

3mm 回旋行波放大器单阳极磁控注入式电子枪的设计

殷瑞剑^{①②} 刘濮鲲^①

^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: 该文根据 3mm 回旋行波放大器对电子枪的要求, 完成了单阳极磁控注入式电子枪的设计。首先由绝热理论和角动量守恒关系式, 求出了电子枪的初始设计参数, 如阴极倾角、电子注发射表面宽度和阴-阳极间距离等; 然后借助电子注轨迹分析程序 EGUN, 利用数值计算的方法得到了最终的电子注参数。结果显示: 在电子注加速电压 70kV, 工作电流 4.55A, 电子注的横向与纵向速度比为 1.0 时, 电子注的轴向速度零散为 2.4%, 能够满足回旋行波管放大器对电子注低速度零散的要求。

关键词: 回旋行波放大器; 电子枪; 单阳极; 速度零散

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1507-04

Design of a Single-anode Magnetron-injected-gun for the 3mm GYRO-TWT Amplifiers

Yin Rui-jian^{①②} Liu Pu-kun^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: A single-anode electron gun is designed and simulated according to the requirements of the gyrotron traveling wave amplifier. Firstly, the initial parameters for example the cathode angle, the cathode emitter strip and the distance between cathode and mod-anode are designed based on analytic trade-off equations. Secondly, the final beam parameters are determined with the electron trajectory code EGUN. The results reveal that when the accelerated voltage is 70kV and the beam current is 4.55A, electron gun has the axial velocity spread of 2.4%, and the ratio of the transverse velocity to the axial velocity is equal to 1.0, which can satisfy the requirement of the low electron beam velocity spread in the gyrotron traveling wave amplifier.

Key words: Gyrotron traveling wave tube; Electron gun; Single-anode; Velocity spread

1 引言

回旋管作为一种能够在毫米波段获得高峰值功率和高平均功率的快波器件, 在高功率毫米波雷达、电子对抗、通讯、材料处理和高能粒子加速器等领域有着广泛的应用前景, 在国际上受到了普遍的关注^[1-3]。其中, 回旋行波管具有比其他回旋器件更大的带宽和效率, 因而它自诞生以来就受到了各国科学家和政府的普遍重视。经过了几十年的发展, 回旋行波管放大器在理论和实验两方面都取得了极大的进展, 成为最具发展前景和应用价值的一种高功率宽带毫米波相干辐射源^[4-8]。

为提高回旋行波管的输出功率, 除了提高电子注加速电压和相互作用效率外, 还可通过改进电子光学系统, 来增大电子注电流, 同时降低电子速度零散。特别是对回旋行波管而

言, 电子注的轴向速度零散是一个非常严重的问题^[9]。因此, 如何产生低速度零散的回旋电子注是高性能回旋行波管放大器设计的关键。

迄今为止, 许多国家都研究了能产生大横向动量回旋电子注的电子枪^[10-12], 如单阳极和双阳极磁控注入式电子枪、反转磁控注入式电子枪和双磁会切式电子枪。其中, 双阳极磁控注入式电子枪^[12]有两个高压电极(阳极和控制极), 电子横向动量可以通过调节控制阳极的电压和阴极区的磁场来获得。但是, 由于双阳极磁控注入式电子枪存在机械设计的复杂性, 因而没有控制极且结构紧凑的单阳极磁控注入式电子枪^[13]对实际应用而言具有更强的吸引力。

由于单阳极磁控注入式电子枪的可调结构参数少, 因此设计难度相对较大^[14], 这方面的研究工作也相对较少。本文根据承担的 3mm 回旋行波放大器研究项目, 针对其电子注低速度零散的要求, 设计了一支高性能的单阳极磁控注入式电子枪。

2006-11-29 收到, 2007-05-17 改回

国家自然科学基金(60571039)和国家杰出青年科学基金(60125104)资助课题

2 基本理论与初始参数的确定

根据绝热理论和角动量守恒关系式, 求出电子枪的一些基本参数, 如阴极倾角、电子注发射表面宽度以及阴-阳极间距离等。3mm 回旋波放大器对单阳极磁控注入枪的设计要求见表 1, 其中, 电子注引导中心半径确定为 0.9mm, 因为 TE₀₁ 模基波回旋波管的波导半径 $r_w = 2.01\text{mm}$, 将引导中心取在 $0.45r_w$ 处, 可使电子注与波的耦合较强。设计要求: 当电子注加速电压小于 80kV, 电流为 5A 时, 电子注的横纵向速度比 α 为 1.0, 并且具有较低的轴向速度零散。单阳极磁控注入电子枪的电极结构示意图见图 1。

表 1 3mm 回旋波放大器对单阳极磁控注入枪的设计要求

电子注加速电压	电子注电流	电子横纵速度比	相互作用区磁感应强度	电子引导中心半径	阴极电流密度	电子轴向速度离散
<80 kV	5A	1.0	3.56T	0.9 mm	< 10 A/cm ²	< 5%

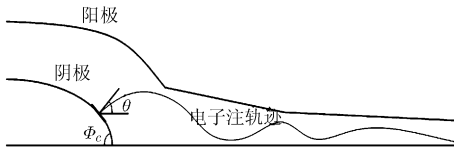


图 1 单阳极磁控注入电子枪的电极结构示意图

回旋电子在外部磁压缩区传输时角动量守恒, 即: 电子在电子注发射表面的角动量等于回旋波放大器相互作用区的角动量^[10]。根据角动量守恒及绝热理论, 进一步推导出:

$$B_c r_c^2 = B_0 (r_0^2 - r_i^2) = C_1 \quad (1)$$

其中 B_c 为阴极区磁场, B_0 为相互作用区磁场, C_1 为常数, r_c 和 r_0 分别为阴极发射半径和相互作用区的电子引导中心半径, $r_i = \gamma v_{\perp 0} / \Omega_c$ 为电子拉摩半径, $\gamma = 1 + eV_0 / mc^2$ 为相对论因子, V_0 为电子注加速电压, e 为电子电荷, m 为电子静止质量, $v_{\perp 0}$ 为电子横向速度, Ω_c 为电子回旋频率, c 为真空中的光速。定义磁场压缩比 $\text{fm} = B_0 / B_c$ 。

阴极磁场 B_c , 磁场压缩比 fm 与阴极半径 r_c 间的关系如图 2 所示。在电子注加速电压和相互作用区磁场给定的条件下, 电子枪阴极发射半径与相互作用区引导中心半径间的关系可以由式(1)得到。由于 $B_c \propto r_c^{-2}$, 在相互作用区磁场确定的情况下, 有 $\text{fm} \propto r_c^2$ 。所以当阴极半径增大时, 要使电子注参数保持不变, 就必须增大磁场压缩比。虽然目前磁场压缩比可以达到 30 以上, 但是考虑到阴极以及磁场的制造问题, 选择合适的阴极半径和磁场压缩比是至关重要的^[15]。

在单阳极磁控注入式电子枪中, 阴极发射表面电子注的初始横向速度为

$$\beta_{\perp c} = E_c \sin \theta / (cB_c) \quad (2)$$

其中 $\beta_{\perp c} = v_{\perp c} / c$, θ 为阴极面的电子发射角(见图 1), E_c 为阴极区的电场强度。

由绝热压缩定理, 有

$$m_0 \gamma_0 \beta_{\perp c}^2 c^2 / (2B) = C_2 \quad (3)$$

其中 C_2 为常数。根据绝热压缩条件, 在相互作用区和阴极区有等式 $\gamma_0 \beta_{\perp 0}^2 / (2B_0) = \beta_{\perp c}^2 / (2B_c)$ 成立。假设电子注的发射是垂直于阴极表面的, 得到 $\sin \theta = \cos \phi_c$ 。因此, 电子枪阴极发射面的电场强度表达式为

$$E_c = c \gamma^{1/2} \beta_{\perp 0} C_2^{3/2} / (r_c^3 B_0^{1/2} \cos \phi_c) \quad (4)$$

其中 $\beta_{\perp 0} = v_{\perp 0} / c$, ϕ_c 为电子枪的阴极倾角。由此得到阴极电场强度与阴极磁场强度之间满足 $E_c \propto B_c^{3/2}$ 。在阴极倾角 ϕ_c , 阴极半径 r_c 确定时, 有 $\beta_{\perp 0} \propto E_c$; 在阴极倾角 ϕ_c 、阴极电场强度 E_c 确定时, 有 $\beta_{\perp 0} \propto B_c^{-3/2}$ 。当 $\alpha = 1.0$, 电场强度 E_c 取不同值时, 阴极半径与阴极倾角间的关系如图 3 所示。当阴极电场强度 E_c , 阴极磁场强度 B_c , 电子注加速电压 V_0 和速度比 α 确定后, 阴极倾角 ϕ_c 就由阴极半径 r_c 唯一决定。一般选阴极倾角 $\phi_c > 20^\circ$, 因为这样可以保证枪内电子注的层流性。从图 3 可以看到, 对同一电场强度而言, 当阴极半径 $r_c < 6.5\text{mm}$ 时, 阴极倾角的变化非常大, 而当阴极半径 $r_c > 6.5\text{mm}$ 时, 阴极倾角的变化不是很明显。

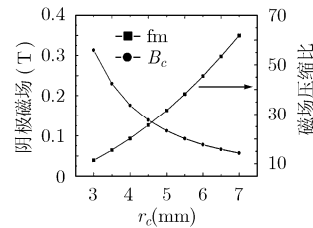


图 2 阴极磁场、磁场压缩比与阴极半径的关系

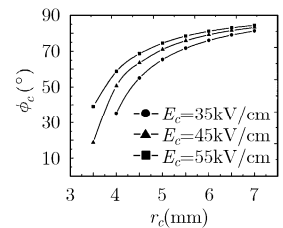


图 3 阴极半径与阴极倾角间的关系

在不考虑空间电荷效应时, 有下面的电场公式成立:

$$E_c = U_a \cos \phi_c / [r_c \ln(1 + d \cos \phi_c / r_c)] \quad (5)$$

其中 U_a 为阳极电压值, d 为阴阳极间距离。当 $E_c = 45\text{kV/cm}$, 阴极倾角 ϕ_c 取不同值时, 阴极半径与阴阳极间距离的关系如图 4 所示; 当 $\phi_c = 70^\circ$, 阴极电场值 E_c 取不同值时, 阴极半径与阴阳极间距离的关系如图 5 所示, 可以看到阴极半径越大, 阴阳极间距离就越小。

由上面的关系式, 得到了阴极半径、阴极倾角及阴阳极间距离。现在要确定合适的阴极发射带宽度 l_c , 它与阴极电流发射密度 J_c 有很密切的关系:

$$l_c = I_0 / (2\pi r_c J_c) \quad (6)$$

由式(4)可知, 在阴极电场固定的情况下, 阴极倾角增大必有阴极半径的减小。当电流密度和阴极总电流值不变时, 阴极半径减小会使阴极发射带宽度 l_c 增大。应该注意的是: 大的阴极倾角加上较长的发射带宽度, 必然会使电子注的速度零散增大。

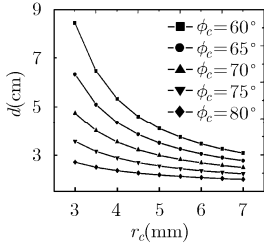


图 4 阴极半径与阴阳极间距离的关系

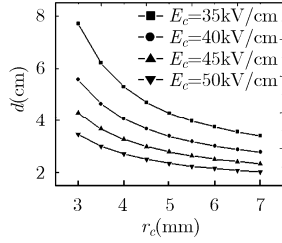


图 5 阴极半径与阴阳极间距离的关系

单阳极磁控注入式电子枪一般采用温度限制下的电子发射, 其电极间的 Langmuir 限制电流密度, 由 Langmuir 方程得出:

$$J_l = 14.66 \times 10^{-6} \frac{V_a^{3/2} \cos^2 \phi_c}{2\pi \cdot r_c^2 (1 + d \cos \phi_c / r_c) \chi^2} \quad (7)$$

其中 $\chi = \exp(-\varepsilon/2) \left[\varepsilon + \frac{1}{10} \varepsilon^2 + \frac{5}{300} \varepsilon^3 + \frac{24}{9900} \varepsilon^4 + \dots \right]$,

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{d \cos \phi_c}{r_c} \right).$$

由上式可以得到
$$\frac{J_c}{J_l} = \frac{I_0 (r_c + d \cos \phi_c) \chi^2}{14.66 \times 10^{-6} V_a^{3/2} l_c \cos^2 \phi_c} \quad (8)$$

一般而言, 绝热电子枪的设计是忽略空间电荷效应的。为了与这一设计原则相对应, 规定电子注的发射电流密度不得超过空间电荷效应限制下的注电流密度, 而且在设计中一般要求 J_c / J_l 小于 30%。在 $d = 3\text{cm}$, 阴极倾角 ϕ_c 取不同值时, 电流密度比 J_c / J_l 与阴极半径 r_c 的关系见图 6; 在 $\phi_c = 70^\circ$, 阴阳极间距离 d 取不同值时, 电流密度比 J_c / J_l 与阴极半径 r_c 的关系见图 7 所示。

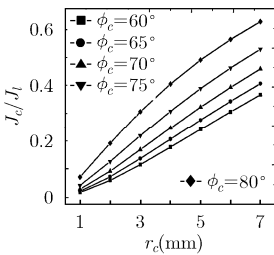


图 6 电流密度比随阴极半径的变化

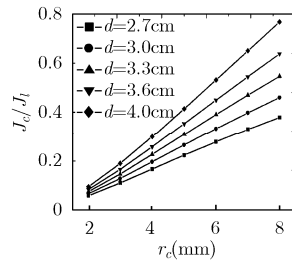


图 7 电流密度比随阴极半径的变化

3 数值模拟与优化设计

前面获得了电子枪的基本设计参数: 阴极半径 $r_c = 5\text{mm}$; 磁压缩比 $fm = 32$; 阴极倾角 $\phi_c = 70^\circ$; 阴阳极间距离 $d = 3\text{cm}$; 阳极电压 $U_a = 68.5\text{kV}$; 阴极发射宽度 $l_c = 1.6\text{mm}$ 。然而, 要得到性能优良的电子枪必须通过轨迹分析软件进行优化。电子枪的设计存在许多不确定的因素, 参数需要细心反复的调整。下面讨论一些因素对电子枪性能的影响, 以找到各因素对电子注的作用规律。

3.1 电极形状的影响

阴极倾角、阴阳极间距离和各电极的形状, 不仅影响电子注的稳定性, 而且也会对电子注的横纵速度比和速度零散有影响。图 8 给出了速度比 α 和轴向速度零散 $\Delta v_z / v_z$ 随阴阳极间距离 d 的变化情况。从图中可知, d 对 α 的影响很大, 随着 d 的增大 α 逐渐降低。若 d 太小, 会导致电子直接打在阳极上; 若 d 太大, 则 α 太小, 不能满足电子枪对性能的要求。但 d 对轴向速度零散的影响不是很明显, $\Delta v_z / v_z$ 基本在 2%-3% 之间。

3.2 电子注电流的影响

在磁控注入式电子枪几何结构不变, 磁场参数固定的情况下, 枪内电流从 1A 变化到 10A。由数值模拟得到: α 的变化不是很大, 而轴向速度零散从 2.4% 变化到 10.4%。因为随着注电流的增大, 空间电荷效应也增大。从图 9 可以看到, 在电流等于 4.55A 时, 电子注的速度比达到最大值, 而速度零散为最小值。

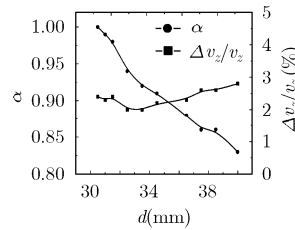


图 8 阴阳极间距离对电子注的影响

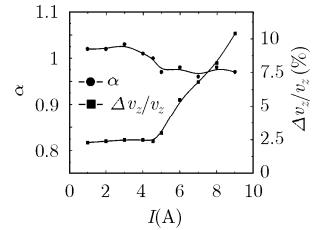


图 9 电子注电流对电子注的影响

3.3 阳极电压的影响

单阳极磁控注入电子枪只有一个阳极, 枪体比较简单。在保持其它参数不变, 只改变阳极电压的情况下, 得到图 10。当阳极电压由 69.2kV 增大到 70kV 时, α 从 0.48 增大到 1 左右; $\Delta v_z / v_z$ 变化很大, 从 25% 左右降到 2.4%。这是由于阳极电压增加, 必然会使电子注的横向速度增大, 导致横向能量增加, α 也会随着增大。当阳极电压由 70kV 增大到 70.8kV 时, α 减小而 $\Delta v_z / v_z$ 增大, 直接影响到电子枪的性能。

在考虑空间电荷效应的情况下, 根据前面的初步设计参数, 利用软件 Egund 反复调整不断优化, 最终得到了该电枪的电极结构参数, 如表 2 所示。单阳极磁控注入式电极结构和电子注轨迹, 如图 11 所示。

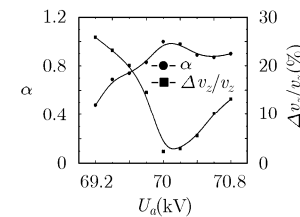


图 10 阳极电压对电子注的影响

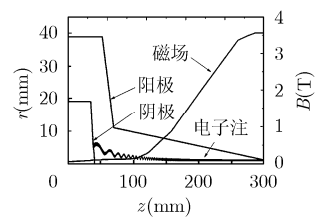


图 11 优化后电极结构和电子注轨迹

表2 优化后的单阳极磁控注入式电子枪参数

阳极电压值 U_a	70kV	电子注电流	4.55A
相互作用区磁场 B_0	3.56T	磁压缩比 fm	32
引导中心半径 r_0	0.9mm	阴极倾角 ϕ_c	70°
阴极半径 r_c	5mm	阴阳极间距离 d	30.49mm
J_c / J_1 的比值	0.28	阴极电流密度 J_c	9A/cm ²
横纵速度比值 α	1.0	轴向速度零散 $\Delta v_z / v_z$	2.4%
阴极发射面宽度 l_c	1.46mm		

4 结束语

本文研究了应用于 3mm 基波回旋行波放大器的单阳极磁控注入式电子枪。首先从理论上得到电子枪的基本参数，然后通过的数值模拟和优化设计，最终获得了一把性能良好的电子枪，可以满足回旋行波放大器对电子枪的要求。

参考文献

- [1] 刘濮鲲, 徐寿喜. 回旋速调管放大器及其发展评述. 电子与信息学报, 2003, 25(5): 683-694.
Liu P K and Xu S X. Review of gyrokystron amplifiers and its development. *J. Electronics and Information Technology*, 2003, 25(5): 683-694.
- [2] Kevin L F, Bruce G D, and Howard R J, *et al.* Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices. *Proc. IEEE*, 1999, 87(5): 752-781.
- [3] Chu K R. The electron cyclotron maser. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76: 489-540.
- [4] Chu K R. Overview of research on the gyrotron traveling-wave amplifier. *IEEE Trans. Plasma Science*, 2002, 30(3): 903-908.
- [5] Chu K R. Ultra-high gain gyrotron traveling wave amplifier. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81(21): 4760-4763.
- [6] Leon K C, McDermott D B, and Balkum A J, *et al.* Stable high power TE₀₁ gyro-TWT amplifiers. *IEEE Trans. Plasma Science*, 1994, 22(5): 585-592.
- [7] Wang Q S, McDermott D B, and Luhmann N C, *et al.* Operation of a stable 200-kW second harmonics Gyro-TWT amplifier. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1996, 24(3): 700-706.
- [8] 贾云峰, 来国军, 刘濮鲲. Ka 波段基波回旋行波管放大器的模拟与设计. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 386-389.
Jia Y F, Lai G J, and Liu P K. Simulation and design of a Ka band fundamental wave gyro-twt amplifier. *J. Infrared Millim Waves*, 2005, 24(5): 386-389.
- [9] 来国军, 贾云峰, 刘濮鲲. W 波段回旋行波管放大器绝对不稳定性研究. 强激光与离子束, 2005, 17(12): 1865-1869.
Lai G J, Jia Y F, and Liu P K. Absolute instability in gyro-traveling-wave tube. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(12): 1865-1869.
- [10] Baird J M and Lawson W. Magnetron injection gun (MIG) design for gyrotron application. *Int. J. Electron.*, 1986, 61(6): 953-967.
- [11] Caplan M and Thorington C. Improved computer modeling of magnetron injection gun for gyrotrons. *Int. J. Electron.*, 1981, 51(1): 415-426.
- [12] Nguyen K T and Danly B G. Electron gun and collector design for 94-GHz gyro-amplifiers. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1998, 26(3): 799-813.
- [13] Choi J J. Design of a temperature limited single-anode magnetron-injection-gun. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 20(2): 239-252.
- [14] Liu P K, Borie E, and Kartikeyan M V. Design of a 24GHz, 25-50kW technology gyrotron operating at the second harmonic. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 21(12): 1917-1943.
- [15] Wang Ch, Yeh Y S, and Yang T T, *et al.* A mechanically tunable magnetron injection gun. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, 68(8): 3031-3035.

殷瑞剑: 女, 1981年生, 博士生, 从事毫米波回旋放大器的研究.

刘濮鲲: 男, 1965年生, 博士, 教授, 研究员, 博士生导师, 主要从事大功率微波毫米波器件、高功率微波与信息对抗技术的研究.