

文章编号: 1001-4322(2005)08-1171-04

# 多注速调管的 3 维数值计算\*

杨郁林, 张治畴, 丁 武

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 用 KARAT-3D 全电磁 PIC 程序, 对多注速调管设计模型波束相互作用的物理过程进行 3 维数值模拟, 给出了输出功率、电流等基本的物理参数。在输入电压 14 kV, 电流 20.8 A 时候, 得到了 128 kW 的峰值输出功率, 峰值效率是 43.8%。考察了电子在高频场的运动和电流调制, 分析了电流在各作用腔中的调制, 并对多注速调管不同发射度时电子传输进行了研究。结果表明: 电子均匀发射时高频场的调制对电流传输效率影响不大, 电流和电场调制随着腔的增加而增加。电子能量在输出腔的位置减小很多, 电子有一部分能量转化为微波。

**关键词:** 多注速调管; 高功率微波; PIC 方法; 调制系数

**中图分类号:** TN122 **文献标识码:** A

对多注速调管(MBK)<sup>[1~8]</sup>的数值模拟计算最大的困难在于,多注速调管的结构复杂。中国科学院电子所提供的多注速调管设计模型总共有 18 束电子,7 个腔。并且其中的共振腔是有负载的,也就是说计算共振腔的时候导体的边界不能用理想导体代替,而非理想导体边界的 3 维数值计算。国内外这方面很少有文献报导,这也是整个课题研究中遇到的最大的瓶颈。为此,我们探讨了 3 维有限导体边界计算问题,对的波束相互作用进行了整体的数值模拟,得到了初步的结果。

我们主要研究了多注速调管的电子与波的相互作用,计算给出了微波输出功率,电流等基本的物理参数,得到的计算结果符合设计要求。特别研究了电子在高频场中的传输问题,分析了电流在各腔的调制系数的增长,同时也研究了不同电子发射度对电子传输的影响。

## 1 多注速调管的尺寸

多注速调管的结构如图 1 所示,结构尺寸由中科院电子所提供,主要的参数如下:漂移管的半径  $a = 3.0$  mm,电子注的半径 1.5 mm,电子注数目 18 注,电子注的平均电流密度  $16.3$  A/cm<sup>2</sup>,电压为 14 kV。第一个腔注入的微波为 1.25 GHz,输入的功率为 50 W。外加磁场为 0.90 T。仅有一的点改动是将双间隙输出改为单间隙输出。

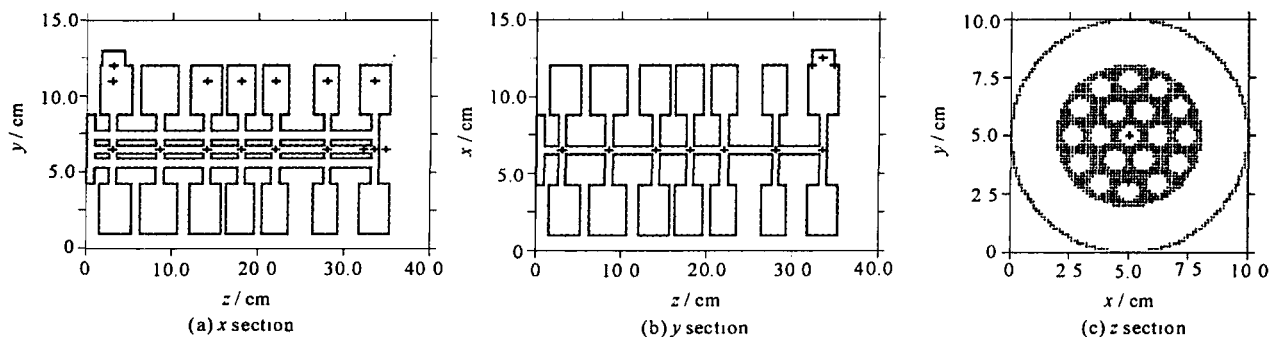


Fig. 1 Cross section of the MBK configuration

图 1 MBK 截面示意图

其中输入腔中心频率 1.25 GHz,纵向开口 2 cm,横向开口 8 cm,y 方向注入微波,频率 1.25 GHz,注入的功率 102 W。负载  $Q = 44.7$ 。输出腔双间隙输出,简化为单间隙输出,中心频率仍是 1.25 GHz。纵向开口 2.5 cm,横向开口 9 cm,x 方向输出,负载  $Q = 23$ 。共振腔是有损耗的,计算中不能用理想导体边界,这里我们用加

\* 收稿日期:2005-01-22; 修订日期:2005-07-26

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:杨郁林(1971—),男,博士,副研,主要从事高功率微波研究;北京 8009 信箱;E-mail: yang\_yulin@mail.iapcm.ac.cn。

有限电导率的办法用非理想导体边界进行数值计算,为了验证加的有限导体的正确性,我们用 MAFIA 对多注速调管的共振腔进行了校验,具体的数值计算结果如表 1 所示。

表 1 多注速调管的共振腔参数

Table 1 Parameter of the resonant cavities

No	1	2	3	4	5	6	7
frequency/ GHz	1 250	1 175	1 280	1 325	1 360	1 390	1 250
simulation of $Q$ factor by MAFIA	-	45	100.0	60.0	60.0	1000	-
simulation of $Q$ factor by KARAT	44.7	46	98	59	63	1028	23

从表 1 可以看出, KARAT 计算的  $Q$  值和 MAFIA 计算的  $Q$  值比较接近,众所周知,MAFIA 在计算腔的频率和  $Q$  值是非常可靠的,误差在 1% 以内,由于  $Q$  值是一个综合的物理量,两者相对误差在 5% 以内,说明了 KARAT 有限电导率边界的计算结果是可靠的。

## 2 多注速调管的电子传输和电流调制

### 2.1 电子传输

我们首先考察了电子的运动,图 2(a) 给出了电子在 25 ns 时  $x$  截面的轨迹图。图 2(b) 给出了这个时刻的电子相图,从轨迹图和相图可以看到电子已经受到了很好的群聚。

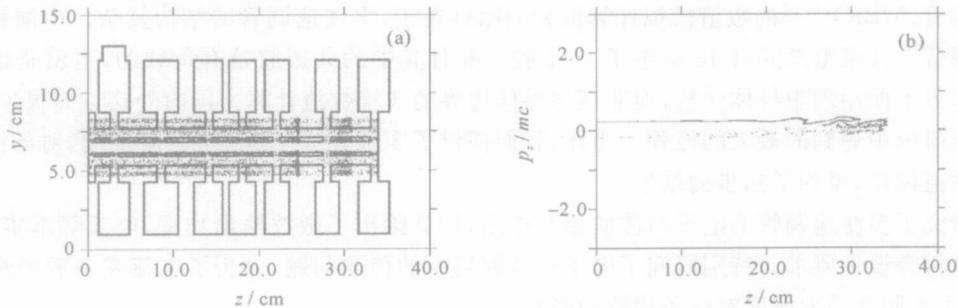


Fig. 2 Plots of the electronic trajectories(a) and phase space(b)

图 2 电子的轨迹图和相图

### 2.2 电流传输和电流调制

我们考察了多注速调管中的电流传输和电流调制。为了简化问题的研究,首先不考虑电子的发射度和能散度,假定电子是均匀发射的,图 3 给出了第一个腔、第二个腔和输出腔中心截面电流随时间的变化关系图。可以看出,输入腔的电流平均值为 20.85 A,输出腔的电流平均值为 20.82 A,电流的传输效率为 99.8%,和直流传输的效率差不多,这是因为间隙电场主要是  $z$  方向场,对电子的速度影响也是  $z$  方向,说明在电子均匀发射时候高频场的调制对电流传输效率影响不大。从图 3 可以看出电流的调制随着腔的增加而增加。

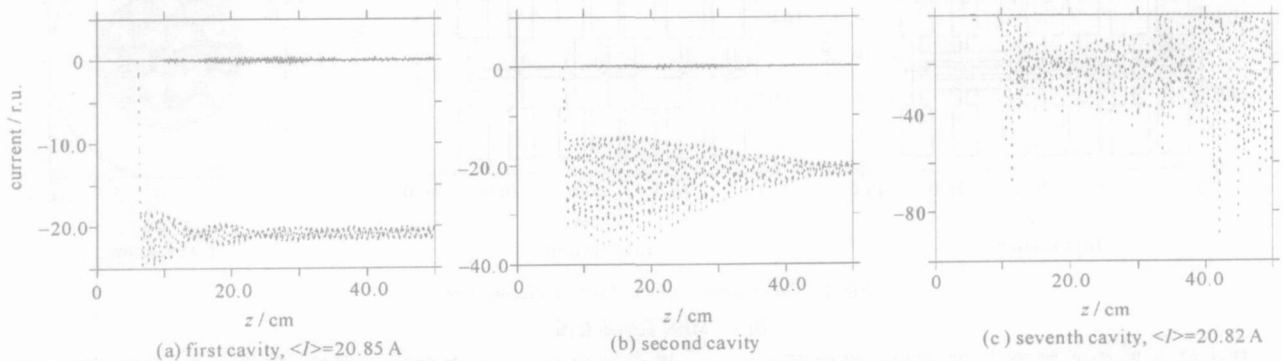


Fig. 3 Time history of the current at the cavities

图 3 各腔电流随时间的变化图

定义电流调制系数为谐波分量的幅值与直流的比,各腔中心位置的电流调制系数见表 2。从表 2 可以看出电流调制系数是随着腔的增长而增长。我们同时考察了电子发射有一定的发射度电子在高频场中的传输问题。改变电子的发射度,增加径向速度分量,表 3 给出了不同发射度电子传输的数值计算结果。可以看出,电子发射度对电子的传输有很大的影响,当电子的发射散度超过了 7.5 时候,电子的传输效率就显著降低。

表 2 各谐振腔电流调制系数

Table 2 Current modulated coefficient of each cavity

cavity	1	2	3	4	5	6
current modulated coefficient/ %	2.4	2.7	15	44	82	92

表 3 不同电子发射度数值计算结果

Table 3 Numerical simulation vs emission degree

$v_z/c$	$v_r/c$	emission degree/ (°)	input current/ A	output current/ A	transmission coefficient / %
0.23	0	0	20.85	20.82	99.8
0.229	0.02	5	20.85	20.45	98.0
0.228	0.03	7.5	20.84	19.86	95.0
0.227	0.04	10	20.84	18.17	87.2
0.222	0.06	15	20.84	14.85	71.3

### 3 多注速调管的微波产生和辐射

#### 3.1 电磁波的产生

我们还考察了多注速调管中的电磁波的增长情况。图 4(a) ~ 4(c) 中分别给出了第一个腔、第三腔和输出腔中心电场随时间的变化关系图,4(d) ~ 4(f) 分别为其频谱,中心频率为 1.25 GHz。可以看出电场也随腔的增加在增长。

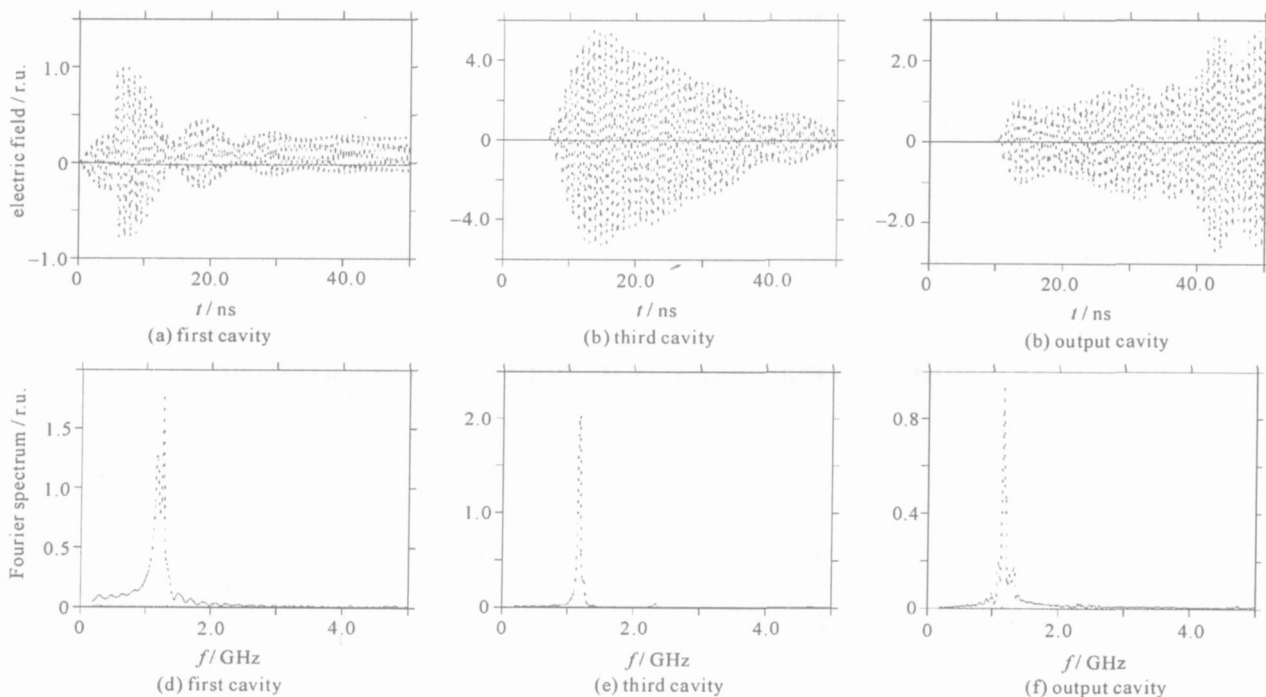


Fig. 4 Time history of the electric field at the cavity and the Fourier spectrum

图 4 各腔间隙中心电场随时间变化图及其频谱

图 5 给出了电子能量的空间分布相图,可以看出电子能量在输出腔的位置减小了很多,这说明电子有一部分能量转化成了微波。图 6 给出了输出腔间隙的间隙电压,可以看出输出的间隙幅值电压在 8 kV 左右。微波的输出功率由输出腔的截面坡印庭矢量面积分得到,图 7 给出了输出功率随时间的变化图,可以看出微波输出的峰值功率 128 kW,峰值效率是 43.8%,计算结果与试验设计结果基本一致。

### 4 结 论

我们对多注速调管进行了波束相互作用的数值模拟,给出了电流、输出功率等基本的物理参数,在输入电流 20.8 A,直流电压在 14 kV 时候,输出峰值功率 128 kW,峰值效率为 43.8%,与试验设计结果吻合较好。我

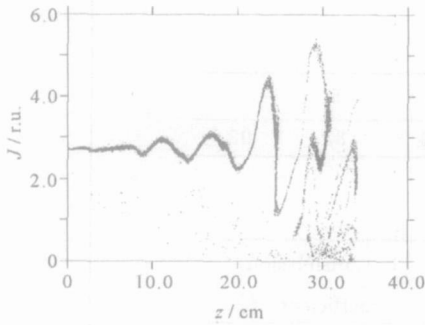


Fig. 5 Phase space of the energy  
图 5 电子能量的空间分布相图

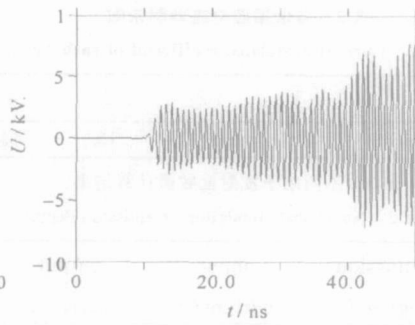


Fig. 6 Time history of the gap voltage  
图 6 输出间隙的间隙电压

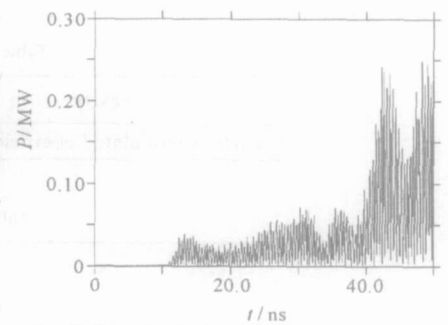


Fig. 7 Time history of the output power  
图 7 输出功率随时间变化图

们同时还考察了电子在高频场的传输和电流在多注速调管中的调制,得到的物理图像合理。

致谢 感谢中科院电子所对我们工作的大力支持,同时也感谢同事们在一起经常讨论。

### 参考文献:

- [1] Nusinovich G S, Danly B G, Levush B. Gain and bandwidth in stagger-tuned gyrokytrons[J]. *Phys Plasma*, 1997, **4**(2):469—478.
- [2] Carlsten B E, Faehl R J, Fazio M V, et al. Beam-cavity interaction physics for mildly relativistic, intense-beam klystron amplifiers[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1994, **22**(3):730—739.
- [3] 吴中发. 多束速调管频宽特性的初步分析[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(4):483—489 (Wu Z F. Preliminary analysis of bandwidth characteristics on multiple-beam klystron(MBK). *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(4):483—489)
- [4] Wright E, Balkcum A, Bohlen H, et al. Development of a 10 MW, L-band, multiple-beam klystron for TESLA[A]. Proceedings of EPAC [C]. Paris France, 2002. 2337—2339.
- [5] Nusinovich G, Levush B, Abe D. A review of the development of multiple-beam klystrons and TWTs[R]. NRL/MR/6840-03-8673.
- [6] Beunas A, Faillon G. 10 MW/1.5 ms, L-band multi-beam klystron[A]. Proc Conf Displays and Vacuum Electronics[C]. Germany, Garmisch-Partenkirchen, 1998.
- [7] 丁耀根, 彭钧. 多注速调管一种新型大功率微波放大器[J]. 电子科学学刊, 1996, **18**(1):64—71. (Ding Y G, Peng J. Multibeam klystron a new type of high power microwave amplifier. *Journal of Electronics*, 1996, **18**(1):64—71)
- [8] 丁耀根. 多注速调管电子光学系统的研究[J]. 电子科学学刊, 2000, **22**(3):485—491. (Ding Y G. Research of the optical system of the Multibeam klystron. *Journal of Electronics*, 2002, **22**(3):485—491)

## Three-dimensional analysis of multiple beam klystron

YANG Yu-lin, ZHANG Zhi-chou, DING Wu

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The three-dimensional analysis PIC code KARA T-3D was used to assess the multiple beam klystron(MBK). A power output of about 128 kW was obtained at 1.25 GHz when input voltage was 14 kV and input current was 20.8 A. Specially, the beam transmission coefficient and the current modulated coefficient were calculated. It was concluded that the current modulated coefficients were increased by the cavity number and that the energy of the electron decreased very fast when the electron passed the output cavity because some of the electron energy was transformed to microwave energy.

**Key words:** Multiple beam klystron; High power microwave; PIC