

高功率低速度零散单阳极磁控注入电子枪的研究

刘本田

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 该文利用基于绝热压缩原理和角动量守恒理论的解析方程组,在对电子枪相关参量分析的基础上,研究一种阴极采用鼻状辅助聚焦极的单阳极磁控注入电子枪。通过电子光学软件 EGUN-226 对电子枪结构进行优化设计,比较分析了不同横纵速度比 α 对电子注轴向速度零散的影响。结果表明这种结构的电子枪可以适应比较大的电流应用。

关键词 单阳极,磁控注入电子枪,回旋管

中图分类号: TN128, 0463.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1975-04

Study of a High-Power Single-Anode Magnetron Injection Gun with Low Axial Velocity Spread

Liu Ben-tian

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

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract According to a set of analytic equations based on adiabatic compression theory and angular momentum conservation, a single-anode Magnetron Injection Gun(MIG) with a nose-shape accessorial focus pole is studied in this paper. The parameters of the single-anode MIG are optimized through computer simulation with an electron trajectory code (EGUN—226). The effect of the ratio of transverse velocity and longitudinal velocity α on axial velocity spread is analyzed, which shows that a high-quality electron beam with large α and low axial velocity spread can be realized for large current application.

Key words Single anode, Magnetron injection gun, Gyrotron

1 引言

高功率毫米波和亚毫米波可广泛应用于等离子体加热、雷达系统、毫米波通讯和材料处理等。基于电子回旋脉塞不稳定机理的回旋管由于具有高功率、高效率、宽频带的优点,使其成为高功率毫米波和亚毫米波源的理想器件之一。

回旋管一般由磁控注入电子枪(Magnetron Injection Gun, MIG)、磁场绝热压缩区、注-波相互作用区、收集极、输入输出耦合电路和聚焦磁场组成。虽然磁控注入电子枪仅是回旋管组成的一小部分,但其性能好坏决定整个回旋管的性能。对于回旋管,注-波有效相互作用需满足^[1]

$$\omega - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [k_z (v_{z0} + \Delta v_{zi}) - s\Omega_i] \geq 0 \quad (1)$$

式中 ω 为电磁波的角频率, k_z 为轴向波数, Ω 为螺旋运动电子的回旋频率, s 为电子回旋谐波数, v_{z0} 为电子注的轴向平均速度, Δv_{zi} 为电子的轴向速度零散。由式(1)可知,电子注的轴向速度零散越小,相干辐射电磁波的相位一致性越好,注-波相互作用效率就越高;相反,电子注的轴向速度零散增大,相干辐射电磁波的相位一致性差,注-波相互作用效率降

低。因此回旋管要求电子注的轴向速度零散必须小,以实现注-波相互作用的高效率。在注-波相互作用效率一定的情况下,回旋管的输出功率与电子的横向动能及电子注功率成正比,所以高功率高效率回旋管需要磁控注入电子枪产生轴向速度零散($\Delta v_z/v_{z0}$)小,横纵速度比($\alpha = v_r/v_z$)大的高性能电子注。

磁控注入电子枪通常分为双阳极和单阳极电子枪^[2],原理结构图如图1所示,其中阴极由前聚焦极、后聚焦极和阴极发射带组成。双阳极磁控注入电子枪有一个调制阳极,便于调制电子横纵速度比($\alpha = v_r/v_z$),容易产生工作电流大、 α 大、速度零散小的电子注,其阴极倾斜角一般较小($\phi_c \leq 35^\circ$),缺点是工作时需要两台高压调制器,结构复杂,不便于实际使用。单阳极磁控注入电子枪阴极倾斜角一般较大($\phi_c \geq 35^\circ$),具有结构简单、紧凑,工作时仅需要一台高压调制器,便于实际应用的优点;缺点是在较大的工作电流情况下,其产生的电子注轴向速度零散大,电子速度比 α 通常较小,且难以调节。对于各类回旋管器件,磁控注入电子枪的工作电流通常选择在温度限制电流密度区域内。Baird^[3]通过温度限制阴极电流密度 J_c 与空间电荷限制电流密度 J_L 的比值,给出了估算磁控注入电子枪工作电流点的解析式。通常

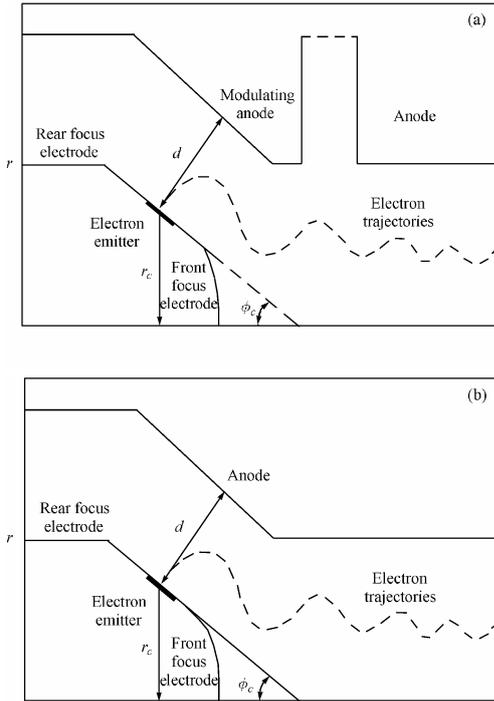


图1 磁控注入电子枪结构示意图

(a) 双阳极磁控注入电子枪 (b) 单阳极磁控注入电子枪

Fig.1 Schematic drawing of MIG

(a) Double-anode MIG (b) Single-anode MIG

取 $J_c/J_L \leq 30\%$ ，以降低空间电荷效应对电子注性能的影响。文献[4-7]分别针对不同类型回旋管及其要求，设计了与其相适应的磁控注入电子枪。文献[4]研究了阴极边缘效应对电子注速度零散的影响，并提出通过改善阴极边缘电子发射的方法降低电子注轴向速度零散。文献[7]设计的单阳极磁控注入电子枪，在工作电压 61.5kV 时产生了 2A 电子注，其速度比 $\alpha = 1.37$ 、速度零散 $\Delta v_z/v_{z0} = 3.7\%$ 。该磁控注入电子枪因阴极表面采用凹形结构，改善了电子注质量，减小了电子注速度零散。文献[6]利用 EGUN 及其自有软件设计的单阳极磁控注入电子枪性能参数为工作电压 90kV，电流 2A， $\alpha = 1.13$ ， $\Delta v_z/v_{z0} = 13.4\%$ 。因采用传统电子枪结构，该单阳极磁控注入电子枪难以实现速度零散小、速度比大的大功率电子注。

为实现回旋管结构简单、实用和性能可靠的要求，本文在单阳极磁控注入电子枪传统结构的基础上，通过阴极采用鼻状辅助聚焦极新型结构，设计了一种新型高性能单阳极磁控注入电子枪。第2节为单阳极磁控注入电子枪基本结构参数的确定。第3节为新型结构单阳极磁控注入电子枪的优化设计。最后为本文的结束语。

2 单阳极磁控注入电子枪基本结构参数的确定

基于角动量守恒理论和绝热原理，Baird^[3]给出了一组用于磁控注入电子枪结构设计的解析方程组，其形式为

$$F_m = \mu^2 R_c^2 \quad (2)$$

$$\frac{L_s}{R_c} = \left(\frac{I_b}{2\pi r_{L0}^2 J_c} \right) \left(\frac{1}{R_c^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\delta R_g}{R_g} = \left(\frac{\sin \phi_c}{\mu^2 + 1} \right) \left(\frac{I_b}{2\pi r_{L0}^2 J_c} \right) \left(\frac{1}{R_c^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{D_{ac}}{R_c} = \frac{D_F \mu}{\cos \phi_c} \quad (5)$$

$$\Phi_a = \frac{\ln(1 + D_F \mu)}{\ln(1 + 2\mu)} \left\{ \left[1 + \frac{4}{\mu^2} \left(\frac{1 + \mu}{1 + 2\mu} \right)^2 \cdot \left(\frac{\gamma_0^2 - 1}{R_c^2 \cos^2 \phi_c} \right) \left(\frac{\alpha_0^2}{\alpha_0^2 + 1} \right) \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$\frac{E_c}{E_{\max}} = \left(\frac{m_0 c^2 / e}{E_{\max} r_{L0}} \right) \left(\frac{\Phi_a \cos \phi_c}{\ln(1 + D_F \mu)} \right) \left(\frac{1}{R_c} \right) \quad (7)$$

$$\frac{J_c}{J_L} = \left(\frac{2\pi r_{L0}^2 J_c (1 + D_F \mu) \beta^2}{14.66(10^{-6}) (m_0 c^2 / e)^{3/2} \cos^2 \phi_c} \right) \left(\frac{R_c^2}{\Phi_a^{3/2}} \right) \quad (8)$$

其中 $\beta = \exp(-\zeta/2) \left[\zeta + \frac{1}{10} \zeta^2 + \frac{5}{300} \zeta^3 + \frac{24}{9900} \zeta^4 + \dots \right]$ ， $\zeta = \ln(1 + D_F \mu)$ ，相关参量见文献[3]。式(2)为磁场压缩比 F_m 与归一化阴极半径 R_c 及圆柱度参量 μ 之间的关系式。式(3)给出了阴极斜长度 L_s 依赖于阴极面电流密度 J_c 、工作电流 I_b 、阴极半径 R_c 的表达式。式(4)估算了电子注导引中心半径的漂移量。式(5)为阳极-阴极之间距离归一化参量 D_{ac} 的表达式，其中 D_F 为阴极-阳极空间因子(通常 $D_F \geq 2$ ，以免电子被阳极截获)。式(6)为归一化调制阳极电压的表达式。式(7)为阴极表面电场强度的表达式。式(8)估算了空间电荷效应对电子注的影响。

以上方程组是基于双阳极磁控注入电子枪原理模型导出的，当其应用于单阳极磁控注入电子枪设计时，调整相关参数使调制阳极电压与阳极电压相等即可。

磁控注入电子枪的设计方法为：首先根据回旋管性能要求确定出电子注电压 V_b ，电流 I_b ，电子速度比 α ，工作磁场强度 B_0 及电子空间位置和轨道尺寸；其次，利用上述解析方程组，通过合理选择阴极平均半径 r_c ，阴极面电流密度 J_c ，阴极倾斜角 ϕ_c 和空间因子 D_F ，选择出单阳极磁控注入电子枪结构参数 r_c ， ϕ_c ， l_s ， d_{ac} 和 B_c 的最佳初始值，最后利用电子光学软件对电子枪结构参数进行优化，以获得理想的电子注形成系统。

Ku波段连续磁调谐回旋返波管振荡器^[8]对电子注的性能要求见表1，其中磁场变化范围为[0.71~0.753]T，以满足回旋返波管在[16.8~17.4]GHz 频带内连续调谐的要求。

表 1 电子注的性能参数

Tab.1 Performance parameters of electron beam

电子注电压 V_b	电子注电流 I_b	阴极面 电流密度 J_c	注-波相互作用区 工作磁场 B_0	电子注导引 中心半径 r_g	电子速度比 α	速度零散 $\Delta v_z/v_z$
<65kV	>15A	<8A/cm ²	0.71~0.753 T	5.4 mm	1.5	<6%

利用以上方程组, 可分析电子枪相关参数随阴极平均半径 r_c 的变化趋势。当阴极倾斜角 ϕ_c 分别为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 时, 调制阳极归一化电压 ϕ_a 随 r_c 的变化曲线如图 2 所示, 其中虚直线为所设计电子枪的阳极电压归一化值。相应地, E_c/E_{max} 和 J_c/J_L 与 r_c 的关系如图 3 所示。对于单阳极磁控注入电子枪, 调制阳极电压与阳极电压相等。如图 2 所示, 对于给定工作电压, 阴极倾斜角 ϕ_c 减小, 阴极半径 r_c 相应减小; 而由图 3 和图 4 可知阴极表面电场强度 E_c 和阴极区磁场强度 B_c 相应增加, J_c/J_L 比值减小; 相反, r_c 增加, E_c 和 B_c 减小, J_c/J_L 比值增加。 E_c 和 B_c 增加, 可能导致电场击穿和增加电子枪区磁场负担; 而 J_c/J_L 比值增加会导致空间电荷效应明显, 影响电子注质量。

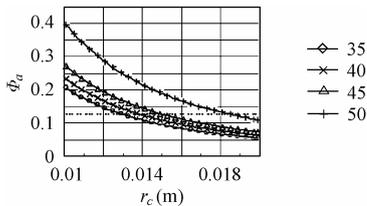


图 2 归一化阳极电压 ϕ_a 与阴极半径 r_c 之间的关系

Fig.2 Relation of normalized anode voltage ϕ_a and cathode radius r_c

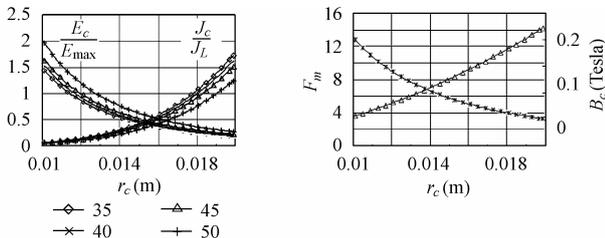


图 3 阴极倾斜角不同时 E_c/E_{max} 和 J_c/J_L 随半径 r_c 变化曲线

Fig.3 E_c/E_{max} and J_c/J_L as a function of cathode radius r_c for different cathode angle

图 4 阴极磁场 B_c 和磁压缩比 F_m 与阴极半径 r_c 之间的关系

Fig.4 B_c and F_m as a function of cathode radius r_c

为满足回旋返波管性能需要, 选取单阳极磁控注入电子枪的工作电压 $V_b = 62 \text{ kV}$ (图 2 中虚直线对应其归一化值)。综合分析图 2~图 4, 选择电子枪结构的初始参数为: 阴极倾斜角 $\phi_c = 40^\circ$, 阴极平均半径 $r_c = 13.8 \text{ mm}$, 阴极区磁场强度 $B_c = 0.117 \text{ T}$ 。由式(3)和式(5)可得出阴极斜长度 $L_s = 3.2 \text{ mm}$, 阳极与阴极之间的距离 $d = 14.2 \text{ mm}$ 。

3 新型单阳极磁控注入电子枪的设计

在确定出电子枪基本结构的基础上, 本文利用电子光学软件 EGUN^[9] 首先对单阳极磁控注入电子枪传统结构(见图

1(b))进行了优化设计。其优化结果为 $V_b = 63 \text{ kV}$, $I_b = 17 \text{ A}$, 阴极电流密度 $J_c = 6 \text{ A/cm}^2$, $\alpha = 1.53$, $\Delta v_z/v_z = 9.2\%$ 。由优化设计结果可知, 采用传统结构的单阳极磁控注入电子枪所产生的电子注速度零散较大, 不能满足回旋返波管的性能要求。为了在工作电流较大的情况下实现速度零散小、速度比大的电子注, 磁控注入电子枪的阴极增加鼻状辅助聚焦极(结构如图 5 所示), 以改善阴极发射区电场的均匀性, 达到降低电子注速度零散的目的。优化设计的磁控注入电子枪结构主要参数如表 2 所示。该单阳极磁控注入电子枪所产生的电子注性能如表 3 所示。由表 3 可知, 在调谐磁场 [0.71, 0.753] T 范围内, 该磁控注入电子枪产生的电子注速度零散 $\Delta v_z/v_z \leq 5.6\%$, 电子速度比 $\alpha \approx 1.5$, 电子注导引中心平均半径为 5.47 mm 。优化设计的单阳极磁控注入电子枪的形状、电子注轨迹、等位线和轴向磁场分布曲线如图 5 所示。图 6 给出了电子注的横纵速度比 α 和轴向速度零散 $\Delta v_z/v_z$ 仅随工作电压的变化曲线。由图 6 可知, 该单阳极磁控注入电子枪产生的电子注在较宽的工作电压范围内具有速度比大 ($\alpha > 1$) 和轴向速度零散小的特点。与文献 [6, 7] 所设计的单阳极磁控注入电子枪相比, 该单阳极磁控注入电子枪由于阴极采用新型结构, 使其能够在大工作电流情况下产生轴向速度零散小、横纵速度比大的高性能电子注。

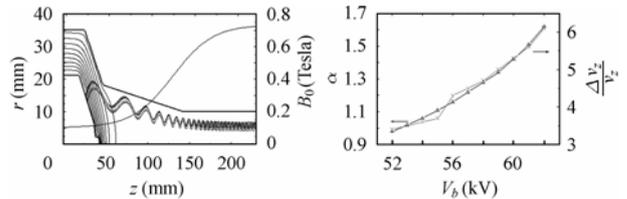


图 5 优化设计的电子枪形状, 电子注轨迹, 等位线及轴向磁场分布

Fig.5 The electrode shape, electron trajectories, distribution of equipotential lines and magnetic field profile

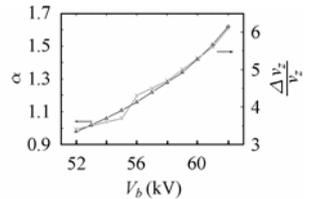


图 6 电子注速度比 α 和速度零散 $\Delta v_z/v_z$ 随工作电压的变化曲线

Fig.6 Beam velocity ratio α and spreads as a function of beam voltage

表 2 磁控注入电子枪结构优化参数

Tab.2 Parameters optimized for configuration of MIG

	阴极平均半径 r_c	阴极倾斜角 ϕ_c	阴极斜长度 L_s	阴极-阳极之间距离 d	阴极区磁场 B_c
优化参数	13.8mm	40°	3.2 mm	14.2 mm	0.117 T
初始参数	13.54mm	38°	3.08mm	15.6 mm	0.107 T

表 3 磁控注入电子枪的模拟设计结果

Tab.3 Simulation results of MIG

电子注电压 V_b (V)	电子注电流 I_b (A)	阴极电流密度 J_c (A/cm^2)	注-波相互作用区工作磁场 B_0 (T)	电子注导引中心半径 r_z (mm)	电子速度比 α	速度零散 $\Delta v_z/v_z$ (%)
61k	16	5	0.71	5.55	1.37	5.6
			0.725	5.47	1.51	5.6
			0.753	5.4	1.41	5.2

4 结束语

本文首先利用基于绝热原理和角动量守恒理论的解析方程组,研究了电子枪相关参量之间关系。根据回旋返波管的性能要求,利用电子光学软件 EGUN-226 对电子枪结构参数进行了优化设计。所设计的单阳极磁控注入电子枪在工作电压 61kV、电流 16A 情况下,能够在速度比 $\alpha=1.4\sim 1.5$, 磁场 $B_0=0.71\sim 0.753$ T 范围内产生轴向速度零散 $\Delta v_z/v_z \leq 5.6\%$ 的电子注。与传统结构的单阳极磁控注入电子枪相比,由于采用鼻型辅助聚焦结构,这种单阳极磁控注入电子枪能够在横纵速度比和工作电流大的情况下产生具有轴向速度零散小的电子注。

参考文献

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. High-power Microwave Sources and Technologies. New York, IEEE Press, 2001: 155-196.
- [2] Lawson Wes, Specht Vicki. Design comparison of single-anode and double-anode 300-MW magnetron injection gun. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1993, 40(7): 1322-1328.
- [3] Baird J M, Lawson Wes. Magnetron injection gun (MIG) design for gyrotron applications. *Int. J. Electronics*, 1986, 61(6): 953-967.
- [4] Nguyen K T, Danly B G, *et al.*. Electron gun and collector design for 94-GHz gyro-amplifiers. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1998, 26(3): 799-813.
- [5] Lee S H, Choi J J, Han W K, Baek S W. An iron-free magnetron-injection-gun for a 28GHz, 200kW gyrokystron amplifier. *Int. J. Infra. and MM Waves*, 1999, 20(12): 2011-2022.
- [6] Yi Sheng Yeh, Ming Hsiung Tsao, Han Ying Chen and Tsun-Hsu Chang. Improved computer program for magnetron injection gun design. *Int. J. Infra. And MM waves*, 2000, 21(9): 1397-1415.
- [7] Jin J Choi. Design of a temperature limited single-anode magnetron injection gun. *Int. J. Infra. and MM Waves*, 1999, 20(2): 239-252.
- [8] 刘本田. 新型高效率二次谐波宽带可调复合相互作用回旋管. *电子与信息学报*, 2006, 28(4): 760-764.
- [9] Herrmannsfeldt W B. Electron trajectory program. Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-226, 1979.

刘本田: 男, 1971 年生, 博士, 研究方向为宽频带连续可调回旋管振荡器、高功率高效率回旋管放大器等毫米波相干辐射源及其应用。