

文章编号: 2095-4980(2024)01-0001-05

一维阵列电子注平面聚焦系统磁场分布特性

杨金生, 纪焕丽, 孙 然

(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: 针对平面集成行波管对一维阵列电子注聚焦的应用需求, 设计了 4 通道电子注平面磁聚焦系统。将各通道磁场轴向和横向分量沿轴分布特征计算结果与测试结果进行对比, 确认了 Opera 软件计算磁场分布特征的准确性。为与轴对称周期永磁(PPM)聚焦系统电子注通道内磁场分布特性进行对比, 建立了轴对称 PPM 聚焦系统模型, 测试结果与计算结果一致性较好。通过平面聚焦系统与轴对称 PPM 聚焦系统电子注通道内的磁场纵向和横向分布特性对比表明, 两种聚焦系统电子注通道内纵向和横向磁场具有相同的分布特征, 在离轴相同位置的圆周上横向磁场分量与轴向分量的比值均为 $B_x/B_z \approx 0.11$, 该平面聚焦系统可实现一维阵列圆形电子注的良好聚焦。

关键词: 一维阵列电子注; 平面磁聚焦系统; 磁场分布特性; PPM 聚焦系统

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023288

Magnetic field distribution characteristics of one-dimensional electron beam array planar focusing system

YANG Jinsheng, JI Huanli, SUN Ran

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

Abstract: A four-channel electron beam planar focusing system is designed to meet the application requirements of the planar integrated traveling wave tube for one-dimensional electron beam array focusing. The calculated results of the axial and transverse components of the magnetic field along the axis are compared with the measured results, which confirms the accuracy of Opera software in calculating the magnetic field distribution. In order to compare with the magnetic field distribution in the electron beam channel of the axisymmetric Periodic Permanent Magnet(PPM) focusing system, a model of the PPM focusing system is established, and the tested results are in good agreement with the calculated results. By comparing the longitudinal and transverse distribution characteristics of the magnetic field in the electron beam channel of the planar focusing system and the axisymmetric PPM focusing system, it is shown that the two focusing systems share the same magnetic field distribution characteristics in the electron beam channel, the ratios of transverse magnetic field component to the axial component are both about 0.11 on the circumference at the same off-axis position, and it is expected that the planar focusing system can achieve good focusing of the one-dimensional array electron beam.

Keywords: one-dimensional electron beam array; planar magnetic focusing system; magnetic field distribution characteristics; PPM focusing system

集成真空电子器件提出以来, 行波管的研究一方面基于微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)技术, 采用多路慢波结构进行功率合成的方式, 克服毫米波及太赫兹频段输出功率偏低的瓶颈, 如美国高频真空集成电子学(HIFIVE)计划中的 5 路集成 220 GHz 行波管^[1]、Ka 波段低电压多注小型化行波管^[2]、基模并行和串行多注 THz 折叠波导结构^[3]及平行多电子注太赫兹辐射源研究^[4]等; 另一方面面向有源相控阵应用的多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)集成方式, 类似于通信中的多输入多输出, 如中国电科 12 所研制的 Ku 频段三路集成行波管^[5], 基于平面化行波管拓扑结构与集成技术, 提出一种四路电子注平面聚焦结构^[6]。

收稿日期: 2023-09-28; 修回日期: 2023-11-20

多电子注聚焦系统要求各通道内静磁场分布尽量接近于单电子注 PPM 聚焦情况, 且具有旋转对称性, 各通道才能获得良好的聚焦效果^[7]。研究表明, 周期磁聚焦系统中通道内的横向磁通密度是破坏这种旋转对称性的重要因素^[8-11]。不论哪种方式, 集成行波管中的一维或多维阵列电子注均采用整体聚焦方式, 获得各通道一致的磁场分布特征及高电子注流通率成为集成行波管最难解决的问题。

本文针对多路平面集成行波管阵列电子注聚焦应用需求, 优化设计了 4 路平面磁聚焦系统并制作了样件, 采用一维磁场探针对各通道磁场分布特征进行了测试。为对比该平面聚焦系统中各电子注通道内磁场分布与轴对称 PPM 聚焦系统的异同, 制作了轴对称 PPM 聚焦系统样件并进行了磁场分布特性测试。两套磁聚焦系统电子注通道磁场分布特性测试结果表明, 电子注通道内纵向和横向磁场分布特征一致, 轴向磁场分布仿真与测试结果高度一致, 该平面聚焦系统可实现一维阵列圆形电子注的有效聚焦。

1 平面磁聚焦系统设计

根据平面集成行波管总体设计构想, 建立了一维阵列电子注平面磁聚焦系统基本拓扑结构, 其示意图如图 1 所示。上下相对磁条同极横向磁化, 相邻磁条极性交替, 采用长条极靴, 中间开有 6 个通道孔, 其中 4 个为电子注通道, 边缘 2 个为补偿通道, 以消除边缘效应, 使 4 个电子注通道内磁场分布保持一致。基于所设计行波管电子注参数和电子注通道参数, 以 Opera 3D 软件为工具, 优化设计了结构参数和磁性能参数, 中心通道($x=20$)和边缘通道($x=0$)磁场分量(轴向及横向)沿轴分布如图 2 所示。图 2(a)为 B_z 沿轴磁场分布, 呈正弦分布状态, 峰值约为 0.312 T, 中心通道($x=20$)和边缘通道($x=0$)具有良好的一致性; 图 2(b)为 B_x 沿轴磁场分布, 基本不呈周期性分布, 类似于噪声, 中间通道和边缘通道最大值接近, 约为 0.002 T; 图 2(c)为 B_y 沿轴磁场分布, 其最大值在 10^{-18} T 量级, 可认为是 0。

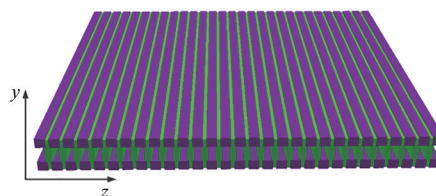


Fig.1 Structural diagram of planar magnetic focusing system
图 1 平面聚焦系统结构示意图

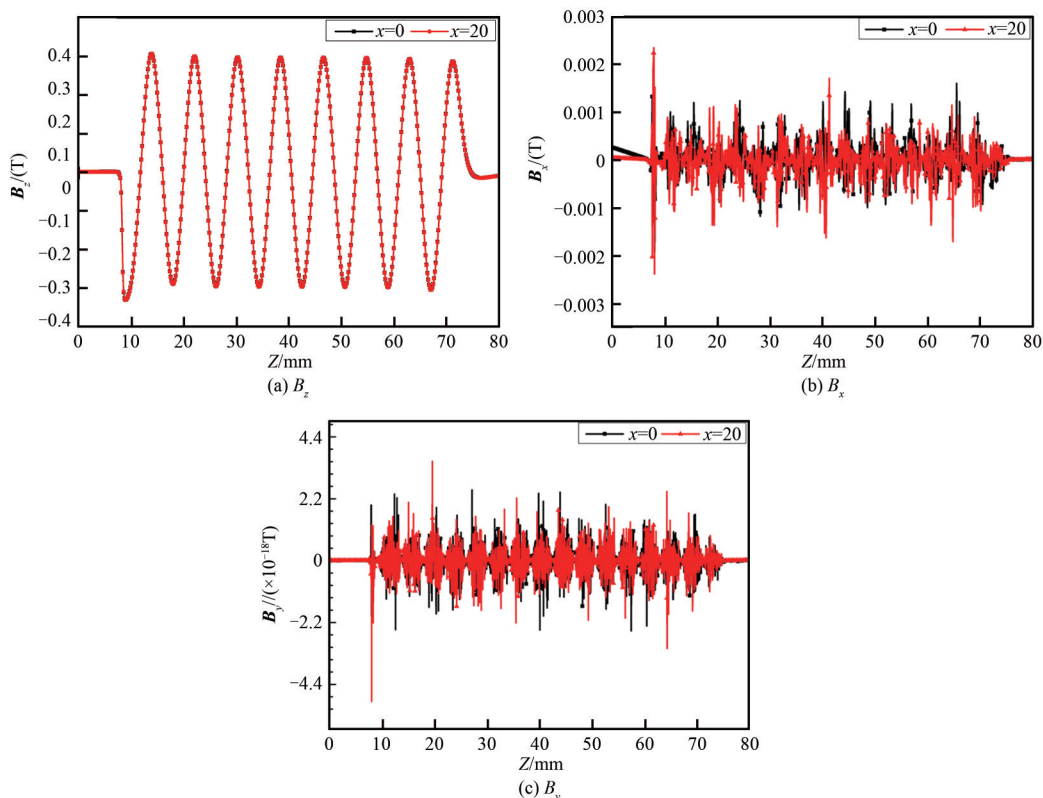


Fig.2 Axial distribution of magnetic field in central($x=20$) and peripheral channel($x=0$)
图 2 中心通道($x=20$)和边缘通道($x=0$)磁场沿轴分布

2 测试结果分析及与轴对称 PPM 聚焦系统磁场分布特性对比

采用钕钴磁体和纯铁极靴加工制作了 4 电子注通道平面磁聚焦系统样件, 如图 3 所示。用一维磁场探针对各通道内轴向和横向磁场沿轴分布进行测试, 磁场分布测试结果如图 4~图 6 所示。图 4 为 4 电子注通道 B_z 沿轴磁场分布测试结果, 呈正弦分布状态, 峰值约为 0.315 0 T, 中心通道($x=20$)和边缘通道($x=0$) B_z 沿轴分布特性完全一致。图 5 为 B_x 沿轴磁场分布测试结果, 也呈正弦分布状态, 中间通道和边缘通道 B_x 沿轴分布基本一致, 磁场峰值最小值约为 0.031 0 T, 最大值约为 0.045 T。图 6 为将一维探针旋转 2 次 90° 后, 边缘通道 B_x 、 B_y 沿轴磁场的分布特性, 与图 5 基本类似。测试结果表明, 离轴一定距离的圆周上磁场横向场分布具有轴对称性(因探针中的霍尔片无法置于通道轴心处, 所测得的磁场值应为离轴一定距离处的磁场值, 而非轴心上的磁场分布特性)。

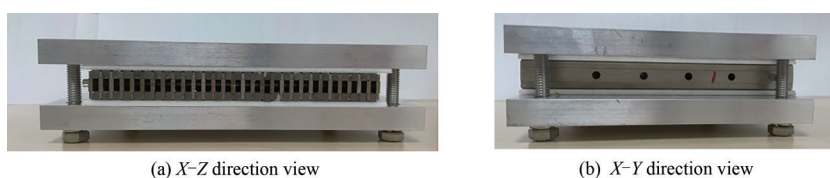


Fig.3 Fabricated planar magnetic focusing system with four-electron-beam-channel

图 3 加工制作的 4 电子注通道平面聚焦系统

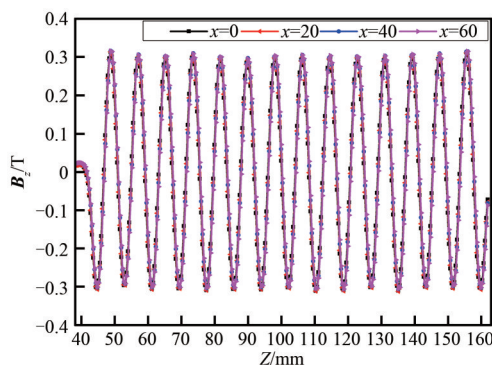


Fig.4 Test results of 4-channel B_z axial magnetic field distribution

图 4 4 通道 B_z 沿轴磁场分布测试结果

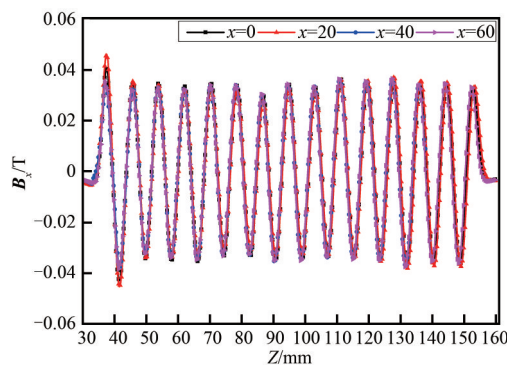


Fig.5 Test results of 4-channel B_x axial magnetic field distribution

图 5 4 通道 B_x 沿轴磁场分布测试结果

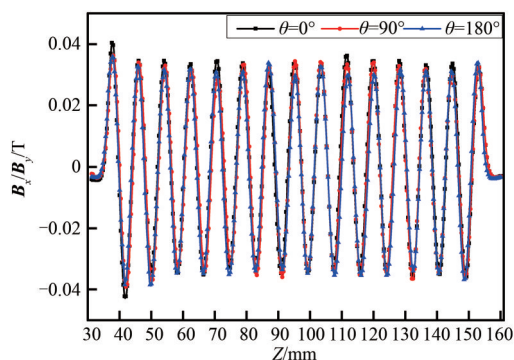


Fig.6 Test results of transverse magnetic field(B_x and B_y) distribution in edge channel

图 6 边缘通道内横向(B_x 和 B_y) 磁场分布测试结果

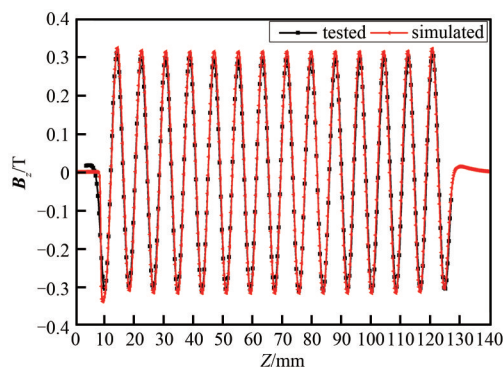


Fig.7 Comparison of simulation and test results of B_z axial magnetic

图 7 B_z 沿轴磁场分布仿真与测试结果对比

图 7 为边缘通道 B_z 沿轴磁场分布的仿真与测试结果对比, 仿真结果与测试结果具有高度一致性, 说明 Opera 软件仿真得到的 B_z 沿轴磁场分布是准确的。针对探针中的霍尔片无法置于通道轴心处, 横向场测试实际上测得的是离轴一定距离处的磁场值这一问题, 在仿真模型中计算了离轴 $r=0.2$ mm、 $r=0.3$ mm、 $r=0.4$ mm 处的横向磁场值, 与测试结果进行对比, 如图 8 所示。测试结果与 $r=0.3$ mm 处的磁场分布基本吻合, 从而可以断定, 探针中的霍尔片基本位于 $r=0.3$ mm 左右的圆周位置; 旋转探针 90° 后的测试结果与此结果一致, 说明在圆周上横向场分布具有角向对称性分布特征。

为对比平面聚焦系统中电子注通道内的磁场分布特征与轴对称 PPM 聚焦系统的异同, 建立了轴对称 PPM 聚

焦系统模型, 基于 Opera 软件对电子注通道内的轴向和横向磁场分布特征进行了计算, 并与测试结果进行对比。仿真模型如图 9(a) 所示, 加工制作的样件如图 9(b) 所示。图 10 为 PPM 聚焦系统电子注通道 B_z 沿轴磁场分布仿真与测试结果对比, 该磁系统 B_z 峰值约为 0.5 T, 仿真结果与测试结果高度一致, 再次验证了 Opera 软件计算电子注通道内 B_z 沿轴磁场分布的准确性。图 11 为 B_x 和 B_y (探针旋转 90°) 沿轴磁场分布测试结果, B_x 峰值在 0.045~0.06 T 之间, B_x 和 B_y 基本一致, 说明在离轴的圆周上磁场分布具有角向分布均匀的特征, B_x/B_z 约为 0.11。

基于建立的仿真模型, 计算了离轴 0.2 mm、0.3 mm 和 0.4 mm 处的横向磁场值, 与测试结果进行对比, 如图 12 所示。测试结果与大约 $r=0.25$ mm 处的磁场分布基本吻合, 从而可以断定, 探针中的霍尔片基本位于 $r=0.25$ mm 左右的圆周位置, 旋转探针 90° 后的测试结果与此结果一致, 说明在圆周上横向场同样具有角向对称性分布特征, B_x/B_z 约为 0.11, 与图 11 特征基本一致。

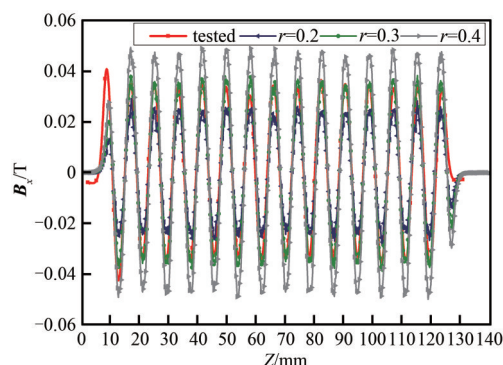


Fig.8 Comparison of simulation and test results of B_x axial magnetic field distribution at different off-axis distances
图 8 不同离轴距离处 B_x 沿轴磁场分布仿真与测试结果对比

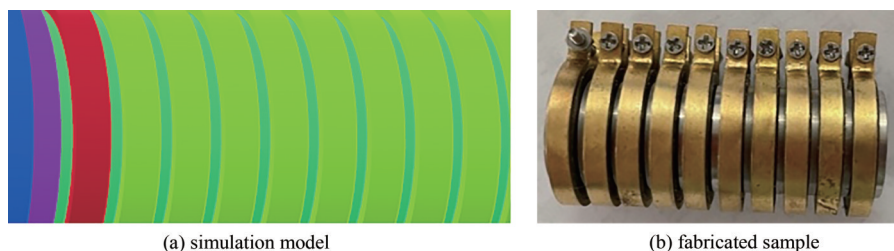


Fig.9 Axisymmetric PPM magnetic focusing system
图 9 轴对称 PPM 磁聚焦系统

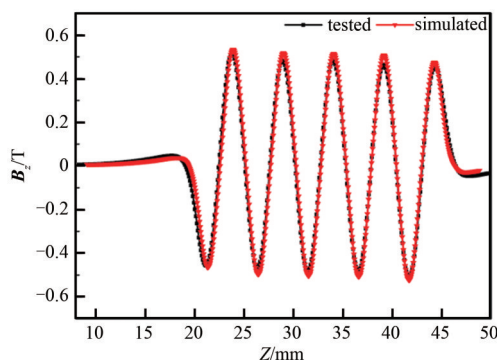


Fig.10 Comparison of simulation and test results of B_z axial magnetic field distribution
图 10 B_z 沿轴磁场分布测试与仿真结果对比

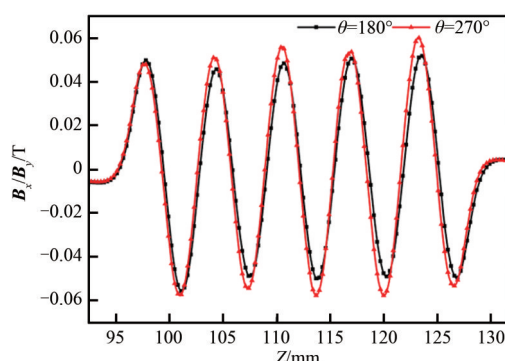


Fig.11 B_x and B_y axial magnetic field distribution test results
图 11 B_x 和 B_y 沿轴磁场分布测试结果

仿真分析了两套磁系统的电子注通道磁场分布特征, 分别加工制作了磁系统样件, 通过一维探针测试了两种磁系统电子注通道内的磁场纵向和横向分量分布特性。对比结果表明, 两种磁聚焦系统电子注通道内的磁场分布特征完全相同, 在离轴相同位置的圆周上横向磁场分布均匀, 具有角向旋转对称性, 横向分量峰值与轴向分量峰值的比值均为 $B_x/B_z \approx 0.11$, 表现为同样的横向磁场分布特征, 为圆形电子注阵列平面聚焦系统设计可行性提供了理论依据。

3 结论

本文基于平面集成行波管一维阵列电子注的聚焦需求, 设计了平面 4 通道电子注聚焦系统, 测试了该聚焦系统各通道磁场纵向和横向分布特征, 计算结果与测试结果一致性良好。为对比该聚焦系统电子注通道内磁场分布特性与轴对称 PPM 聚焦系统的异同, 仿真分析并制作了轴对称 PPM 聚焦系统。将仿真结果与测试结果进行对

比, 对比结果表明, 通道内磁场分布具有相同特征, 平面聚焦系统可实现一维阵列电子注的良好聚焦。

参考文献:

- [1] KREISCHER K, TUCEK J, BASTEN M, et al. Integrated 220 GHz source development (HiFIVE final report) [R]. 2013.
- [2] JOYE C D, VLASOV A N, JAYNES R, et al. Ka-band low-voltage multiple-beam mini-TWT [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(6): 2828–2833. doi: 10.1109/TED.2023.3239839.
- [3] 颜胜美. 多注太赫兹折叠波导行波管技术研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015. (YAN Shengmei. Research on multi-beam terahertz folded waveguide traveling wave tube technology [D]. Mianyang, Chengdu, China: China Academy of Engineering Physics, 2015.)
- [4] 徐倩. 平行多电子注太赫兹辐射源研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020. (XU Qian. Research on parallel multi-electron beams THz radiation source [D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.) doi: 10.27005/d.cnki.gdzku.2020.002457.
- [5] 胡银富, 冯进军. 用于雷达的新型真空电子器件 [J]. 雷达学报, 2016, 5(4): 350–360. (HU YinFu, FENG JinJun. New vacuum electronic devices for radar [J]. Journal of Radars, 2016, 5(4): 350–360.) doi: 10.12000/JR16078.
- [6] JI Huanli, YANG Jinsheng, CHEN Ji, et al. Design of an electron gun and PPM focusing system for low-voltage W-band TWTs [C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2022: 158–159.
- [7] 程玲莉, 王林梅, 王敬东, 等. 四注行波管周期永磁聚焦系统的优化设计 [J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(11): 51–57. (CHENG Lingli, WANG Linmei, WANG Jingdong, et al. Optimal design of periodic permanent magnetic focusing system for four-beam traveling wave tubes [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(11): 51–57.) doi: 10.11884/HPLPB201931.190153.
- [8] 邓光晟, 杨军, 阮久福, 等. 多注行波管 PPM 聚焦磁场设计方法研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(6): 528–534. (DENG Guangsheng, YANG Jun, RUAN Jiufu, et al. Design of periodic permanent magnetic focusing system for multi-beam traveling wave tubes [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(6): 528–534.) doi: 10.3969/j.issn.1672-7126.2013.06.05.
- [9] 丛培亮, 邓光晟, 杨军, 等. 耦合腔行波管 PPM 聚焦系统横向磁场分析 [J]. 电子科技, 2011, 24(10): 14–16, 27. (CONG Peiliang, DENG Guangsheng, YANG Jun, et al. Analysis of transverse magnetic fields in asymmetric PPM focusing system for coupled-cavity TWTs [J]. Electronic Science and Technology, 2011, 24(10): 14–16, 27.) doi: 10.3969/j.issn.1007-7820.2011.10.005.
- [10] 冯进军, 张小青, 蔡军, 等. 毫米波及太赫兹行波管的功率提高方法评述 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(4): 507–516. (FENG JinJun, ZHANG Xiaoqing, CAI Jun, et al. Review of power enhancement methods for millimeter wave and terahertz TWTs [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(4): 507–516.) doi: 10.11805/TKYDA 2022233.
- [11] 吴初锚, 吕国强, 杨军. 多注行波管周期永磁聚焦系统 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3): 461–463. (WU Chumao, LYU Guoqiang, YANG Jun. Periodic permanent magnetic for multi-beam traveling wave tube [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(3): 461–463.)

作者简介:

杨金生 (1968–), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为行波管、磁控管及正交场放大器. email: 13911019051@163.com.

纪焕丽 (1988–), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为短毫米波行波管的研制.

孙 然 (1997–), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电真空器件.

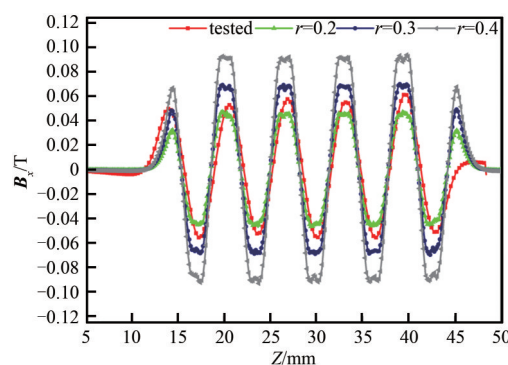


Fig.12 Comparison of simulation and test results of B_x axial magnetic field distribution at different off-axis distances

图 12 离轴不同距离处 B_x 磁场分布测试与仿真结果对比