

文章编号: 2095-4980(2019)06-0929-04

170 GHz 兆瓦级回旋管横向磁场扫描线圈组设计

曾 旭, 刘本田, 冯进军, 蔡 军

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 170 GHz 兆瓦级回旋管是热核聚变等离子体加热用电子回旋谐振系统最重要的功率源。在获得兆瓦级连续波输出功率的同时, 收集极功率密度过大成为限制整管平均功率和脉宽进一步提升的主要问题。因此, 设计了具备周期性变化的横向磁场扫描线圈组。通过仿真分析收集极内的电子注分布可知, 采用该线圈组可以有效降低功率密度, 从而保证整管稳定工作。同时, 对不同电流相位的线圈组的性能进行对比分析, 优化后的横向磁场扫描线圈组可使收集极平均功率密度由 4.7 kW/cm^2 下降到 0.29 kW/cm^2 , 将被应用到未来 170 GHz 兆瓦级回旋管的热测中。

关键词: 热核聚变; 等离子体加热; 回旋管; 横向磁场扫描线圈

中图分类号: TN136

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.0929

Design of the transverse magnetic field sweeping solenoids for 170 GHz MW gyrotrons

ZENG Xu, LIU Bentian, FENG Jinjun, CAI Jun

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing 100015, China)

Abstract: 170 GHz gyrotron utilized to heat the plasma in the thermonuclear fusion is a power source device and the most important component of the electron cyclotron resonance system. The problem of the overlarge power density in the collector will restrict the increase of the average output power and the pulse width. Therefore, a Transverse Magnetic Field Sweeping Solenoids(TMFS) is designed. According to the simulation analysis of the electron distribution in the collector, the power density could be decreased significantly from 4.7 kW/cm^2 to 0.29 kW/cm^2 after applying the solenoids, which will effectively ensure the stable operation of the tube. The optimized design of the TMFS will be used in the future gyrotrons assembly and hot testing.

Keywords: thermal nuclear fusion; plasma heating; gyrotrons; Transverse Magnetic Field Sweeping Solenoid

具备产生兆瓦级连续波功率的回旋管广泛用于核聚变实验(如 ITER(170 GHz, 24 MW)、仿星器 W7-X (140 GHz, 10 MW) 和超导托卡马克实验进展(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)装置 (140 GHz, 2 MW)) 中。作为电子回旋谐振加热和电流驱动系统的功率源, 其中 170 GHz 兆瓦级回旋管更是近些年国际上研究的热点^[1-6]。收集极作为回旋管中进行电子回收的主要部件, 其性能影响整管的效率。实际测试中, 采用单级降压收集极的整管效率通常在 50% 左右, 因此, 对于兆瓦级回旋管, 互作用之后, 电子注仍保留了大量的能量, 它们被收集极吸收进而转化成热能。以设计输出功率为 1 MW 为例, 按最高效率 50% 计算, 仍有 1 MW 的电子注功率耗散在收集极中。依据 170 GHz, TE_{25,10} 模回旋管的设计参数, 对收集极内的电子注轨迹进行数值和仿真分析可知, 电子注在收集极内的轰击区域长度仅为 1.5 cm, 平均功率密度高达 4.7 kW/cm^2 , 远远超过 500 W/cm^2 的工程阈值^[7]。一般情况下, 电子注厚度相对较小, 而在收集极中用于约束和引导电子注的磁场强度较大, 电子注很难发散开来, 使得收集极的平均功率密度过大。这将影响整管工作的稳定性, 限制输出功率的提升, 甚至会损毁整管; 并且, 随着脉宽的增加, 这个问题会变得越来越严重。

为了保证整管在连续波状态下稳定工作, 文献[8-11]均采用了一种具备周期性变化的轴向磁场线圈实现电

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-02-07

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2017YFE0300203)

子注的上下往复扫描, 但该方案具有 2 个明显的缺点: a) 通过改变轴向磁场大小, 只能移动电子注的轰击位置, 轰击面积仍不足; b) 由于收集极尺寸相对较大, 为避免收集极表面产生过大的涡流, 轴向磁场的变化频率被限制在 5~10 Hz 以内。低频率使得电子注移动缓慢, 导致在磁场的变化拐点区域功率密度过大。因此, 仅采用轴向磁场线圈不能够完全解决功率密度过大的问题。

由于旋转电子在横向磁场(主要为 B_r)的作用下会产生平行于轴向的洛伦兹力, 力的方向随 B_r 方向的变化可正可负, 电子注在方向相反的力作用下导致轰击面积被拓展。基于上述原理, 文献[12]首次提出了另一种收集极磁场扫描系统, 它利用 3 对由 50 Hz、三相交流电驱动的线圈组产生的横向旋转磁场实现对电子注的发散。在后续文献[13~14]中, 在 140 GHz、1 MW 回旋管上对这种磁场扫描系统进行了试验验证, 结果表明, 采用该系统后, 收集极平均功率密度可以控制在 400 W/cm² 以内。同时选用不锈钢作为线圈材料, 可以避免涡流问题。

综上所述, 为了确保 170 GHz 兆瓦级回旋管的稳定工作, 对于降低收集极功率密度的横向磁场扫描线圈组进行具体研究。

1 横向磁场扫描线圈组的设计

根据绝热压缩理论, 随着收集极内轴向磁场的降低, 电子注的横向动能将逐渐转换为纵向动能。电子注引导中心半径 r_g 和拉莫半径 r_L 由式(1)~式(3)确定:

$$r_g = \sqrt{\frac{B_0}{B}} r_{g0} \quad (1)$$

$$v_{\perp 0} = \frac{eB_0 r_{L0}}{\gamma m} \quad (2)$$

$$r_L = \frac{\gamma m v_{\perp 0}}{e \sqrt{B B_0}} \quad (3)$$

式中: r_{g0} 和 r_{L0} 分别为收集极入口处的引导中心半径和拉莫半径; B_0 为相互作用区域的磁场强度; B 为电子在收集极内受到的磁场强度; e 为电子电荷数; m 为电子质量; γ 为相对论因子。

结合式(1)~式(3), 且由于电子初始相位的随机性, 收集极内的电子注轨迹半径可以描述为:

$$r = \sqrt{\frac{B_0}{B}} r_{g0} + \frac{\gamma m v_{\perp 0}}{e \sqrt{B B_0}} \cos \theta \quad (4)$$

式中 θ 为电子初始相位。

由式(4)可知, 电子初始相位不同, 电子在收集极内的轨迹半径也不同, 在同一横截面内电子轰击的范围为 $\left(\sqrt{\frac{B_0}{B}} r_{g0} - \frac{\gamma m v_{\perp 0}}{e \sqrt{B B_0}}, \sqrt{\frac{B_0}{B}} r_{g0} + \frac{\gamma m v_{\perp 0}}{e \sqrt{B B_0}} \right)$, 若 B 为常数, 则这个范围非常有限。因此, 要使得

电子注的轰击面积得到拓展, 需要使同一平面的磁场在不同相位具有不同的强度, 这就是横向磁场扫描线圈的基本工作原理。

设计的横向磁场扫描线圈组结构如图 1 所示, 它由沿圆周均布的 6 个线圈组成。在最初设计中, 每个线圈之间的电流相位相差 120°, 整个线圈组由三相交流电直接驱动, 电流幅度按余弦函数周期变化, 变化次数由电源频率决定。该线圈组的径向磁场 B_r 分布 ($r = 80$ mm) 如图 2 所示。由图可知, 磁场存在 2 个最大值 30×10^{-4} T, 相位分别为 0° 及 180°, 同时存在 2 个最小值 -30×10^{-4} T, 相位分别为 90° 及 270°, 由于磁场在角向是不断变化的, 因此, 在相同 XY 平面内的电子注轨迹半径是不一致的。

设计的横向磁场扫描线圈组结构如图 1 所示, 它由沿圆周均布的 6 个线圈组成。在最初设计中, 每个线圈之间的电流相位相差 120°, 整个线圈组由三相交流电直接驱动, 电流幅度按余弦函数周期变化, 变化次数由电源频率决定。该线圈组的径向磁场 B_r 分布 ($r = 80$ mm) 如图 2 所示。由图可知, 磁场存在 2 个最大值 30×10^{-4} T, 相位分别为 0° 及 180°, 同时存在 2 个最小值 -30×10^{-4} T, 相位分别为 90° 及 270°, 由于磁场在角向是不断变化的, 因此, 在相同 XY 平面内的电子注轨迹半径是不一致的。

采用了横向扫描线圈组的电子注轨迹(见图 3)与未采用横向扫描线圈组的情况相比, 电子轰击区域明显变宽, 在收集极表面呈现为马鞍形, 电子注在收集极内的轰击区域长度拓展到 19.2 cm, 平均功率密度降至 520 W/cm²。虽然功率密度过大的问题明显缓解, 但仍然高于 500 W/cm² 的工程阈值, 需要进一步优化。

由图 2 还知, 电流相位相差 120° 时, 相邻 2 个线圈之间的磁场会产生部分抵消, 这不仅使磁场强度最大值与

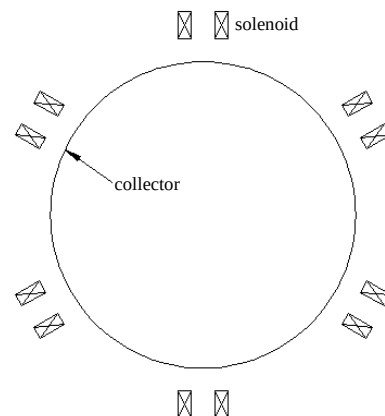


Fig.1 Structure of the transverse magnetic field sweeping solenoids
图 1 横向扫描线圈组的结构

最小值的差值无法达到最大, 且最大值与最小值的相位间隔也无法达到最大。因此, 要实现电子轰击区域长度最大化, 一方面要增加磁场强度最大值与最小值的差值; 另一方面要尽可能扩展最大值与最小值的相位间隔。

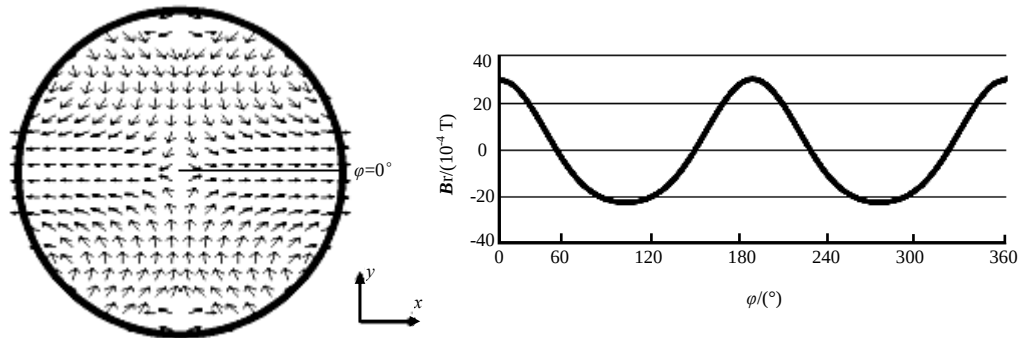


Fig.2 Distribution of the radial magnetic field
图2 径向磁场沿圆周内的分布

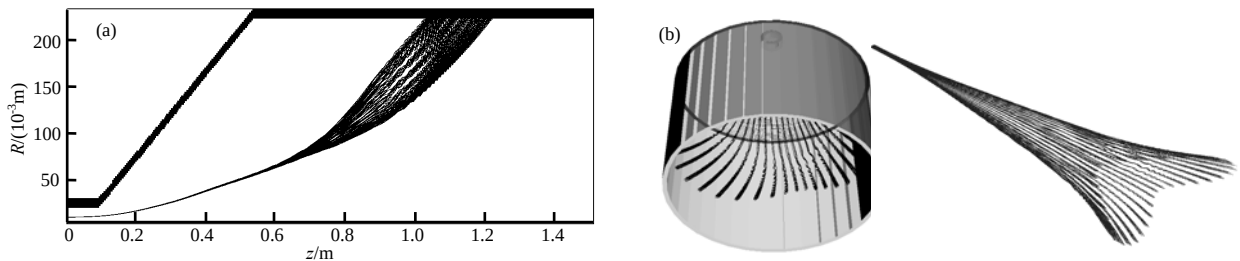


Fig.3 Electron trajectories in the collector with TMFSS in z - R cross section (a) and in 3D (b)
图3 采用了横向扫描线圈组的电子注轨迹(a) 在 z - R 平面内; (b) 三维分布

在此基础上, 将每个线圈之间的电流相位差由 120° 调整为 60° 。此时, 线圈位置之间的角度与线圈电流相位差一致, 使得相邻2个线圈之间的磁场处于完全叠加状态。该线圈组的径向磁场 B_r 分布 ($r=80$ mm) 如图4所示。由图可知, 磁场仅存在一个最大值 50×10^{-4} T, 相位为 0° , 以及一个最小值 -50×10^{-4} T, 相位为 180° 。如图5所示, 在该磁场作用下, 电子轰击区域进一步拓宽, 在收集极表面呈现为椭圆形。通过计算, 电子注在收集极内的轰击区域长度拓展至 34.3 cm, 平均功率密度进一步降至 290 W/cm^2 , 远低于 500 W/cm^2 的工程设计阈值。因此, 采用优化后的横向扫描线圈组可以有效解决功率密度过大的问题。

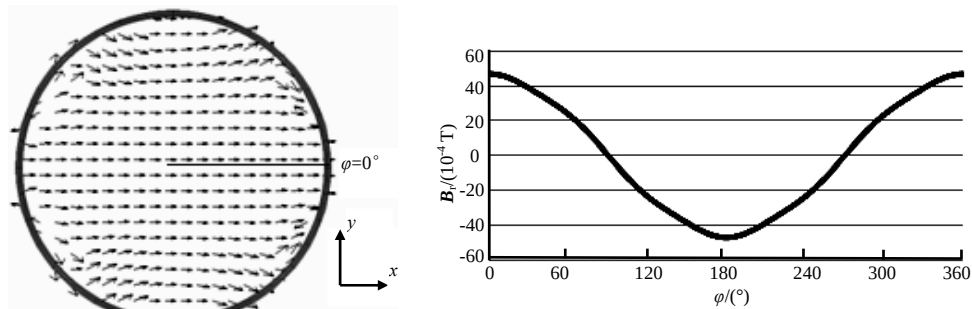


Fig.4 Distribution of the radial magnetic field
图4 径向磁场分布

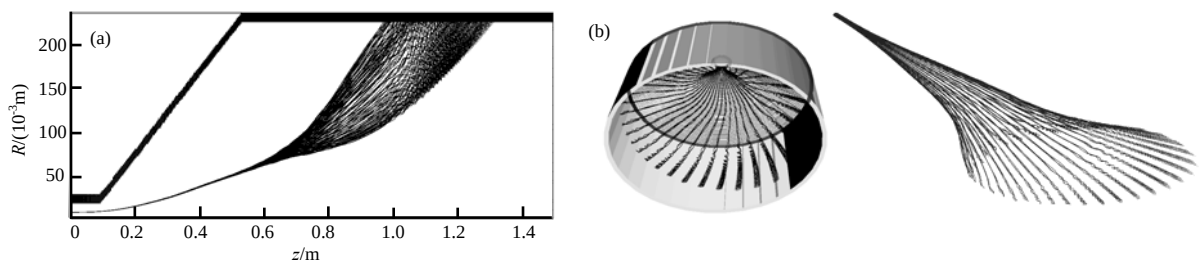


Fig.5 Electron trajectories with the optimized TMFSS in z - R cross section (a) and in 3D (b)
图5 采用了优化后的横向扫描线圈组的电子注轨迹(a) 在 z - R 平面内; (b) 三维分布

2 结论

本文对用于 170 GHz 兆瓦级回旋管的横向扫描线圈组的设计进行了介绍。数值计算和仿真结果表明,采用优化后的横向扫描线圈组可以使收集极平均功率密度从 4.7 kW/cm^2 降至 0.29 kW/cm^2 , 满足连续波工作的需求,同时也有利于提高整管的平均输出功率。在下一阶段,将对该横向扫描线圈组进行加工和测试。

参考文献:

- [1] CHIRKOV A, DENISOV G, LITVAK A, et al. Super-high power gyrotrons for electron-cyclotron plasma heating[C]// 18th International Vacuum Electronics Conference. London, Britain: IEEE, 2017: 11–12.
- [2] STEPHEN Cauffman, MONICA Blank, PHILIPP Borchard, et al. Fusion gyrotron development in the 110 GHz to 170 GHz frequency range[C]// 17th International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2016: 455–456.
- [3] GERD Gantenbein, VOLKER Erckmann, STEFAN Illy, et al. 140 GHz, 1 MW CW gyrotron development for fusion applications—progress and recent results[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2011, 32(3): 320–328.
- [4] ZISIS Ioannidis, TOMASZ Rzesnicki, ALBAJAR F, et al. CW experiments with the EU 1 MW, 170 GHz industrial prototype gyrotron for ITER at KIT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(9): 3885–3892.
- [5] SAKAMOTO Keishi, IKEDA Ryosuke, ODA Yasuhisa, et al. Status of high power gyrotron development in JAEA[C]// 16th International Vacuum Electronics Conference. Beijing: IEEE, 2015: 241–242.
- [6] MANFRED Thumm. Progress on gyrotrons for ITER and future thermonuclear fusion reactors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(4): 971–979.
- [7] PARTH C K, KARTIKEYAN M V. Design of 170 GHz, 1.5 MW conventional cavity gyrotron for plasma heating[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(6): 1522–1528.
- [8] DENISOV G G, LITVAK A G, ZAPEVALOV V E, et al. Recent results in development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion[C]// 14th International Vacuum Electronics Conference. Paris, France: IEEE, 2013: 197–198.
- [9] FELCH K, BLANK M, BORCHARD P, et al. Recent tests on 117.5 GHz and 170 GHz gyrotrons[C]// The European Physical Journal Conferences. 2015: 87–90.
- [10] LITVAK A G, MYASNIKOV V E, USACHEV S V, et al. Development of 170 GHz 1 MW/50%/CW gyrotron for ITER[C]// 5th International Vacuum Electronics Conference. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2004: 121–122.
- [11] LITVAK A G, DENISOV G G, MYASNIKOV V E, et al. Recent results in GYCOM/IAP development of high-power gyrotrons for fusion installations[C]// 6th International Vacuum Electronics Conference. Noordwijk, Holland: IEEE, 2005: 69–70.
- [12] DAMMERTZ G, ILLY S, PIOSCZYK B, et al. Collector sweeping systems for high power gyrotrons[C]// 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics Williamsburg, VA, USA: IEEE, 2005: 293–294.
- [13] ILLY S, SCHMID M, BRAUNE H, et al. Enhanced transversal collector sweeping for high power CW gyrotrons[C]// 9th International Vacuum Electronics Conference. Monterey, USA: IEEE, 2008: 33–34.
- [14] ILLY S, BERINGER M H, KERN Stefan, et al. Collector design studies for a 1 MW cylindrical-cavity and a 4 MW coaxial-cavity gyrotron[C]// 11th International Vacuum Electronics Conference. Monterey, USA: IEEE, 2010: 101–102.

作者简介:



曾 旭(1984–), 男, 福建省永定县人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为回旋器件、大功率、太赫兹技术。email: zengxu1108@163.com.

刘本田(1972–), 男, 河南省安阳市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波、毫米波、太赫兹回旋器件。

蔡 军(1978–), 男, 河北省唐山市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为周期慢波结构色散全维度电磁特性开发、太赫兹真空辐射源、短毫米、太赫兹真空电子器件技术。

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、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、太赫兹真空辐射源等。