

文章编号: 1007-4627(2003)04-0264-04

磁控注入电子枪的研究*

赵青¹, 李宏福¹, 任同², 罗勇¹

(1 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054;

2 西南科技大学制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 介绍了毫米波回旋速调管磁控注入电子枪的结构与特点. 依据回旋管对电子枪的要求, 考虑相对论效应和空间电荷效应, 编制了一套计算程序. 利用电子枪模拟程序对电子轨迹进行模拟计算, 研究了电极形状、磁场分布以及电子轨迹与电子注参量的影响, 为磁控注入电子枪的设计提供了理论依据.

关键词: 磁控注入电子枪; 模拟计算; 电子注; 电极形状

中图分类号: T125 **文献标识码:** A

1 引言

毫米波技术是 21 世纪最具发展前途的技术之一. 而高功率相对论新型毫米波器件在受控聚变等离子体波加热及国防、通信、材料处理和生物工程等领域都将发挥重要作用, 其研究工作在国内外正受到很大的关注^[1].

毫米波回旋速调管的电子枪设计技术是毫米波回旋速调管设计中的关键技术之一. 它提供的电子注质量直接影响到整管的效率和输出功率, 因此, 对电子枪的性能提出了较高的要求. 目前各种回旋管的电子光学器件多为磁控注入型电子枪(MIG), 因此对 MIG 的研究也就具有更为重要的意义^[2-4].

根据回旋速调管整管的设计要求, 我们给出了毫米波回旋速调管电子枪的设计方法及其相应的计算公式, 这些方法和公式是毫米波回旋速调管电子枪的快速准确设计的技术基础.

2 设计原理

毫米波回旋速调管的结构如图 1 所示, 主要由电子枪、磁场系统、相互作用腔体、收集极系统和输出波导等组成. 电子枪是毫米波回旋速调管的“心脏”, 它包括轴对称的阴极、第一阳极和第二阳极, 整个枪置于具有两个均匀区的渐进磁场中(阴极区

的磁感应强度记为 B_k , 相互作用区的磁感应强度记为 B_0). 在设计磁控注入电子枪时将分别采用轴对称电子光学系统的普遍模型、绝热压缩模型和交叉场无限大平板二极管模型, 进行求解下面的方程组, 以得到较合适的电极形状、电子轨迹和沿轨迹的电位分布.

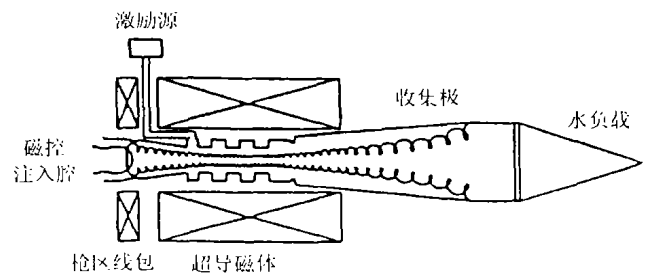


图 1 毫米波回旋速调管示意图

2.1 电子运动方程

电磁场中电子的 Lorentz 方程为

$$\frac{d(mv)}{dt} = -e(E + v \times B). \quad (1)$$

在圆柱坐标系 (r, θ, z) 轴对称条件下, 考虑相对论效应时的 Lorentz 方程的分量展开式:

$$r'' = -\frac{\gamma}{\gamma} \left[E_r \left(1 - \frac{r'^2}{c^2} \right) - \right]$$

收稿日期: 2003 - 02 - 12; 修改日期: 2003 - 06 - 05

* 基金项目: 电子科技大学青年基金资助项目(L08010401YF020702)

作者简介: 赵青(1964-), 男(汉族), 浙江义乌人, 副教授, 博士, 从事高功率微波及等离子体应用研究.

$$E_z \frac{r'z'}{c^2} + B_z r \theta' \Big] + r \theta^2, \quad (2)$$

$$z' = -\frac{\eta}{\gamma} \left[E_z \left(1 - \frac{z'^2}{c^2} \right) - E_r \frac{r'z'}{c^2} - B_r r \theta' \right], \quad (3)$$

$$\theta' = -\frac{\eta}{\gamma} \left[-E_r \frac{r'\theta'}{c^2} - E_z \frac{z'\theta'}{c^2} + B_r \frac{z'}{r} - B_z \frac{r'}{r} \right] - \frac{2r'\theta'}{r}, \quad (4)$$

其中, $\eta = e/m_0$ 为静态电子荷质比; $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$ 为相对论因子; $m = m_0 \gamma$ 为电子相对论质量, m_0 为电子静止质量; c 为光速, θ' 和 θ'' 分别为电子角向速度、角向加速度(以下同)。

2.2 场方程

本文研究的是电子注在电场及磁场作用下的运动。过渡区轴向磁场缓慢连续递增。电场有两个来源,一是来自电极上电位形成的空间电场,二是电子注自身的空间电荷产生电场,两种电场相互叠加形成总电场,因此,需要求解关于电磁场的泊松方程

$$\nabla U^2 = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (5)$$

$$J = \rho v, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{d\rho}{dt}, \quad (7)$$

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \mu_0 J, \quad (8)$$

$$B = \nabla \times A, \quad (9)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (10)$$

及金属边界条件 $n \times E = 0$ $\vec{\nabla} U = \text{常量}$ 。

2.3 磁场的计算

本文研究的系统是一个偏轴系统,用多组线圈的优化组合来描述沿轴磁场。因此,轴线上任意点的磁场强度的计算公式为

$$B_{0z} = \sum_{i=1}^L \frac{1}{2} \mu_0 n_{1i} n_{2i} I_i \left\{ (z - z_{0i} + b_i) \cdot \ln \frac{a_{2i} + \sqrt{a_{2i}^2 + (z - z_{0i} + b_i)^2}}{a_{1i} + \sqrt{a_{1i}^2 + (z - z_{0i} + b_i)^2}} - (z - z_{0i} - b_i) \cdot \ln \frac{a_{2i} + \sqrt{a_{2i}^2 + (z - z_{0i} - b_i)^2}}{a_{1i} + \sqrt{a_{1i}^2 + (z - z_{0i} - b_i)^2}} \right\}, \quad (11)$$

式中 L 为实际线圈的个数; I_i 为励磁电流, μ_0 为磁导率系数; a_1, a_2 分别为线圈内、外半径; z_0 为线圈中心的位置, b 为半宽度; n_1 为每层单位长度上的匝数, n_2 为单位厚度上的层数。角标 i 表示第 i 个线圈(以下同)。根据沿轴的磁场分布,按谢尔茨展开可得到空间的磁场分布、空间的磁场沿 z 方向的分布(B_z)和空间的磁场沿 r 方向的分布(B_r),

$$B_z(r, z) = B - \frac{r^2}{4} \left(\frac{d^2 B}{dz^2} - \frac{r^2}{16} \frac{d^4 B}{dz^4} + \frac{r^4}{576} \frac{d^6 B}{dz^6} \right), \quad (12)$$

$$B_r(r, z) = -\frac{r}{2} \left(\frac{dB}{dz} - \frac{r^2}{8} \frac{d^3 B}{dz^3} + \frac{r^4}{192} \frac{d^5 B}{dz^5} \right), \quad (13)$$

利用(11)–(13)式进行数值计算和模拟。根据(12)和(13)式可知,高阶导数(二阶或二阶以上)是一个小量, B_z 和 B_r 分别主要由(12)和(13)式中的第一项确定。

3 毫米波回旋速调管对电子枪的要求

为得到一定的输出功率和相互作用的高效率,毫米波回旋速调管要求电子注:(1)具有一定的注电流;(2)一定的电子注平均半径;(3)高的横向速度与纵向速度之比和小的速度零散。电子枪采用双阳极磁控注入枪,电子注采用空心轴对称电子注。为了保证整管的输出指标,对电子枪性能提出的要求如表 1 所示。

表 1 整管对电子枪的要求

名称	指标
阴极电压/kV	0
第一阳极电压/kV	42
第二阳极电压/kV	60
电子注电流/A	11.5
磁压缩比($F_m = B_0/B_k$)	6.36
电子回旋中心平均半径/inm	2.24
横向速度与纵向速度之比	>1.5
速度零散	小

4 分析结果

根据上述基本原理设计出电极的锥形,再利用数值计算方法经过计算,最后才能确定电极的形状,并计算出电子注的性能和参量。数值计算方法

就是在一定的边界条件下求解强流电子光学系统的基本方程. 具体方法是: (1)确定问题的基本方程和一定的边界条件, 即定解问题, 确定泊松方程、电流连续性方程、电子运动方程、电磁场基本方程和边界条件等, (2)利用有限差分法将以上基本方程及其边界条件化为数值方程, 采用超松弛迭代法求解出网格上的空间电位分布, 利用空间电荷电子云法、电荷分配法计算空间电荷分布, 结合改进的九点插值法、拉格朗日外推法和泊松外推法计算空间任意点的叠加电场. 采用非线性曲线拟合的方法求出沿轴向的磁场分布, 再利用谢尔茨函数展开计算磁场在空间的分布, (3)利用四阶龙格-库塔法求解电子在电磁场中的运动方程, 计算出电子的位置、轨迹和电子注的参量.

4.1 磁场的模拟结果

根据上述关于磁场的计算方法, 按照公式(11)计算出多组线包轴向磁场沿轴的分布, 然后再按照公式(12)和(13)计算出空间的磁场沿 z 方向的分布(B_z)、空间的磁场沿 r 方向的分布(B_r). 通过反复调整、计算, 得到满足设计参量电子枪的轴向磁场沿轴分布, 如图 2 所示.

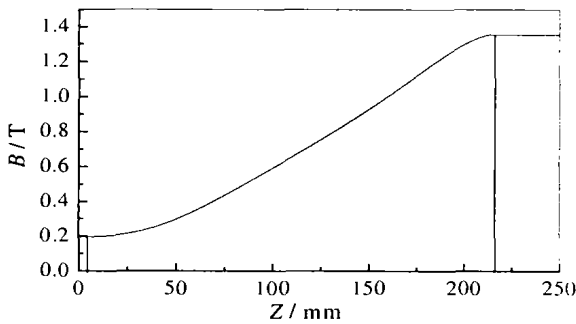


图 2 轴向磁场的分布

4.2 电极形状和电子注轨迹

以工程计算设计的电极的初步形状和参数作为基础, 利用计算机模拟, 在考虑空间电荷效应情况下, 对不同电极尺寸进行优化处理, 得到具有较高的横向速度与纵向速度之比, 速度零散小, 层流性明显比其它两种要好, 符合整管要求, 能提供高质量电子注的双阳极电子枪, 性能参数如表 2 所示. 电极形状和电子注如图 3 所示.

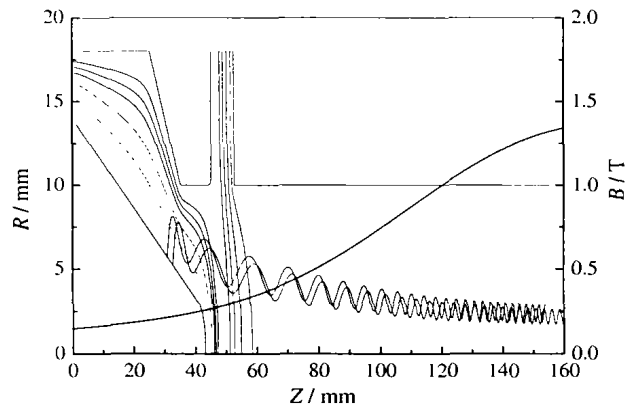


图 3 不同电极形状双阳极电子枪、等位线及电子轨迹分布

表 2 电子枪的设计、计算结果

名称	指标
阴极电压/kV	0
第一阳极电压/kV	42
第二阳极电压/kV	60
阴极区磁场/T	0.216 4
阴极电流发射密度/(A · cm ⁻²)	10.5
电子注电流/A	11.5
电子回旋中心平均半径/mm	2.24
相互作用半径/mm	0.504 0
横向速度零散	0.175 7
横向速度与纵向速度之比	1.66
相互作用磁场/T	1.376 53

4.3 工作电压对电子注的影响

我们对工作电压在一定的范围变化进行了分析和计算, 计算结果如图 4 和 5 所示. 图 4 中 A 是螺距因子, $2v_t$ 是横向速度, $60v_t$ 是速度零散.

从图 4 可知, 第一阳极电压虽然可以增大速度比, 但其速度零散也随之增加. 图 5 表明随第二阳

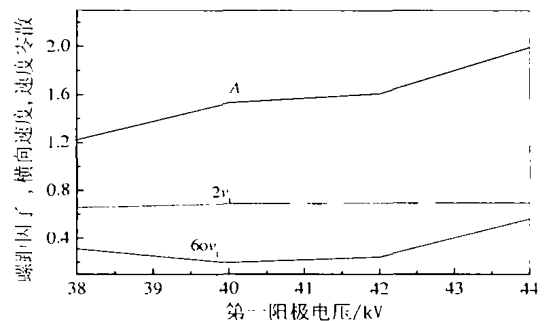


图 4 电子注参量随第一阳极电压的变化

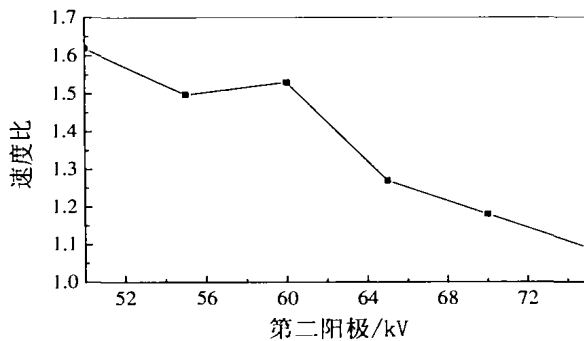


图5 速度比(α)随第二阳极电压的变化

极电压增加的速度比(α)也变化。结果表明:增大第一阳极工作电压对提高 α 值和减少速度零散是有益

参 考 文 献:

- [1] Li Hongfu, Wang Wenxiang, Du Pinzhong, *et al.* A Study on Third Harmonic Gyrotron (invited)[A]. 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves[C]. Beijing, China, September 12—15, 2000.
- [2] Khanh T Nguyen, Bruce G Danly. Electron Gun and Collector Design for 94 GHz Gyro-amplifiers [J]. IEEE Trans Plasma Sci, June 1998, 26(3): 779.
- [3] Tsimring S E, Zapevalov V E. Experimental Study of Intense Helical Electron Beams with Trapped Electrons [J]. Int J Electron, 1996, 81(2): 199.
- [4] 王华军, 李宏福, 周晓岚. 单阳极磁控注入电子枪设计 [J]. 强激光和粒子束, 2000, 12(3): 333.

A Study of Magnetron Injection Gun*

ZHAO Qing¹, LI Hong-fu¹, REN Tong², LUO Yong²

(1 School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2 School of Make Science and Enineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyan 621010, Sichuan, China)

Abstract: The Structure and characteristics of the magnetron injection gun (MIG) for mm wave gyro-klytron are introduced. According to the requirements for the gyro-klytron, the relativistic effect and the space charge effect is taken into account. A program is developed for CAD. An electron gun code is used to simulate the electron trajectory, the influence of electrode shape, magnet field, electron trajectory on the electron beam have been studied. The theory for design of the electron gun is presented.

Key words: magnetron injection gun; simulating calculation; electron beam; electrode shape

* Foundation item: Youth Fund for University of Electronic Science and Technology of China (L08010401YF020702)