

文章编号：1001-4322(2006)02-0257-04

多注速调管电子光学系统的模拟*

王树忠^{1,2}, 丁耀根¹, 沈 斌^{1,2}, 王进华^{1,2}

(1. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要：利用 3 维电磁场计算软件 MAFIA 对 L 波段 100 kW 多注速调管的多注电子光学系统进行了模拟计算。通过编写宏程序使 MAFIA 可以计算旁轴电子枪的性能参数 给出了磁场分布并分析了磁场的差异对电子轨迹的影响。模拟表明：中心注磁场具有轴对称性 在均匀区 轨迹的波动性最小 电子轨迹的层流性也最好；内层电子注径向磁场较小 轨迹的波动性略大于中心注的情况；外层电子注靠近极靴处径向磁场最大，电子轨迹的波动最大 层流性最差。计算并模拟显示了 18 个电子注在收集极入口处的发散情况。

关键词：高功率微波；多注速调管；3 维电子光学；MAFIA

中图分类号：TN122.5 文献标识码：A

多注速调管具有多个离轴的电子注通道，离轴电子注通道内聚焦磁场不具有轴对称性^[1]。非轴对称磁场 B_r 影响电子注的聚焦，使电子注通过率变差，特别是对高平均功率和连续波多注速调管，过多的截获会导致管子的热变形甚至烧毁，因而需要发展 3 维计算方法，对多注速调管的电子光学系统进行精确模拟和优化设计，提高电子注通过率。

多注速调管电子光学系统的设计可以先采用 2/2.5 维软件如 EGUN, DGUN, TAU, ARSENAL 等进行初步设计，然后采用 3 维软件进行精确模拟和优化设计。目前可用于 3 维电子光学设计的程序有全 3 维有限元电子枪和收集极模拟程序 MICHELLE 3D，用它可以进行栅控枪、多注枪、带状注枪和降压收集极的模拟^[2]；全 3 维有限差分 PIC 程序 MAGIC 3D，可以进行多注速调管的 3 维电子光学和注波互作用的计算^[3]；建立在微扰理论基础上的边界元程序 Topaz 3D，该程序采用了近似方案，适用于弱的非对称的多注情况^[4]。其它 3 维商业软件有 TRACE, WARP, ARGUS 等。

本文使用全 3 维电磁场软件 MAFIA^[5-6]模拟 L 波段 100 kW 多注速调管的多注电子光学系统，分别模拟了 3 维磁场和电子轨迹，给出了电子注通道处于轴向不同位置处磁场分布的差别，分析了这些差别对电子轨迹的影响，最后计算了 18 个电子注的情况，给出了 18 个电子注在收集极的发散情况，由此建立了多注速调管多注电子光学系统的 3 维模拟方法。

1 电子光学模拟的基本理论

在静态电磁场的情况下，强流电子光学的基本方程组为^[7]

$$\Delta U = -\rho/\epsilon, \quad \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}, \quad \frac{d\mathbf{p}}{dt} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中 ϵ 为介质介电常数 μ 为介质磁导率 $\mathbf{E} = -\nabla U$ 为电场强度 ρ 为空间电荷密度 \mathbf{A} 为磁矢位 \mathbf{B} 为磁感应强度 \mathbf{J} 为电流密度 e 为电子电量 \mathbf{v} 为电子速度 \mathbf{p} 为电子动量。这些方程相互制约，要求解电位 U 就需要知道空间电荷密度 ρ ，而 ρ 和电子运动有关，电子运动的状态又取决于电位 U 或电场 E 。

与文献 [8] 中所采用的粒子模拟方法不同，本文采用的是通常的轨迹模拟方法。在空间电荷限制发射条件下，阴极发射电流密度满足球形二极管的 Child-Langmuir 定律

$$J_i = 2.335x_i^{-2}U_i^{3/2}/\alpha_i^2 \quad (2)$$

式中 $\alpha_i^2 = 1 + 1.6x_i/R_k + 2.06(x_i/R_k)^2$ ， x_i 为第 i 个球形二极管阴阳极距离， R_k 为阴极面曲率半径； U_i 为阴极发射面与阴极表面的电

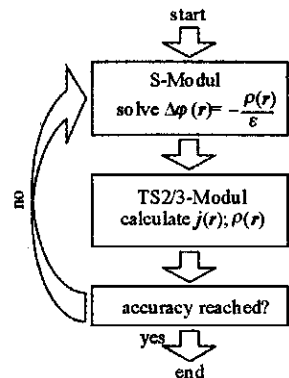


Fig. 1 Flux graph of MAFIA SCLE simulation
图 1 MAFIA 模拟空间电荷限制发射流程图

* 收稿日期 2005-05-16； 修订日期 2005-09-23
作者简介：王树忠(1973—)，男，博士，主要从事高功率微波器件的研究，wangshuzhong724@163.com。

位差。对泊松方程自洽求解直到阴极电流发射达到稳态。MAFIA 模拟空间电荷限制发射的流程见图 1。

2 3 维磁场的模拟

L 波段 100 kW 多注速调管采用均匀电磁聚焦方式, 聚焦系统由 7 个主线包和 1 个反线包构成。反线包的作用是增加阴极表面磁场, 从而增加电子注的刚性。线包采用隔水板冷却, 外磁屏由 8 块铁板组成。初步设计时采用 2 维结构(图 2), 给定每一个线包横截面的电流密度, 由此可以计算整个区域的磁场分布。2 维结构的不足之处是它只能计算轴对称结构, 要计算上下磁屏开有多个电子注通道以及输出磁屏开口等情况, 就必须进行 3 维模拟。用 MAFIA 计算 3 维磁场时, 实际的磁场线包是用若干根横截面为无限小的细导线来模拟的。细导线数量的选取对计算结果的影响与线包距离电子注通道的距离有关。L 波段多注速调管聚焦系统庞大, 电子注通道距离线包较远, 每个线包用 4 根细导线来代替能得到很好的结果。

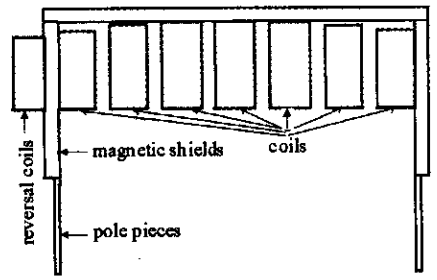


Fig. 2 2D section geometry of magnetic field
图 2 磁场几何结构图

整个模拟区域被划分为 9.4×10^6 个网格, 运行时间 340 min(P4 2.4 GHz CPU, 2 G 内存)。图 3、图 4 给出了采用 MAFIA 进行 2 维和 3 维计算的轴向磁场比较。在均匀磁场区域(z 方向坐标为 0.05 ~ 0.33 m) 2 维和 3 维计算的轴向磁场曲线波动一致, 最大相差 3.4×10^{-4} T; 在上磁屏区域外(靠近阴极的区域) 3 维计算结果比 2 维低大约 1.2×10^{-3} T。图 3、图 4 还给出了电子注通道位于 $r=0, 10, 18.5$ mm 处的轴向磁场分布(r 表示相对于主轴的径向位置)。图 5 给出了这三个通道的径向磁场的分布, 从图中可以看出, 在均匀区域不同通道中心处的轴向磁场差别小于 1×10^{-4} T, 径向磁场数值小于 1×10^{-4} T, 径向磁场与轴向磁场之比小于 0.1%。在极靴附近 $r=18.5$ mm 处径向磁场最大, 为 1.2×10^{-3} T; $r=10$ mm 处径向磁场为 2.6×10^{-4} T, $r=0$ 处径向磁场为零。

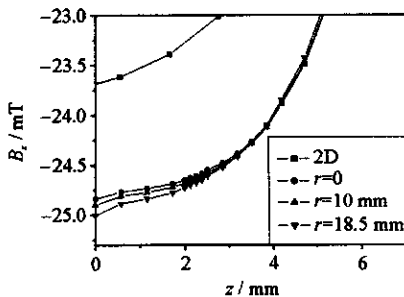


Fig. 3 B_z at different hole in gun region

图 3 电子枪区处于径向不同位置处的轴向磁场 B_z 的分布

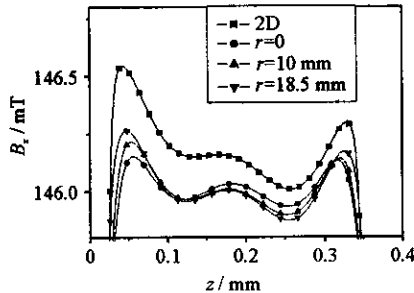


Fig. 4 B_z at different hole in working area

图 4 均匀磁场区径向不同位置处的轴向磁场 B_z 的分布

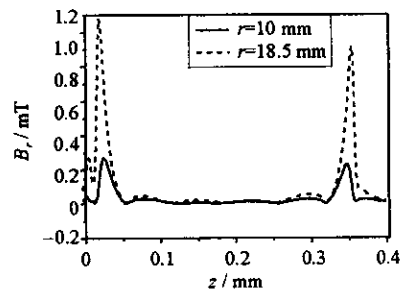


Fig. 5 B_r at different holes

图 5 不同电子注通道处的径向磁场 B_r 的分布

3 单注电子枪的 3 维模拟

L 波段多注速调管单个电子枪结构如图 6 所示。设计电压 14 kV, 电流 1.15 A, 导流系数 $0.694 \mu p(1 p = 1 A \cdot V^{-3/2})$ 。我们先采用 2/2.5 维软件 EGUN, TAU, ARSENAL 进行模拟, 然后采用 MAFIA 分别模拟 2 维和 3 维的情况。表 1 列出了这几种软件的计算结果, 分析发现使用 MAFIATS3 模块进行 3 维电子枪计算的

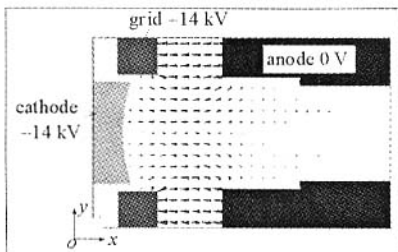


Fig. 6 2D section geometry, arrow plot of electric field

图 6 电子枪结构尺寸和电场分布图

表 1 不同软件模拟的电子枪的电流和导流系数的结果对比

Table 1 Current and perveance of electron gun simulated with different codes

code	V/kV	I/A	P/ μp
EGUN	14	1.148	0.693
TAU	14	1.152	0.695
ARSINAL	14	1.140	0.688
MAFIA (TS2)	14	1.137	0.687
MAFIA (TS3)	14	1.089	0.659

电流和导流系数偏小,比使用 MAFIA TS2 模块和其它 2/2.5 维软件计算的结果小 5% 左右。原因是速调管采用球形的皮尔斯电子枪,划分网格会使阴极表面呈现阶梯状。在 2 维情况下可以通过调节网格来消除阶梯,但在 3 维情况下很难消除阶梯,阶梯的存在使计算的结果偏小。

4 单注电子轨迹的 3 维模拟和分析

我们对具有 2 维对称结构的电子枪进行了 3 维模拟,这相当于计算多注电子枪中心注的情况。对于不处于磁场对称轴上的电子注,由于当前 MAFIA 版本中没有 3 维磁场插值和平移命令,从 S 模块计算结果中导入磁场时需要两者具有严格的网格对应关系,即计算磁场和计算电子轨迹需要相同的区域、坐标和网格划分方式。使用 MAFIA 计算空间电荷限制发射时,在 SCLE 命令下有三个数组 scle_pos, scle_nrml 和 scle_area,这三个数组分别用来储存粒子在阴极发射面的位置、发射粒子的法向矢量和阴极面积。当电子注通道位于非主轴上时需要编写程序修改上面的三个数组,使它们记录当前阴极处粒子的位置、发射粒子的法向矢量和阴极面积。需要特别注意的是 MAFIA 中规定按图 7 所示的粒子计数方法对粒子进行编号。

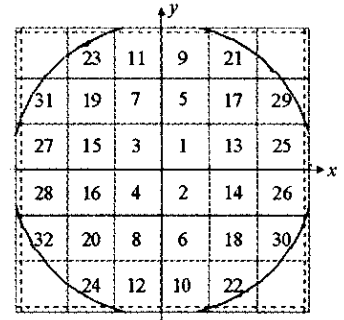


Fig. 7 Particle count on cathode surface
图 7 阴极表面粒子发射的计数方式

图 8 分别给出了位于不同径向位置处的电子枪沿 y 轴正半轴切面发射粒子的轨迹(R 表示相对于每个电子注中心的径向位置)。表 2 给出了各电子注的波动的具体数据。不同通道内的轨迹差别体现在内层轨迹的层流性、电子轨迹在收集极的发散情况和轨迹的波动情况等三个方面。从图 8 和表 2 中数据可以看出,中心注内外层轨迹都具有良好的层流特性,在收集极入口处的发散性也比较好,波动相对较小;内层电子注区域有较小的非轴对称径向磁场 B_r , 轴向磁场相对于中心电子注区域轴向磁场变大,电子注内层轨迹层流性不如中心注的情况,轨迹波动增大;外层电子注区域由于靠近极靴处的 B_r 较大,内层轨迹出现交叉,层流性变差。阴极区有较大的轴向磁场,轨迹的波动最大,且在收集极入口处轨迹的发散性最差。

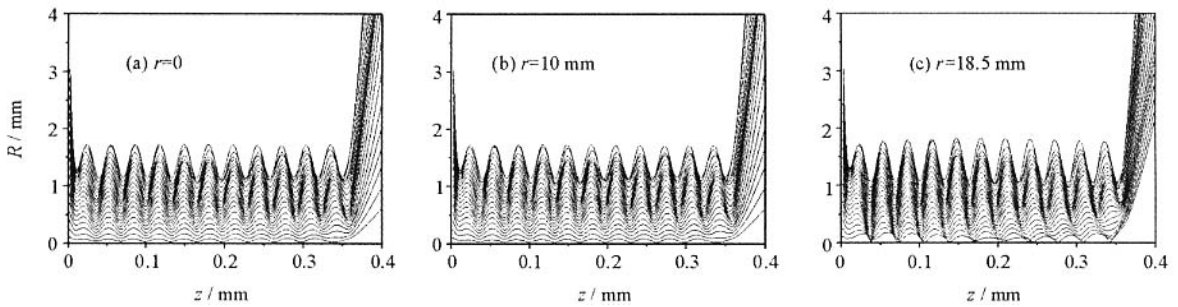


Fig. 8 Particle trajectories emitted from +y axis on cathode surface

图 8 沿 y 轴正半轴发射粒子的轨迹(电子枪分别位于距主轴 0, 10, 18.5 mm 处)

表 2 不同通道电子注的注腰、第一个波峰和波谷、第二个波峰的坐标和振幅

Table 2 Coordinates and amplitude of beam waist, first and second wave peak and valley on the axis at different channel

		beam waist	first wave peak	first wave valley	second wave peak	amplitude
center beam	z/mm	10.9	24.6	40.0	55.2	0.30
	r/mm	1.28	1.72	1.13	1.73	
inner beam	z/mm	10.8	24.3	39.7	55.1	0.32
	r/mm	1.29	1.75	1.11	1.75	
outer beam	z/mm	10.8	23.3	38.6	54.2	0.36
	r/mm	1.30	1.72	1.04	1.76	

5 采用 MAFIA 同时计算 18 个电子注的情况

使用 MAFIA 可以同时计算 18 个注的情况,18 个电子枪所产生的总电流值为 18.92 A。同时模拟多注电子枪所得的电流值要小于计算单个电子枪所得电流值之和。这是因为内层电子枪处于外层电子枪所形成的空间电荷场中,发射的电流值小于外层电子枪发射的电流值。电子注运动区域长 430 mm,记录 300 个时间步。

图 9 给出了从电子枪发射出来的直流电子注,在均匀电磁聚焦磁场的作用下,到达收集极端口时的发散情况,结果显示电子注的直流通率为 100%,并且 18 个电子注在收集极端口处发散均匀。

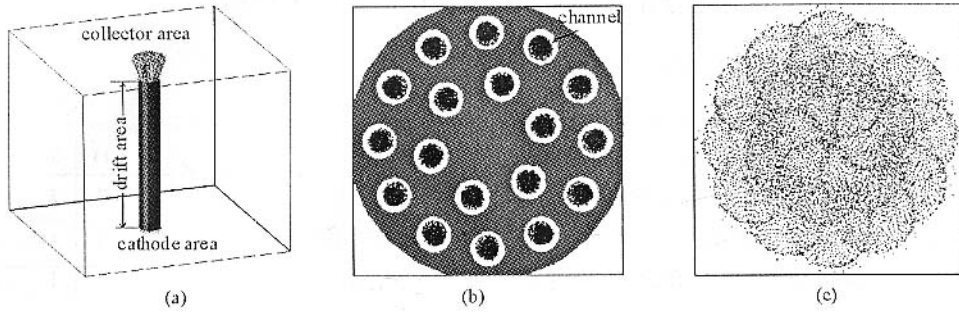


Fig. 9 Particle trajectories of eighteen beams (a) section graph of particles in the channel (b) and in the collector respectively (c)

图 9 18 个电子注的轨迹 (a), 电子轨迹分别在漂移管内 (b) 和收集极端口处的横截面 (c)

6 结 论

我们利用 MAFIA 模拟了 L 波段多注速调管电子光学系统,分析了处于径向不同电子注通道处磁场的差异对电子轨迹的影响:中心注磁场具有轴对称性,在均匀区,轨迹的波动最小,电子轨迹的层流性也最好; $r = 10$ mm 处径向磁场较小,轨迹的波动性略大于中心注的情况,电子进入收集极后发散性变差; $r = 18.5$ mm 极靴处径向磁场最大,电子轨迹的波动最大,层流性最差。模拟显示出 18 个电子注在收集极发散均匀。

致 谢: 感谢上海 CST 公司张敏博士在应用 MAFIA 软件方面的指导!

参 考 文 献:

- [1] 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 :485-491. (Ding Y G. Study on electron optics system of multi-beam klystron. *Journal of Electronics*, 2000, 22 :485-491)
- [2] Petlo J, Blanchard P, Mandelli A, et al. The new 3D electron gun and collector modeling tool: MICHELLE, IVEC2001, Noordvick [Z]. The Netherlands, 2001.
- [3] Caryotakis G, Krasnykh A, Neubauer M, et al. Design of a 11.4 GHz, 150 MW, sheet beam, PPM-focused klystron [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, 691 (1) 22-33.
- [4] Ivanov V, Ko K, Krasnykh A, et al. 3D method for the design of multi or sheet beam RF sources [C] / PAC2001. Chicago, IL, 2001.
- [5] MAFIA Collaboration. MAFIA user manual version 4.0.2 [M]. Germany: CST Inc, 2000.
- [6] Wang S Z, Ding Y G. Electron gun simulation using MAFIA [C] / 5th International Vacuum Electron Sources Conference IVESC2004. Beijing, 2004 :387-388.
- [7] 电子管设计手册编辑委员会. 微波管电子光学系统设计手册 [M]. 北京:国防工业出版社, 1981 :8. (Electronic Tube Design Handbook Editorial Committee. Microwave tube electron optics system design handbook. Beijing: National Defense Industry Press, 1981 :8)
- [8] 廖平, 杨中海, 雷文强, 等. 微波管电子枪 3 维粒子模拟研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16 (3) 353-357. (Liao P, Yang Z H, Lei W Q, et al. Study on 3D MAFIA PIC simulation for microwave tube electron gun. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16 (3) 353-357)

Electron optics system of multi-beam klystron

WANG Shu-zhong^{1,2}, DING Yao-gen¹, SHEN Bin^{1,2}, WANG Jin-hua^{1,2}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2652, Beijing 100080, China ;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: An L-band 100 kW multi-beam klystron electron optics system was simulated using MAFIA, to which a MACRO program had been added. The effect of three-dimensional magnetic field on electron trajectories was analyzed. Among the center beam, inner beam and outer beam, with the increase of the distances between the main axis and the axes of the beams, the transverse magnetic field becomes stronger gradually, the wave amplitude of the electron beam becomes larger, and the laminar characteristics become worse. Eighteen beams were also simulated and the results showed that the beams scattered uniformly at the entrance of the collector.

Key words: High power microwave; Multi-beam Klystron; Multi-beam electron optics; MAFIA