

文章编号: 2095-4980(2013)02-0171-03

170 GHz 回旋管电子枪的设计

曾 旭, 王峨锋, 刘本田, 李志良, 冯进军

(中国电子科技集团公司 第 12 研究所, 北京 100015)

摘 要: 170 GHz 回旋管是等离子体核聚变中电子回旋谐振加热的理想功率源, 在功率上要求具有 1 MW 以上的输出功率。要产生这么大的输出功率, 就需要具有足够大横向能量的电子注与高频场的横向电场进行互作用, 因此要对电子枪进行专门的设计。利用绝热压缩理论及相关的仿真软件对双阳极磁控注入电子枪进行了设计, 得到了较好的电子注参数。所设计的电子枪能在工作电压 80 kV、工作电流 40 A 的条件下为 170 GHz 基波回旋管提供所需的回旋电子注, 其引导中心半径为 8.27 mm, 横纵速度比 1.5。

关键词: 回旋管; 磁控注入电子枪; 绝热压缩理论; 电子回旋谐振加热; 170 GHz

中图分类号: TN128

文献标识码: A

Design of the magnetron injection gun for 170 GHz gyrotron

ZENG Xu, WANG E-feng, LIU Ben-tian, LI Zhi-liang, FENG Jin-jun

(The 12th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: A 170 GHz gyrotron is an ideal power source for the Electron Cyclotron Resonance Heating (ECRH) in the plasma fusion. The required output power from a single gyrotron tube at 170 GHz operating frequency for ECRH application is 1 MW or more. For generating the high output power, a Magnetron Injection Gun(MIG) which can provide the electron beam with large enough transverse energy for interacting with the transverse field of the electromagnetic wave is designed. Ideal parameters of the double-anode MIG are obtained according to the adiabatic compression theory and the correlative simulation software. The designed MIG can provide the necessary beams for the 170 GHz fundamental harmonic gyrotron under 80 kV of voltage and 40 A of current with the guidance center radius of 8.27 mm and the pitch factor of 1.5.

Key words: gyrotron; Magnetron Injection Gun; adiabatic compression theory; Electron Cyclotron Resonance Heating; 170 GHz

回旋管是理想的高功率毫米波源, 它可广泛应用于高速通信、材料加工、生物成像和等离子体诊断、核磁共振光谱学以及等离子体核聚变的电子回旋谐振加热等方面^[1]。在国际热核聚变(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)计划中, 电子回旋谐振加热是等离子体主要辅助加热方式之一, 频率选定为 170 GHz。同时, 它在功率上要求单支回旋管在 170 GHz 能提供 1 MW 以上的连续波输出功率^[2]。为了获得这么大的输出功率, 就需要具有足够大横向能量的电子注与高频场的横向电场进行互作用, 因此如何设计能产生大束流、高速度比和较低速度零散的磁控注入电子枪就成了 170 GHz 回旋管研究的一个主要方面。本文根据 170 GHz 基波回旋管选择的工作模式和高频谐振腔的设计需要, 选择设计应用较为广泛的双阳极磁控注入枪, 选择原因在于由它产生的电子注横向动量可以方便地利用 2 个阳极的电压和阴极上所加的磁场来进行调整。然后, 利用绝热压缩理论对所设计的电子枪进行了初始的物理模型建立, 选定了初始工作参数。最后, 利用相关的粒子仿真软件对设计的电子枪进行了仿真优化, 得到了较好的电子注参数。

1 电子枪初始参数的选定和物理模型的建立

由于回旋管的磁控注入电子枪浸没在轴向收敛的磁场中, 这种收敛磁场具有绝热压缩性, 它起到将电子注的

纵向能量转换成横向能量的作用。因此,利用绝热压缩理论对磁控注入电子枪进行分析^[3]。

应用绝热压缩理论可以导出:

$$v_{\perp 0}^2 / B_0 = v_{\perp k}^2 / B_k \quad (1)$$

$$E_{\perp k} = v_{\perp 0} B_0 / f^{3/2} \quad (2)$$

$$W_{\perp 0} = e E_{\perp k}^2 f^3 / 2 \eta B_0^2 \quad (3)$$

式中: $v_{\perp 0}$ 为电子注的横向速度; $v_{\perp k}$ 为阴极区电子注的横向速度; B_0 为均匀区的磁场; B_k 为阴极中心所对应的磁场; $E_{\perp k}$ 为阴极表面的电场强度; $f = B_0 / B_k$ 为磁场压缩比; $W_{\perp 0}$ 为横向能量; e 为电子电荷; η 为荷质比。

同时,根据角动量守恒可以导出阴极半径与引导半径及拉莫半径的关系:

$$r_k = \sqrt{(r_0^2 - r_l^2) \cdot f} \quad (4)$$

式中: r_k 为阴极半径; r_0 为引导半径; r_l 为拉莫半径。

为了选定双阳极电子枪的初始参数,必须明确所需电子注的主要特性参数。就回旋管而言,所需电子注的特性参数为引导半径和横纵速度比,这 2 个参数可以根据回旋管整管输出功率和模式选择的需要来选定。表 1 给出了整管的工作参数要求。

表 1 整管的工作参数要求
Table1 Operating parameters of 170 GHz gyrotron

operation voltage/kV	beam current/A	pitch factor	guidance center radius/mm	cavity radius/mm	magnetic field/T
80	40	1.5	8.27	15.8	6.77

根据表 1 的要求,利用式(1)~式(4)就可以进行双阳极电子枪初始参数的选定和物理模型的建立。其设计步骤为: a) 选取合适的阴极中心所对应的磁场 B_k ; b) 计算磁场压缩比 f ; c) 根据相互作用腔半径计算得到阴极半径 r_k ; d) 选定阴极倾角,计算确定阴极的几何尺寸参数; e) 选定前成形极及后成形极的长度; f) 根据经验选择 2 个阳极的位置及角度。

对阴极中心所对应的磁场 B_k 进行选取时要注意,磁场强度不宜过大,因为过大的磁场强度会导致电子注的速度离散过大。同样,磁场强度也不宜过小,因为过小的磁场强度会导致电子枪的过渡区过长,影响电子注的稳定性,而且也会引起电子注的速度离散过大^[4]。因此,依据经验初步选定阴极中心所对应的磁场 $B_k=0.2$ T。磁场选定之后,就可以选定其他的初始参数,进一步建立电子枪的物理模型。

表 2 给出了设计的双阳极磁控注入电子枪的主要初始参数。图 1 为双阳极磁控注入电子枪的结构示意图。

表 2 双阳极磁控注入电子枪的主要初始参数
Table2 Main initial parameters of the double-anode MIG

cathode voltage/kV	first anode voltage/kV	second anode voltage/kV	beam current/A	magnetic field of cathode/T	magnetic field of cavity/T	cathode angle/(°)	cathode radius/mm
0	40	80	40	0.2	6.77	40	53.12

2 电子枪的仿真结果分析

选定了双阳极磁控注入电子枪的初始参数并建立了相应的物理模型后,就可以利用相关的粒子仿真软件进行仿真模拟。在进行仿真之前,还要确定电子枪的轴向磁场分布,该分布可以通过编制的磁场拟合程序与真实的磁场进行拟合得到。图 2 为利用程序拟合得到的双阳极磁控注入电子枪的轴向磁场分布。图 3 为双阳极磁控注入电子枪的电子注轨迹和等位线分布。

由图 2 可以看出,拟合磁场与真实磁场基本吻合,这样就保证了仿真磁场的真实性,设计出来的电子枪更满足实际的要求。由图 3 可以看出,电子注轨迹清晰,层流性好,没有电子回轰现象出现。在电子枪的输出端,电子注与相互作用腔壁之间有足够的距离,减小了电子轰击在管壁上的可能,提高了电子注的流通过率。

通过调整阴极发射带的倾角和宽度、前/后成形极的长度、前端圆弧的半径、第 1 阳极的倾角和长度、第 1 阳极与第 2 阳极的间距等可以对电子注参数进行优化。表 3 给出了优化后的双阳极电子枪的电子注参数。

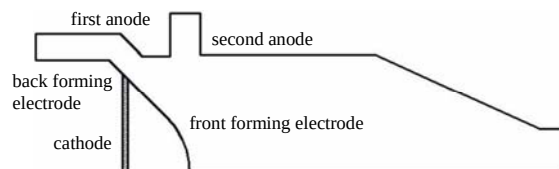


Fig.1 Structure of the double-anode MIG
图 1 双阳极磁控注入电子枪的结构示意图

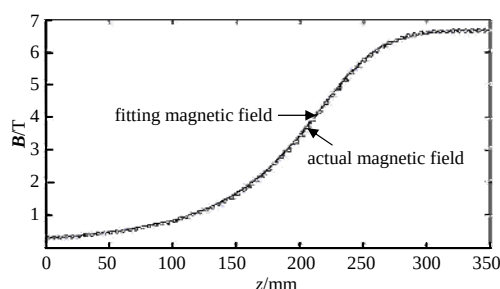


Fig.2 Axial magnetic field distribution of the double-anode MIG
图2 双阳极磁控注入电子枪的轴向磁场分布

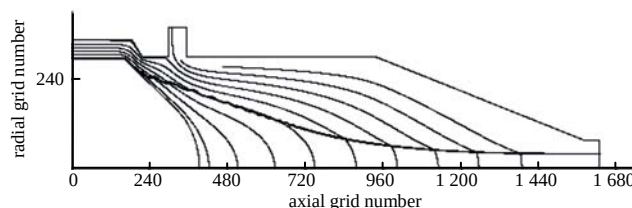


Fig.3 Electron trajectories and the equal potential line distributions of the double-anode MIG
图3 双阳极磁控注入电子枪的电子注轨迹和等位线分布

由表3可以看出,优化后的双阳极磁控注入电子枪产生的电子注速度零散小,具有足够的横向速度,完全满足设计的要求。

表3 优化后的双阳极电子枪的电子注参数
Table3 Optimized parameters of the double-anode MIG

beam current/A	guidance center radius/mm	pitch factor	transverse velocity spread/%	axial velocity spread/%
40	8.27	1.5	2.64	6.38

3 结论

回旋管磁控注入电子枪的回旋电子注的质量直接影响回旋管的性能。本文主要对双阳极磁控注入电子枪进行了研究,首先通过理论分析选定了电子枪的主要初始参数并建立了相应的物理模型,然后利用编制的程序以及相关粒子仿真软件进行了仿真及优化,所设计的电子枪在工作电压 80 kV、工作电流 40 A 的条件下产生的电子注的引导中心半径为 8.27 mm,横纵速度比 1.5,这为 170 GHz 回旋管的研制工作打下了基础。

参考文献:

- [1] Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers update 2006[EB/OL]. (2007-02)[2012-11-01]. <http://d-nb.info/995709610/34>.
- [2] Kasugai A, Sakamoto K, Takahashi K, et al. Steady-state operation of 170 GHz-1 MW gyrotron for ITER[J]. Nuclear Fusion, 2008, 48(5):054009.
- [3] 王华军,李宏福,周晓岚. 单阳极磁控注入电子枪的设计[J]. 强激光与电子束, 2000, 12(3):331-334.
- [4] 王丽. 回旋管电子光学系统的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2006.

作者简介:



曾旭(1984-),男,福建省永定县人,硕士,工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件.email: zengxu1108@163.com.

王峨锋(1968-),男,云南省峨山县人,博士,高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。

李志良(1979-),男,安徽省宿州市人,在读博士研究生,工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。

刘本田(1972-),男,河南省安阳市人,博士,高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。

冯进军(1966-),男,山西省运城市人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为真空电子器件的研究,包括真空微电子器件、毫米波行波管、空间行波管、高功率回旋器件、微加工技术和太赫兹真空辐射源等。