数,因而具有频带宽,增益和效率高,工作电压低和重量轻等一系列特点,特别适合于输出功率几十千瓦至几百千瓦(低频段可达兆瓦级)的宽频带雷达系统,也可应用于加速器,通信和电视广播等微波电子系统。

多电子注的产生,形成和聚焦是实现高性能多注速调管的最关键的技术问题之一。由于采用多个电子注(电子注数目一般为几个到几十个,高的可达上百个)实现高电子注导流系数(几个至十几个微朴,高的可达几十微朴),因而多注速调管电子光学系统的主要特点为:

(1) 单个电子注导流系数小 ($0.3\sim 0.8\mu\text{P}$), 漂移管直径小, 可以采用周期反转永磁聚焦; 大大减小了整管的体积和重量。(2) 工作电压低, 可以实现控制极调制方式, 容易实现高功率微波电子系统脉冲宽度的变化, 同时减小了调制器的体积和重量, 降低了成本。

与单注速调管电子光学系统相比, 多注速调管电子光学系统有以下几个技术难点:

(1) 由于受到空间的限制, 电子枪面压缩比小, 一般为 2~4。因而阴极发射电流密度大大增加。通常多注速调管阴极负载为 $10\sim 30\text{A}/\text{cm}^2$ 。因此研制高发射电流密度长寿命阴极是实现高性能多注速调管的最关键的技术难题。

(2) 实现周期反转永磁聚焦系统, 必须在一定的半径范围内, 获得轴向磁场均匀, 横向磁场分量小(反转区除外), 反转区短的周期反转轴向磁场分布。

(3) 在一定的工作电压范围内, 实现电子注与周期反转永磁聚焦系统的匹配。并在电子注长径比很大的情况下(100~200), 获得高的电子注通过率。

(4) 控制极与阴极之间的耐压。由于控制极电压为电子注的电压的 $1/3\sim 1/4$, 因而控制极与阴极之间具有高的电场强度, 通常高达 $10\sim 15\text{kV}/\text{mm}$ 。控制极与阴极之间的耐压对管子稳定工作极为重要。

¹ 1998-09-08 收到, 1999-90-41 定稿
国家自然科学基金资助项目(批准号: 69571029)

(5) 多电子注电子枪与高频相互作用段的对中, 对获得好的电子注通过率, 从而提高管子的平均功率, 将起关键作用。

(6) 抑制控制极的热发射, 也是保证管子稳定工作的关键因素。

(7) 多电子注在收集极中的发散。

本文着重介绍我们在多注速调管电子光学系统中开展的研究工作。

2 周期反转永磁聚焦系统的设计和计算

图 1 是多注速调管周期反转永磁聚焦系统的结构示意图。为了获得反转区长度短, 均匀区内径向磁场分量小, 轴向磁场分量平坦的磁场分布。聚焦系统的几何尺寸应满足以下条件 [2]:

$$0.8 \leq (a/t) \leq 1.3, \quad (1)$$

$$l \geq 3/4R(B/B_1). \quad (2)$$

$$0.05 \leq (h/L) \leq 0.15, \quad (3)$$

$$d/L \leq 0.6, \quad (4)$$

$$0.8 \leq D/L, \quad (5)$$

其中 R 为最外层电子注通道中心与极靴中心的距离; l 为相邻电子注通道之间的壁厚; B 为极靴间磁感应强度; B_1 为极靴材料磁化曲线线性部分的最大磁感应强度。其余参量的定义见图 1。

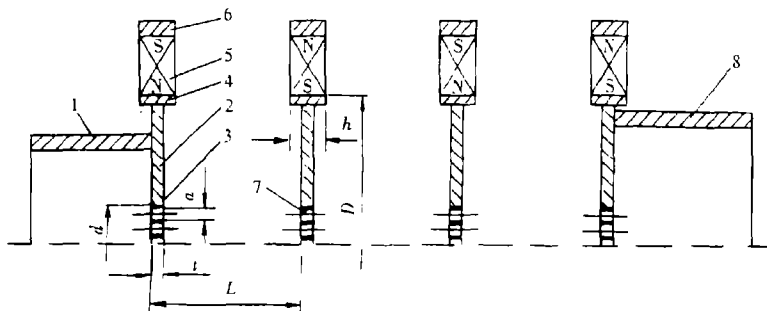


图 1 周期反转永磁聚焦系统结构示意图

1 电子枪磁屏, 2 极靴, 3 栅网, 4 凸缘

5 永久磁铁, 6 外磁屏, 7 电子注通道, 8 收集极磁屏

在设计中, 主要考虑以下两个问题:

(1) 反转周期数 N 的选取 在总的相互作用长度下, 反转周期数越多, 获得同样磁场强度所需的磁铁的重量越小, 一般磁铁重量反比于 N^3 。但反转数越大, 电子注与磁场之间的匹配会越困难, 工作电压的动态范围会越窄, 此外, 反转周期数 N 和极靴间距 L 还受到谐振腔尺寸和腔间漂移距离的限制, 对于工作频率高, 相互作用长度较短的多注速调管, 选择较少的反转周期 ($N = 2 \sim 3$), 对于工作频率低, 相互作用长度长的多注速调管, 选择较多的反转周期 ($N = 4 \sim 5$)。

(2) 极靴厚度 t 和相邻电子注通道之间壁厚 l 的选取 为了使反转区的长度尽可能小, 极靴厚度 t 应尽可能小。此外为了充分利用电子注的相互作用空间, 相邻电子注道通之间的

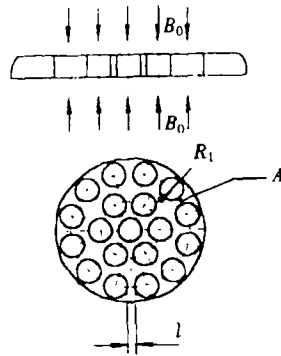


图2 磁极靴栅网结构示意图

壁厚 l 也应尽可能小, 否则会增大栅网直径, 增大谐振腔漂移管头的直径, 降低谐振腔的 R/Q , 但是, 当减少 t 和 l 时, 将导致极靴材料的磁饱和, 并造成电子注通道内横向磁场的增加, 影响电子注通过率。下面分析极靴内磁场强度大小和电子注通道内磁感应强度的横向分量大小^[3,4], 图2为多注速调管的磁极靴的示意图。

如果在半径 R_1 处存在 N 个电子注通道, 则相邻电子注通道之间(如图中 A 点) 栅网内的磁感应强度 B_A 为

$$B_A = 2\pi R_1^2 B_0 / (Nlt). \quad (6)$$

为了不产生磁饱和, B_A 的值必须小于磁性材料的磁饱和和感应强度 B_1 (指磁性材料磁化曲线线性部分的最大磁感应强度, 电子管纯铁 DT8 或电工纯铁 DT4, B_1 的数值为 14000~18000Gs)。

电子注通道中的径向磁场分量 Br 为

$$Br = CR_1 B_0 / (t\mu_m), \quad (7)$$

其中 C 的数值为 2~4。

多注速调管中, 磁场的径向分量 Br 与轴向磁场之比应小于 0.1%。此外在多电子注系统中, 每个电子注也将产生横向磁场。横向磁场将使电子注产生横向位移, 横向位移 y 由下式确定^[3]:

$$y = \frac{B_y}{B_z} z \left(1 - \frac{\sin(\omega_c z / v_z)}{\omega_c} \right), \quad (8)$$

$$\omega_c = \frac{e}{m} B_z, \quad (9)$$

式中 Z 为电子注轴向长度, V_z 为电子注轴向速度, B_z 为轴向磁场, B_y 为横向磁场。

在周期反转永磁聚焦系统中, 由于 B_z 周期性改变符号, 由电子注产生的横向磁场对电子注偏转在高频互作用区内是相互抵消的, 但由磁系统本身产生的横向磁场的作用不能抵消。

根据上述设计考虑, 我们设计了一个 S 波段 18 注 200kW 多注宽带速调管的周期反转永磁聚焦系统, 采用自编的二维磁场计算软件 CTA, 对该系统进行设计计算, 采用磁能积 20MGOe 的低温度系数钕铁硼磁铁, 系统总长度为 257.5mm, 反转 4 次, 磁铁重量为 4.4kg, 极靴重量 5.6kg。图 3 给出计算和测试结果, 实验与计算结果有较好的一致性。计算和实验

表明, 如以 90% 的磁场值定义反转区的长度, 则当极靴厚度为 4mm, 电子注通道直径为 4mm 时, 反转区长度为 8mm, 等于 2 倍电子注通道直径。在极靴之间的轴向磁感应强度的波动小于 10%。

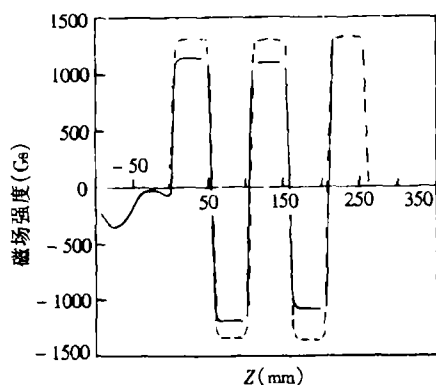


图 3 周期反转永磁聚焦系统的轴向磁场分布, — 测量值, --- 计算值

3 控制极调制的多注电子枪的设计和电子轨迹的计算

控制极调制的多电子注电子光学系统的结构示于图 4。一般采用公共的热子作加热体, 而阴极是分离的, 控制极是公共的, 每一个电子注形成一个独立的电子光学系统, 最后在一个公共的收集极中发散。

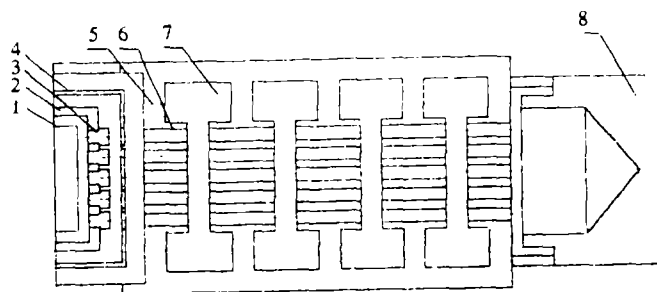


图 4 多电子注光学系统

- 1 加热体, 2 阴极支持座, 3 阴极, 4 控制极
5 阳极, 6 电子注通道, 7 谐振腔, 8 收集极

控制极调制的方式有两种 (见图 5)。对于图 5(a) 所示的控制方式, 在脉冲间隔内, 控制极相对于阴极为负电位, 管子处于截止状态, 在脉冲期间, 控制极与阴极等电位。这种调制方式的控制极截止偏压高, 约为电子注电压的 $1/4 \sim 1/3$, 控制极-阴极间的场强高, 对耐压要求高, 但它在脉冲期间不会因阴极边缘或阴极支持座的热电子发射引起控制极电流增加。对于图 5(b) 所示的控制方式, 在脉冲期间需加一正电压。这种调制方式的控制极截止偏压低, 约为工作电压的 $1/5 \sim 1/4$ 。但由于脉冲期间内, 控制极相对于阴极为正, 因而阴极边缘和阴极支持座的热电子发射会导致控制极电流增加, 必须在阴极边缘和阴极支持座涂复反发射材料来抑制热发射。

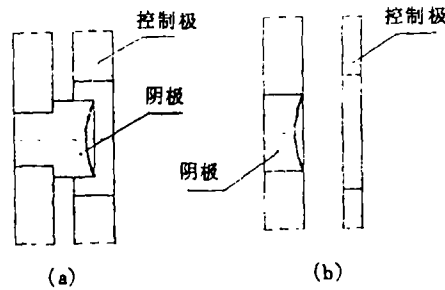


图 5 两种控制极结构

设计控制极调制和周期反转永磁聚焦方式的多注电子枪时应考虑以下几个方面的问题:

(1) 控制极方式的选择 对于低工作频率和低峰值功率的多注速调管,可采用图 5(a) 的调制方式。对于高工作频率和高峰值功率的多注速调管,可采用图 5(b) 的调制方式。

(2) 电子枪过渡区的设计 与单注速调管不同,多注速调管电子枪过渡区的设计受到电子枪磁极靴尺寸的限制。磁极靴孔径一般等于电子注漂移管孔径,因此,阴极面的磁场与主磁场方向相反。设计时,可调节电子枪磁屏的直径和长度,以及第一个磁体的尺寸,获得与电子枪匹配的过渡区磁场分布。

(3) 电子注波动周期与磁场周期的匹配 对于周期反转永磁聚焦系统,由于存在反转区,进入反转区的电子必须是径向压缩的,即处于 dr/dz 的负最大处。因此与一般均匀磁场聚焦电子注不同,设计周期反转永磁聚焦的电子注,应有一定的波动,否则,很难获得匹配。

(4) 收集极区电子注的发散和防止虚阴极的产生 多注速调管一般采用公共收集极,在设计时要考虑以下两个问题。一是收集极区中反向磁场会导致电子注收敛,影响电子注发散,二是由于空间电荷效应,在收集极区有可能形成虚阴极,使电子注返回相互作用区,引起多注速调管的不稳定性。因此在设计时,应尽量将收集极区磁场负最大值移出收集极,收集极入口尽量避免突变,可做成锥形过渡,必要时在收集极和管体之间加一正电压。

基于上述设计考虑,我们研制了一个 S 波段多注速调管电子光学系统。电子注数目为 18,电子注电压为 18kV,每个电子注的电流为 1.481A,导流系数 $0.587\mu\text{P}$ 。阴极底部直径为 3.6mm,阴极曲率半径为 4.5mm。控制极截止负偏压为 6.2kV。控制极-阴极平均场强 12kV/mm,控制极-阳极平均场强 9.3kV/mm。

图 6 给出电子轨迹轴向分布。设计计算采用二维电子光学计算软件 GUNA,它是以 SLAC-226 程序为基础改进而成的。计算中遇到的主要问题是电子轨迹的收敛问题,计算积累误差,近轴轨迹空间电荷估算产生的误差以及电子注波动周期与反转周期不匹配等都会影响电子轨迹的收敛。通过调节电子枪过渡区磁场,以及各磁周期磁场的数值,可获得好的层流性,并获得好的收敛性,一般要达到好的收敛,总迭代次数为 50~100 次,在 586 微机系统上,计算时间 3~5min。

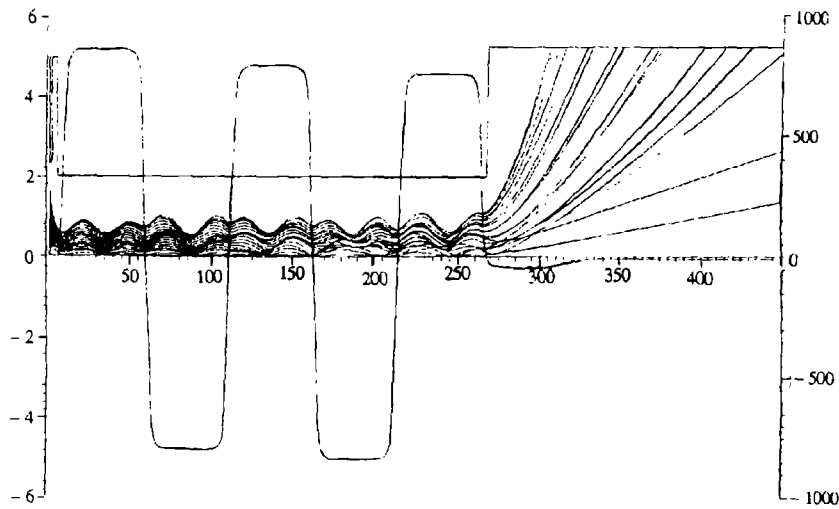


图 6 电子光学系统的电子轨迹

4 多注电子光学系统的实验结果

根据上述设计计算的 18 个电子注的多注电子光学系统已用于 S 波段多注宽带速调管^[5]。该管的电子注电压 18.5kV，电子注电流 22.5A，输出功率 185kW，效率 44.4%，增益大于 45dB，1dB 带宽 7.6%，电子注截止负偏压 6.5~7.0kV，电子注直流通率 88%，高频通过率 69~83%，图 7 为电子注直流通率随工作电压变化曲线。该管的具有较宽的动态范围 (13kV~19kV)。以上实验结果初步表明我们设计和研制的多注电子光学系统是成功的。影响电子注直流和高频通过率的主要因素有以下几个方面：(1) 实际制作的周期反转永磁聚焦系统存在圆周不对称性，而且其磁场的数值与理论计算数值有一定差别，导致电子注波动与反转周期的不匹配。(2) 多注速调管相互作用区的多电子注通道与多注电子枪的对中不理想，造成直流通率下降。(3) 经过相互作用的电子注其波动周期发生变化，导致电子注波动与磁场的反转周期不匹配。

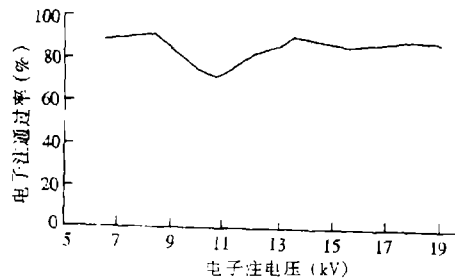


图 7 电子注通过率随电子注电压的变化曲线

5 结 论

本文比较系统地阐述了我们在多注速调管电子注光学系统上开展的研究工作。采用周期反转永磁聚焦系统, 高发射电流密度阴极, 和控制极调制方式, 是实现高性能多注宽带速调管的技术关键。为了完成上述设计, 我们发展了计算磁场和电子光学系统的二维计算机软件, 研制成功了相互作用区长度为 257.5mm, 反转数为 4 的周期反转永磁聚焦系统, 包括磁铁和极靴在内的聚焦系统重量仅为 10kg, 整管重量 43kg, 研制成功了 18 注 S 波段多注速调管, 获得了峰值功率 185kW, 带宽 7.6%, 效率 44.4%, 增益 45dB 的好结果, 电子注的直流通过率接近 90%。完全证实了理论设计计算的正确性。下一步的研究工作是进一步提高电子注通过率。在计算方法上, 采用 2.5 维粒子波包模型来计算高频相互作用对电子注的影响, 在实际制管中进一步提高对中精度, 改善周期反转永磁系统的径向不均匀性, 发展三维磁场计算模型进一步研究横向磁场对外层电子注的影响等。

参 考 文 献

- [1] 丁耀根, 彭钧. 多注速调管——一种新型大功率微波放大器件. 电子科学学刊, 1996, 18(1): 64-71.
- [2] Drozdov S S, *et al.* Reversible Periodic Magnetic Focusing System. U.S. Patent 4, 443, 270, 1984, Feb. 21.
- [3] Molokovsky S I. 多注速调管电子光学系统. 访华报告, 北京: 中国科学院电子学研究所, 1994 年 11 月.
- [4] 丁耀根, 赵京君, 彭钧, 蒋振柏. 多注速调管用周期反转永磁聚焦系统的研制. 中国电子学会真空电子学分会第十届年会论文集, 1995, 69-72.
- [5] 丁耀根, 彭钧, 等. S 波段多注速调管的研制. 电子科学学刊, 1996, 18(2): 221-224.

STUDY ON ELECTRON OPTICS SYSTEM OF MULTI-BEAM KLYSTRON

Ding Yaogen

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract Research work on electron optics system of multi-beam klystron has been described systematically in this paper. Design consideration and design methods for periodic reversal permanent magnet focusing system are presented, special technical problems met in design of multi-beam electron gun with controlling electrode are discussed. 2D computer software for magnetic field and electron trajectory of electron optics system has been established, and applied to calculate the electron optics system of S-band 200 kW multi-beam klystron. This multi-beam klystron has output power of 180 kW, bandwidth of 7.6%, efficiency of 44.4%, gain of greater than 45dB, DC beam transmission of 89%. RF beam transmission of 69~83%. There is good consistence between experiment and calculation.

Key words Multi-beam klystron, Multi-beam electron optics system, Periodic reversal permanent focusing, Modulation with control grid

丁耀根: 男, 1942 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事大功率微波毫米波的产生和应用, 特别是大功率微波电真空器件的研究工作。