

回旋管单阳极磁控注入电子枪的数值计算*

王华军**¹ 李宏福¹ 王小林²

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 成都师范高等专科学校 四川 彭州 611930)

【摘要】研究了回旋管单阳极磁控注入环形电子注电子枪的设计计算原理。并以8 mm三次谐波永磁包装回旋振荡管电子枪为例,利用自编的程序进行数值计算和优化。讨论了空间电荷的影响和速度零散的改善,得到最佳的电极和电子注参数。电子枪已经应用于8 mm三次谐波永磁包装回旋振荡管研制中。得到了良好的效果。

关键词 回旋管; 电子注; 电子枪; 数值计算

中图分类号 TN125 文献标识码 A

Design and Calculation of a Single Anode Magnetic Injection Electronic Gun for Gyrotron

Wang Huajun¹ Li Hongfu¹ Wang Xiaoling²

(1. School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054;

2. Chengdu Educational College Sichuan Pengzhou 611930)

Abstract The design and calculation elements of the single anode magnetron injection gun for gyrotron is researched. with 8 mm and the third-harmonic gyrotron of the casing by the permanent magnet for examples. The Numerical calculation and optimization is carried out by use of an self-redact electron trajectory code, The space charge effects and the velocity spreads is discussed. Lastly, The optimal parameters with electrode shapes and electronic trajectory was obtained. The single anode magnetron injection gun was employed experiments and researches for 8 mm and the third-harmonic gyrotron of the casing by the permanent magnet . The results was all right.

Key words gyrotron; electron bunch; electron gun; numerical calculation

在微波、毫米波回旋放大器件中需利用高品质、低速度零散的电子注与高频场之间的相互作用,产生能量交换,使电磁波得到放大^[1,2]。为使注波相互作用增强,要求增大电子注的横向能量,能产生大横向能量的回旋电子注的电子枪有许多类,双阳极和单阳极磁控注入电子枪应用较为广泛。双阳极磁控注入电子枪电子的横向能量可以方便地利用调制阳极、对阳极电压和阴极上的外部磁场进行调整,但其结构复杂,对某些应用情况,如在永磁包装回旋管中应用不便;单阳极磁控注入电子枪没有调制阳极,结构简单,在实际的器件中得到较多的应用^[3,4]。

本文探讨了产生高品质的回旋电子注的单阳极磁控注入电子枪的设计,利用综合分析的方法和采用自行设计的磁控注入电子枪的程序进行计算机模拟,设计的电子枪能量为45 kV和10 A的条件下,为三次谐波永磁包装回旋管提供一个高品质低速度零散的回旋电子注。

1 数值计算方法

根据上述基本原理设计出电极的雏形,利用数值计算方法经过计算,才能确定电极的形状,并计算出

2003年5月6日收稿

* 国家“十五”重点科研资助项目;国家863计划资助项目,编号:C06010401J02-803D

** 男 39岁 博士后 副教授 主要从事微波电子学、计算机模拟和数值计算方面的研究

电子注的性能和参量。数值计算方法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,亦就是确定泊松方程、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^[5-7]。

2 数值计算的结果

2.1 磁场分布曲线

利用本文设计的磁场计算程序进行不断的计算,得到了轴上的磁场分布,结果如图1所示。由图1可以看出轴上磁场分布是缓变的压缩磁场。实验证明此磁场分布是一种非常合理的。

2.2 电极、电位线与电子轨迹

根据综合法和工程计算设计得到的初始电极形状,并在电磁场的作用下,同时考虑了诸多因素(包括空间电荷效应),经过大量的迭代计算和调整,得到了符合要求、稳定的电子轨迹。其电极、电位线与电子轨迹如图2所示,图2中细实线表示电位线,粗实线表示电子轨迹。由图中的电位线分布可以反映出电位的处理是正确合理的,从图中的电子轨迹可以看出电子注具有很好的层流性。

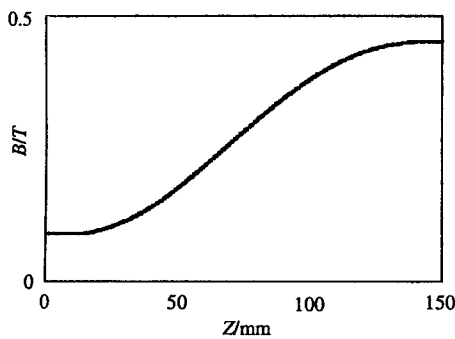


图1 轴上磁场分布

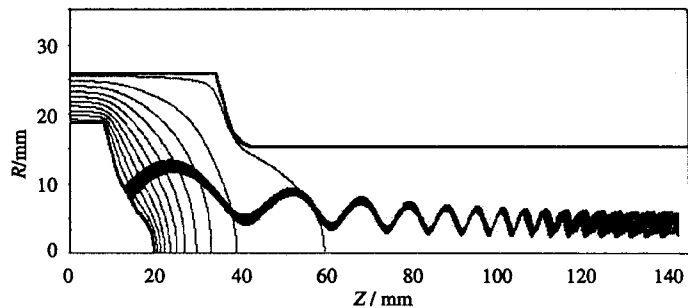


图2 单阳极电子枪的电极和电子轨迹

表1 电子注参量

V_K/kV	V_O/kV	I_K/mA	$J_K/\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$	B_K/T	B_O/T	a	R_P/mm	R_L/mm	$dV_{\perp}/(\%)$	$dV_{\parallel}/(\%)$
0	45	9.39	5.5	0.090 6	0.451 0	2.157	4.188	1.450	3.39	0.75

2.3 电子注参量

通过大量的反复计算后,当电子轨迹或电子注稳定时得到电子注参量,具体参量如表1所示。其中 V_K 为阴极电压、 V_O 为阳极电压、 I_K 为电子注电流、 J_K 为阴极发射电流密度、 B_K 为阴极区磁场、 B_O 为相互作用区磁场、 a 为横向速度与纵向速度、 R_P 为电子相互作用半径、 R_L 为拉莫半径、 dV_{\perp} 为横向速度零散、 dV_{\parallel} 为纵向速度零散。从表中的参量可以看出,此单阳极电子枪的电子注具有较小的速度零散,很好的层流性、较小的相互作用半径与较小的电子枪结构。对电子枪的设计具有很大的难度,但对永磁包装回旋管是很有益的。

3 结果分析和讨论

3.1 电子注注电流的影响

电子注注电流的大小对电子注的性能有着直接的影响。若注电流增加,空间电荷效应的作用增大,电子的速度零散也将增大,电子的横向速度与纵向速度之比(即 a 值)也将增大。若注电流减小,空间电荷效应的作用减小,电子的速度零散也将减小,电子的横向速度与纵向速之比(即 a 值)也将减小。图3~5表示了电

子注电流的变化引起的电子注参量的变化。其中图3表示 α 值随电流的变化,图4表示横向速度零散随电流的变化,图5表示纵向速度零散随电流的变化。研究表明,电子相互作用半径 R_p 和拉莫半径 R_L 几乎不随电流的变化而改变。因为电子相互作用半径和拉莫半径主要由磁场和磁场压缩比决定。

3.2 磁场分布的影响

本文对改变磁场分布进行了多次计算,计算表明正确选取较佳的磁场分布,电子注才有较佳的质量。磁场分布是影响电子注质量的重要因素之一。进行了几种磁场分布的改变来讨论电子注参量的变化。结果表明,改变阴极区的磁场大小或形状(倾斜或平坦)对电子注质量有重要的影响。

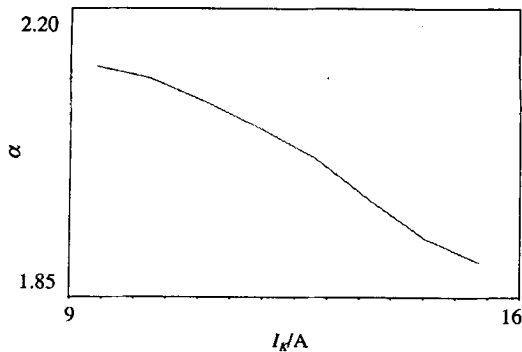


图3 α 值随电流的变化曲线

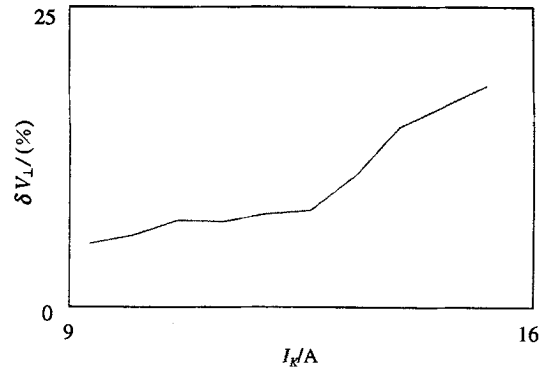


图4 横向速度零散随电流的变化曲线

3.3 电极形状的影响

本文中进行了多次改变电极形状的计算。计算表明,选取适中的电极形状,如直线段的长度,阴极前、后形成极的长度和倾角,前成形极圆头的大小,半径的大小,阳极直线的倾角,拐弯处是否圆弧和圆弧半径的大小等等诸因素均对速度零散有影响。因此,计算中正确选取电极形状是保证电子注质量和增加电子注稳定性的重要因素。

3.4 计算模拟中电子注层数带来的误差

在计算机模拟中电子注的层数(电子轨迹条数)也会给数值计算带来误差。本文在这方面进行了研究和探讨,为了减小模拟带来的误差,选择多少条电子注的轨迹条数来模拟,才能符合实际情况。计算表明电子注轨迹条数增加到一定数目后,随着电子注轨迹条数的增加,电子注的平均横向能量与总能量之比、平均横向速度与纵向速度之比、速度零散也基本稳定。研究表明,电子8的 α 值、纵向速度零散、横向速度零散几乎不随轨迹条数(3~30条内)的改变。电子回旋半径 R_p 和拉莫半径 R_L 也几乎不随轨迹条数(3~30条内)而改变。

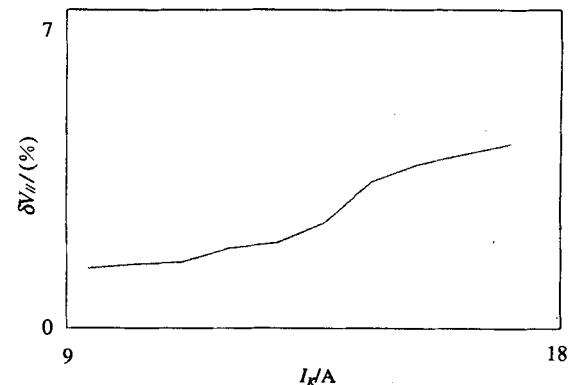


图5 纵向速度零散随电流的变化曲线

3.5 空间电荷的作用

本文设计的单阳极磁控注入电子枪是强流电子枪,具有较大的电流和导流系数,空间电荷的作用是不可忽略的。因此,模拟中必须考虑空间电荷的作用。通过计算分析、比较选择,对空间电荷的计算采用电子云方法(即电荷分配法),并对考虑空间电荷和不考虑空间电荷的计算结果进行了比较。研究表明,考虑空间电荷时,非等位区变长,即等位线向相互作用区偏移,若注电流越大,等位线向相互作用区偏移越多,表明空间电荷作用越大。也与采用辅助网格-集中电流法的结果进行了比较,计算表明电子云方法计算空间电荷更接近实际情况。

4 结束语

本文通过大量的数值计算,设计了一支性能优良的电子枪,纵向速度零散达到的千分之几。电子枪已用于永磁包装回旋管制管实验中,并获得了很好的性能。同时,本文给出的方法与编制的通用软件可为电子枪的分析和设计提供更为可靠的依据和方便。

参 考 文 献

- [1] Li Hongfu, Du Pinzhong. A self-consistent field theort and simulation for complex cavity with abrupt transition[J]. Acta Physica Sinica, 2000,49(2):409-503
- [2] Tsimring S E. NRL memorandum[R]. Report, 3 937
- [3] Boris V R, Shulim E T. Numerical Simulation of nonstationary processesin intense helical electron beams of gyrotrons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996,24 (3): 992-998
- [4] Kuftin A N, Lygin V K, Tsimring S E, *et al.* Numerical simulation and experimental study of magnetron-injection guns for powerful short-wave gyrotrons[J]. Int.J.Electronics, 1992,72(5): 1 145-1 151
- [5] Wang Huajun, Li Hongfu. Design of a single anode magnetron injection electronic gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(3): 337-341
- [6] Wang Huajun, Li Hongfu. Design of a double anode magnetron injection electronic gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(3): 331-334
- [7] Wang Huajun, Li Hongfu. Design and calculation of a double magnetic injection electronic gun for gyrotron[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(6): 98-101

编辑 孙晓丹

(上接第384页)

参 考 文 献

- [1] Doll H G. Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oilbased mud[J]. J.of Petrol Technology ,1949,1:148-162
- [2] Chew W C, Wang Y M. Reconstruction of two-dimensional permittivity using the distorted Born iterative method[J]. IEEE Trans- Med. Imag., 1990,9(2):218-225
- [3] Liu Q H. Reconstruction of two-dimensional axisymmetric inhomogeneous media[J]. IEEE Trans-GE, 1993, 31(3): 587-594
- [4] Chen S Y, Chew W C, Kennedy W D. Inversing of 6FF40 induction tool measurement using the distorted born iterative Method[C]. In IEEE Antennas and Propgation Society International Symposium, Montrea,Canada, 1997. 1 714-1 717
- [5] 杨 峰, 聂在平, 张业荣, 等. 重建二维轴对称电导率剖面分布的快速有效方法[J]. 系统工程与电子技术, 1999,21(12):1-4
- [6] 杨 峰, 聂在平. 用变分玻恩迭代方法重建二维非均匀介质结构[J]. 地理物理学报, 2000,43(4):550-556
- [7] 杨 峰, 聂在平. 轴对称二维非均匀介质结构的非线性反演方法[J]. 红外与毫米波技术, 2000,19(6):419-424
- [8] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solutions of ill-posed problems[C]. New York, Winston-Wiley, 1977
- [9] Pockock M D, Walker S P. The complex Bi-Conjugate gradient solver applied to large electromagnetic scattering problems, computational costs, and cost scalings[J]. IEEE Tans-AP, 1997, 45 (1): 140-146
- [10] 田子立, 孙以睿, 刘桂兰. 感应测井仪应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1984
- [11] 聂在平, Chew W C, Liu Q H. 电磁波对轴对称二维层状介质的散射[J]. 地球物理学报, 1992, 35(4): 479-489
- [12] 杨 峰, 聂在平. 基于阵列信息的二维轴对称电导率分布的有效反演方法[J]. 电子学报, 2000, 28(6):135-137
- [13] 杨 峰, 聂在平. 利用感应测量信息快速反演地层电导率[J]. 计算物理, 2000, 17(1,2): 89-94

编辑 刘文珍