

开口磁环的周期聚焦系统仿真分析与实验*

郭祖根, 阳志新, 姬如静, 韩萍, 张瑞峰, 王琪, 王战亮, 宫玉彬, 巩华荣

(电子科技大学电真空国家重点实验室, 成都 610054)

摘要: 当前行波管周期永磁聚焦系统的波端口位置处的磁环通常采用单向开口磁环。在波端口位置引入波导阻抗调谐支节的基础上, 提出了两种不同的双向开口磁环结构。利用三维电磁仿真软件 Opera-3D, 分析了双开口磁环的中心轴线附近的磁场, 并据此进一步介绍了带双开口磁环周期永磁聚焦系统的设计方法。为了验证带双开口磁环的周期永磁聚焦系统应用的可行性, 设计和测试了一套 E 波段折叠波导行波管电子光学系统。在行波管试验中, 电子枪发射电流 83 mA, 带双开口磁环的周期永磁聚焦系统聚焦的电子束流通率达到 99%。

关键词: 双开口磁环; 周期永磁聚焦 (PPM) 系统; 电子光学系统; 行波管; Opera-3D

中图分类号: TN124

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB201931.190208

Simulation analysis and test of periodic focusing system with opening magnetic ring

Guo Zugen, Yang Zhixin, Ji Rujing, Han Ping, Zhang Ruifeng, Wang Qi,
Wang Zhanliang, Gong Yubin, Gong Huarong

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The magnetic ring at the wave port position of the TWT periodic permanent magnet focusing system usually adopts single open magnetic ring. Two different double-open magnetic rings were proposed because of adding waveguide impedance tuning branch at the wave port position. The magnetic field near the central axis of the double-open magnetic ring was analyzed by using the 3D electromagnetic simulation software Opera-3D, and the design method of the periodic magnetic focusing system of double-open magnetic ring was put forward. In order to verify the feasibility of periodic permanent magnet focusing system with double-open magnetic rings, an electronic optical system of E-band folded waveguide TWT was designed and tested. In the traveling wave tube test, the emission current of the electron gun was 83 mA, and the electron beam flow rate of the periodic magnetic focusing system with double-open magnetic rings was 99%.

Key words: double-open magnetic ring; periodic magnetic focusing system; electronic optical system; traveling wave tube; Opera-3D

PACS: 41.20.Gz; 41.85.-p

作为重要的毫米波真空电子器件之一, 行波管具有频带宽、增益高以及工作频率高等优点, 主要应用在电子对抗、雷达以及通信等电子装备。行波管主要组成部件有: 电子枪、磁聚焦系统、收集极、慢波线和输入/输出结构。磁聚焦系统是行波管的重要部件之一, 其作用是在行波管电子通道位置产生轴向磁场。在磁场力的作用下, 把受到空间电荷力而不断发散的电子约束在电子通道内波动前进。周期磁聚焦系统是由轴向磁化相斥排列的磁环和由软铁或高导磁材料制成的极靴交替排列而成。周期永磁聚焦系统具有体积小、重量轻、结构简单、本身不消耗功率、使用方便等优点, 适用于超高频的各个波段器件, 因而得到广泛的应用^[1-4]。

行波管输入/输出结构的存在需要在周期磁聚焦系统某位置处的磁环引入一端开口, 传统的处理方法是在高频信号输入/输出机构位置采用 U 型单开口磁环。赵国庆等人设计了 U 型单开口磁环^[3-6]。行波管是频带比较宽的器件, 且高频系统的组件繁多, 高频系统加工完成仍然需要进行阻抗匹配微调才能达到最佳的工作状态。这就需

* 收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60371052)

作者简介: 郭祖根 (1992-), 男, 硕士研究生, 从事真空电子器件研究; 201722040527@std.uestc.edu.cn。

通信作者: 巩华荣 (1977-), 男, 博士, 教授, 从事真空电子器件研究; hrgong@uestc.edu.cn。

要在高频信号的输入/输出机构位置引入阻抗调谐枝节,则此处磁环需要在另外一端再开口。双开口磁环属于非中心对称的结构,因此轴向磁场的分布会发生改变,采用传统的磁场分析方法很难进行分析。本文利用 Opera-3D 软件仿真,计算和分析了双开口磁环的轴向磁场空间分布和周期永聚焦系统的轴向磁场空间分布,进而研究了带双开口磁环的周期永聚焦系统对电子束的波动性影响。为了证明双开口磁环的应用可行性,采用双开口磁环,设计了 E 波段折叠波导行波管电子光学系统,测量了单磁环以及聚焦系统的轴向磁场大小,实验测试了行波管电子束的流通性。

1 模型设计与仿真分析

1.1 双开口磁环

正常磁环和开口磁环模型如图 1 所示,图(a)为正常磁环,外半径为 12.2 mm,内半径为 3.5 mm,厚度为 2.7 mm。图(b)为双开口磁环 1,加工方式是正常磁环中间分为两半,拉开 7 mm 间距;图(c)为双开口磁环 2,加工方式是正常磁环减去中心部分,留下 7 mm 间距的两半圆弧磁块。双开口磁环均由正常磁环加工得到,相同情况下,双开口磁环 2 比双开口磁环 1 体积小,双开口磁环 1 保留了原来磁环的体积。在 Opera-3D 软件仿真设置磁环材料的矫顽力为 $-662\,000\text{ A/m}$,磁环材料选择高性能的第二代稀土钴永磁材料(SamCob),其特点是矫顽力和磁能积高,稳定性比较好。

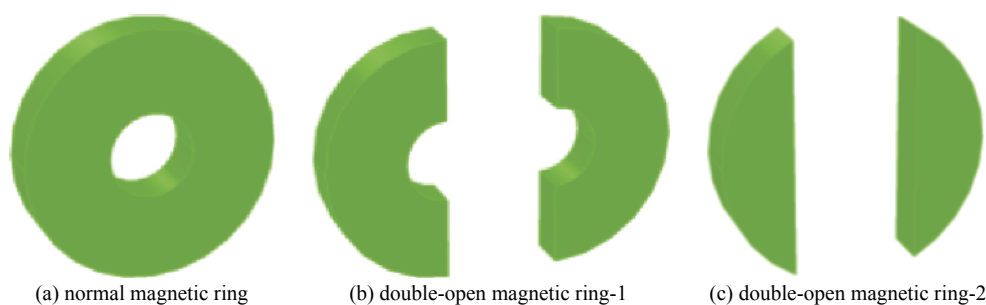


Fig. 1 Magnetic ring models

图 1 磁环模型

单个磁环中心轴向磁场分布如图 2 所示,在磁环的中心位置,正常磁环的磁场峰值为 -0.375 T ;双开口磁环 1 的磁场峰值为 -0.895 T ;双开口磁环 2 的磁场峰值为 -0.128 T 。与该位置正常磁环磁场值进行对比,双开口磁环 1 约为正常磁环磁场值的 1/4,双开口磁环 2 约为正常磁环磁场值的 1/3,双开口磁环 1 比双开口磁环 2 的磁场值下降严重。双开口磁环的轴向磁场下降严重,主要因为中间的间距拉大导致该位置的磁力线密度急剧下降。虽然双开口磁环 1 保留了原来磁环体积,但是由于同心圆的存在,磁体距离电子束中心比较远,电子束通道位置的磁力线密度较低。而开口磁环 2 体积减少,但是磁体距离电子通道比较近,电子通道位置的磁力线密度较高。因此,双开口磁环 1 比双开口磁环 2 的轴向磁场下降更严重。

以电子通道半径($R=0.25\text{ mm}$)绕磁环中心轴线旋转一周的轴向磁场分布如图 3 所示,在电子通道圆周上,随着角度 θ 的改变,轴向磁场 B_z 基本恒定不变,在开口方向磁场并没有出现减弱。在磁环厚度中心位置,正常磁环的磁场值为 -0.365 T ,双开口磁环 1 的磁场值为 -0.678 T ,双开口磁环 2 的磁场值为 -0.1278 T 。与该位置正常磁环磁场值对比,双开口磁环 1 约为正常磁环磁场值的 1/6,双开口磁环 2 约为正常磁环磁场值的 1/3,同样,双开口磁环

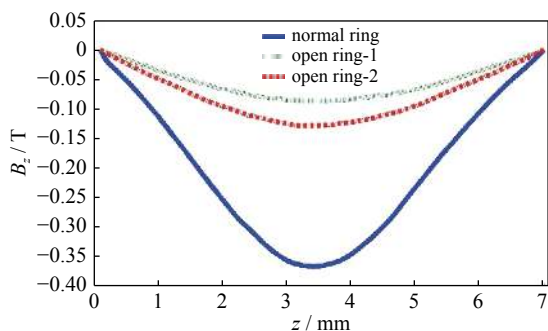


Fig. 2 Single ring central axis magnetic field distribution

图 2 单环中心轴磁场分布

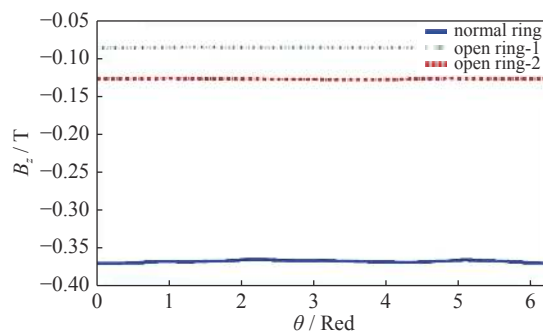


Fig. 3 Axial magnetic field at the position of channel radius

图 3 通道圆周上的轴向磁场分布

1 的磁场值比双开口磁环 2 下降严重。仿真结果表明,虽然双开口磁环不再是中心对称结构,但是在电子通道内部,双开口磁环和正常磁环的磁场分布是相同的,即,双开口磁环也可以产生具有空间对称的磁场,这是进行下一步研究的重要依据。

1.2 周期永磁聚焦系统

将双开口磁环应用到行波管周期永磁聚焦系统中,波端口位置结构如图 4 所示,左端一开口为高频信号的输入/输出窗机构,右端一开口为波导支节匹配调节器,双开口磁环卡在波导两旁,中间为电子通道。除了在信号输入/输出机构位置的磁环均采用双开口磁环,其余位置均采用正常磁环。周期永磁聚焦系统的极靴采用纯铁材料,纯铁含碳元素比较低,延展性比较好,导磁性比较好。双开口磁环一般位于聚焦系统的第二个或者第四个磁环位置,这是因为该位置的轴向磁场有所增强。

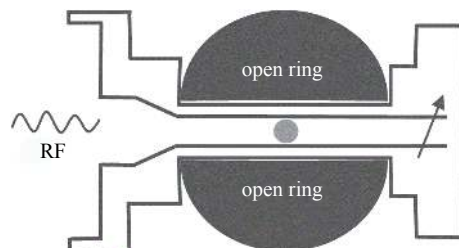


Fig. 4 Wave port position structure

图 4 波端口位置结构

1.2.1 PPM 系统设计原理

电子束从电子枪发射出来,电流密度相当高,电子之间受到相互排斥的作用力而开始发散,此时聚住电子则需要电子束的轴向产生磁场 B_z 才能约束电子束稳定传输。根据电子枪基本工作参数,可以初步展开对周期永磁聚焦系统设计,由式 (1) 可以计算得到布里渊磁场

$$B_B = \frac{8330 \times \sqrt{I}}{r \times \sqrt{U}} \quad (1)$$

式中: B_B 为布里渊磁场的有效值; I 为电子束电流; U 为电子束电压; r 为电子束的平均波动半径。轴向磁场幅度值

$$B_z = (1.5 \sim 1.8) \times \sqrt{2} \times B_B \quad (2)$$

为了电子束能够稳定运动,还需要考虑电子束的等离子体波长 λ , 其计算公式为

$$\lambda = \frac{35.92 \times r \times \sqrt{U^3}}{\sqrt{I}} \quad (3)$$

等离子体波长 λ 与磁场周期 L 之比满足 $\lambda/L > 3$ 。理论上磁场周期越小电子束波动越小,但是需要考虑轴向磁场值,一般取 $\lambda/L=3$, 电子束波动已经足够稳定^[7-9]。

1.2.2 PPM 系统设计与仿真

在 E 波段电子光学系统的设计中,电子束发射电流 83 mA, 电子通道半径 0.25 mm, 电子束电压 16.75 kV, 电子注平均半径取通道半径的一半 (0.13 mm) 比较合理。计算的布里渊磁场有效值为 0.162 2 T, 等离子体波长 23.9 mm, 取 1.5 倍的布里渊磁场, 周期永磁聚焦系统磁场峰值需要大于 0.344 2 T。

设计的周期永磁聚焦系统模型如图 5 所示, 磁场周期 L 为 7.6 mm, 双开口磁环插在第四块磁环处。对比波端口位置为正常磁环的周期磁聚焦系统, 仿真获得的周期永磁聚焦系统中心轴向磁场分布如图 6 所示, 正常的周期永磁聚焦系统轴向磁场幅度值约为 0.45 T。在双开口磁环的位置, 双开口磁环 1 产生的轴向磁场为 0.273 4 T, 双开口磁环 2 产生的轴向磁场为 0.298 5 T。在周期永磁聚焦系统中, 两种双开口磁环的轴向磁场下降严重, 双开口磁环 1 比双开口磁环 2 的轴向磁场下降略严重一些。对比单个磁环的仿真计算与分析, 双开口磁环位置产生的轴向磁场下降趋势有所缓解, 这是因为在周期永磁聚焦系统的偶数个磁场峰值有所增强。

根据布里渊磁场计算, 轴向磁场峰值需要大于 0.344 2 T。为了使双开口磁环产生的轴向磁场峰值达到布里渊磁场设计要求, 需要补偿开口磁环位置处轴向磁场。优化双开口磁环结构参数, 增大了双开口磁环的外径, 从而增大了双开口磁环产生的轴向磁场峰值。补偿后的磁聚焦系统中心轴向磁场分布如图 7 所示, 双开口磁环位置的轴向磁场到达了 0.42 T, 采用 Opera-3D 仿真计算验证了带双开口



Fig. 5 Structure of PPM

图 5 周期永磁聚焦系统结构图

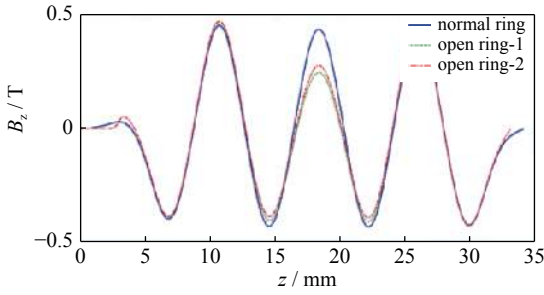


Fig. 6 Magnetic field without compensation

图 6 磁系统中心轴向磁场

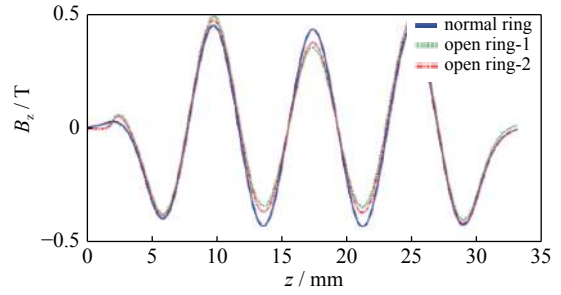


Fig. 7 Magnetic field with compensation

图 7 补偿后的磁系统中心轴向磁场

磁环周期聚焦系统均可以达到符合设计要求。

1.3 电子光学系统

电子枪与周期永磁聚焦系统联合仿真, E波段行波管电子光学系统模型如图 8 所示, 电子枪采用了经典的皮尔斯结构。电子枪发射的电子经过磁屏进入磁聚焦系统。调节由正常磁环构建的 PPM 聚焦系统的位置, 使得聚焦系统和电子束达到匹配状态。然后在波端口位置更换不同的开口磁环, 计算相应的结果。

电子光学系统的电子轨迹仿真结果如图 9 所示, 图(a)为

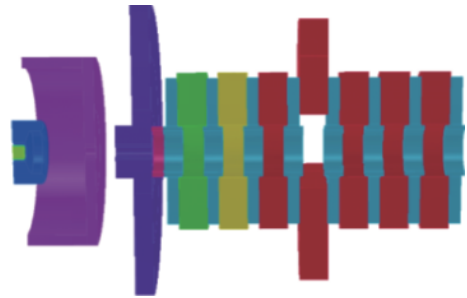


Fig. 8 Model of electronic optical system

图 8 电子光学系统模型

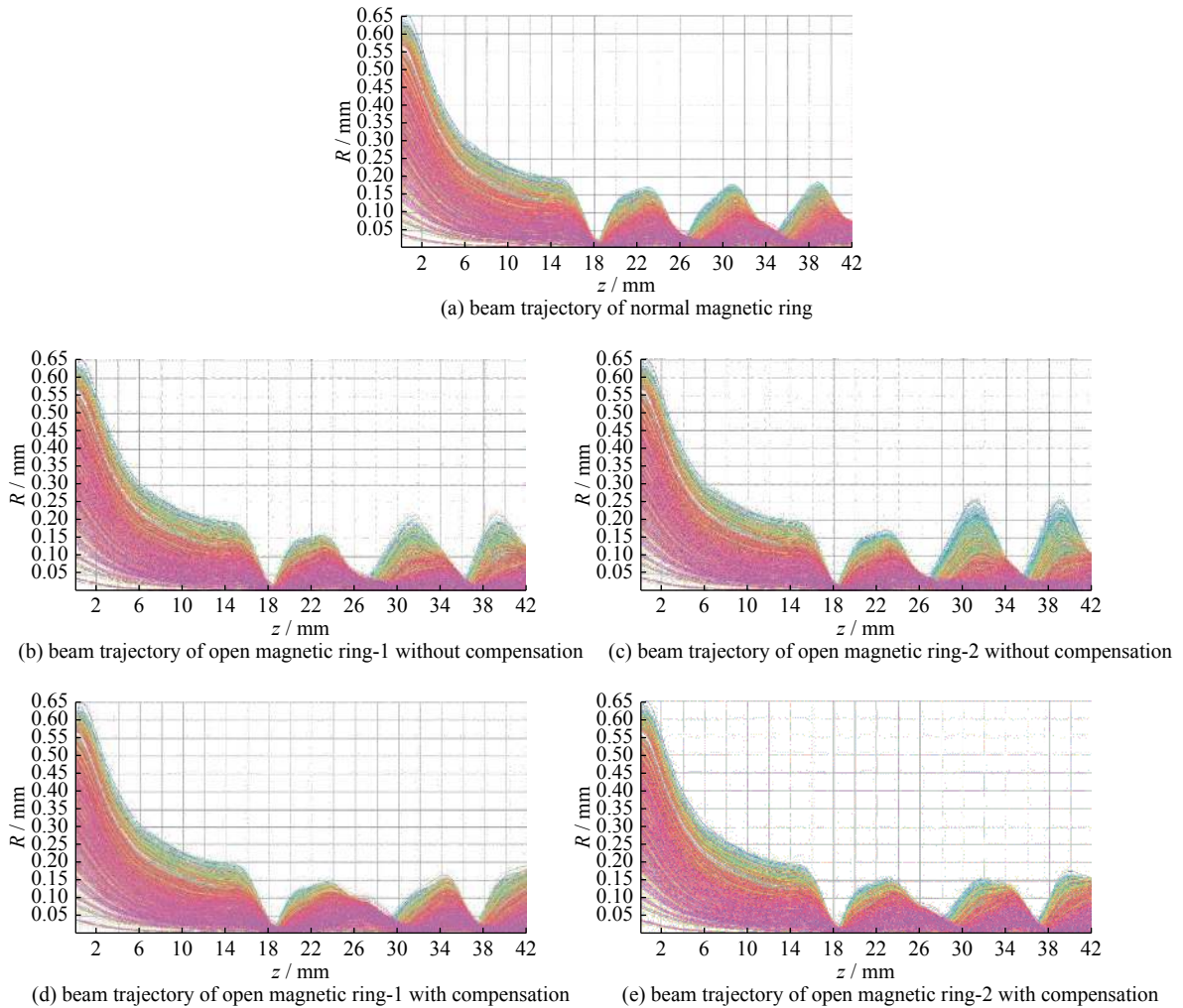


Fig. 9 Beam trajectories

图 9 电子轨迹图

正常磁环磁聚焦系统的电子束轨迹,波动峰值稳定在 0.15 mm;图(b)和图(c)为双开口磁环没有补偿的电子束轨迹,由于该位置的磁场峰值突变,经过双开口磁环位置电子束波动明显变大,波动峰值均大于 0.2 mm;图(d)和图(e)为双开口磁环采取补偿以后的电子束轨迹,电子束的波峰值基本不变,波峰值稳定在 0.15 mm,电子束电流均为 83 mA,流通率 100%。结果表明,双开口磁环位置磁场急剧下降,电子束波动半径增大,导致电子容易打到电子通道壁上,会影响到电子束的流通率^[10]。经过双开口磁环的磁场补偿优化,周期永磁聚焦系统聚焦的电子束波动平均半径较小并且开口磁环产生的轴向磁场对电子束的流通率没有影响。

2 实验测试

双开口磁环的实物如图 10 所示,在 E 波段行波管设计采用了双开口磁环进行实验测试。周期永磁聚焦系统分为两部分:前端的磁场峰值过渡区和后端的磁场峰值恒定区。过渡区磁场峰值为恒定区磁场值的 60%~90%。根据第一块磁环和电子束腰位置决定第一块磁环磁场值,由于第一块磁环磁场值较小,为了避免磁场峰值剧增,实现过渡区磁场峰值缓慢递增,磁场过渡区设置 3 个磁场周期。

调节过渡区磁场,使用高斯计测量中心轴向磁场值。输入/输出波端口位置附近的单个磁环中心轴向磁场测试参数如表 1 和表 2 所示,磁环从电子枪一侧开始进行排列编号,其中 4 号磁环为双开口磁环,其余磁环均采用正常磁环。在周期磁聚焦系统中,磁环中心轴向磁场峰值大小如表 3 和表 4 所示,在输入端的磁环轴向磁场峰值测试中,峰值奇数 1, 3 和 5 号呈现缓慢递增,峰值偶数 2, 4 和 6 号呈现缓慢递增,该区域为磁场的过渡区。

E 波段行波管实物如图 11,输入/出波端的双开口磁环均采用无磁导材料固定。通过贴碎磁块补偿之后,整管

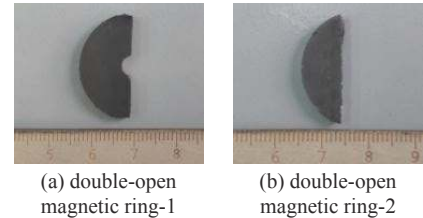


Fig. 10 Open magnetic ring patterns

图 10 开口磁环实物图

表 1 带极靴的单个磁环实验结果

Table 1 Experimental results of single magnetic ring with pole shoes

single magnetic	No.1	No.2	No.3	No.4 (double-open magnetic ring-1)	No.5	No.6	No.7
axial magnetic field, input end/T	0.377 6	0.243 6	0.398 5	0.267 5	0.382 7	0.306 5	0.370 5
axial magnetic field, output end/T	0.361 3	0.341 2	0.406 1	0.296 7	0.402 0	0.288 0	0.398 7

Note: No. 1~3 and 5~7 are normal magnetic rings.

表 2 带极靴的单个磁环实验结果

Table 2 Experimental results of single magnetic ring with pole shoes

magnetic ring	No.1	No.2	No.3	No.4 (double-open magnetic ring-2)	No.5	No.6	No.7
axial magnetic field, input end/T	0.377 6	0.243 6	0.398 5	0.281 4	0.382 7	0.306 5	0.370 5
axial magnetic field, output end/T	0.361 3	0.341 2	0.406 1	0.312 8	0.402 0	0.288 0	0.398 7

Note: No. 1~3 and 5~7 are normal magnetic rings.

表 3 磁系统轴向磁场实验结果

Table 3 Experimental results of axial magnetic field in magnetic system

magnetic ring	No.1	No.2	No.3	No.4 (double-open magnetic ring-1)	No.5	No.6	No.7
axial magnetic field, input end/T	0.350 0	0.380 0	0.358 0	0.384 6	0.373 4	0.396 4	0.412 4
axial magnetic field, output end/T	0.4092	0.4255	0.3812	0.3991	0.3564	0.4212	0.3577

Note: No. 1~3 and 5~7 are normal magnetic rings.

表 4 磁系统轴向磁场实验结果

Table 4 Experimental results of axial magnetic field in magnetic system

magnetic ring	No.1	No.2	No.3	No.4 (double-open magnetic ring-2)	No.5	No.6	No.7
axial magnetic field, input end/T	0.351 6	0.382 8	0.362 3	0.391 3	0.379 4	0.399 1	0.413 8
axial magnetic field, output end/T	0.410 1	0.428 1	0.389 8	0.407 7	0.371 2	0.428 5	0.358 0

Note: No. 1~3 and 5~7 are normal magnetic rings.

在实验测试中,电子枪发射的电流为 83 mA。双开口磁环 1 聚焦的电子束流通率实验结果为:收集极电流为 82.5 mA,电子流通率为 99.5%。双开口磁环 2 聚焦的电子束流通率实验结果为:收集极电流为 82.7 mA,电子流通率为 99.6%。

3 结 论

本文提出了两种双开口磁环结构,并介绍了带开口磁环的行波管磁聚焦系统的设计方法。在电子束通道内,双开口磁环的磁场分布与正常磁环一致。根据行波管周期磁聚焦系统设计规则,采用电磁计算软件 Opera-3D 计算和优化带双开口磁环的周期磁聚焦系统结构。E 波段行波管实验结果为:电子束电流为 83 mA,电子束流通率 99%。实验结果验证了该设计方法的有效性以及双开口磁环应用的可行性。该双开口磁环结构为行波管的周期永磁聚焦系统设计提供了一种参考。

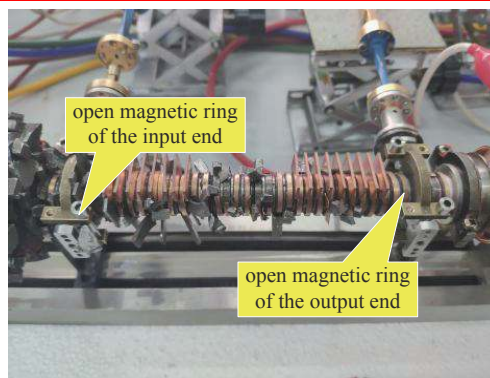


Fig. 11 E-band traveling wave tube

图 11 E 波段行波管的实物图

参考文献:

- [1] 王林梅,甘邠,袁涛,等.行波管周期永磁聚焦系统结构优化设计[J].磁性材料及器件,2012,43(5):35-39.(Wang Linmei, Gan Bin, Yuan Tao, et al. Optimization of periodic permanent magnet focusing system for traveling-wave tubes. *J Magn Mater Devices*, 2012, 43(5): 35-39)
- [2] 鲍际秀.行波管中周期永磁聚焦系统的研究[J].真空电子技术,2005,2(2):20-21.(Bao Jixiu. Study of the periodic focusing system using permanent magnet in traveling wave tubes. *Vacuum Electronics*, 2005, 2(2): 20-21)
- [3] 彭龙,李元勋.带开口磁环的周期永磁聚焦系统的轴向磁场[J].强激光与粒子束,2011,23(9):3552-3555.(Peng Long, Li Yuanxun. Magnetic field along central axis for periodic permanent magnetic focusing system with open magnetic rings. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 3552-3555)
- [4] 彭龙,李元勋.轴向磁化开口磁环在周期永磁聚焦系统中的应用[J].稀有金属材料与工程,2011,40(s2):476-479.(Peng Long, Li Yuanxun. Application of axially magnetized open magnetic ring in periodic permanent magnetic focusing system. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(s2): 476-479)
- [5] Zhang Qiang, Hu Yinfu, Pan Pan, et al. Electron optics design and experiment of G-band TWT[C]//IEEE 9th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies. 2016: 147-148.
- [6] 赵国庆,岳玲娜,王文祥,等.带开口磁环的周期永磁聚焦系统的2维模拟[J].强激光与粒子束,2008,20(1):96-97.(Zhao Guoqing, Yue Lingna, Wang Wenxiang, et al. 2D Simulation of periodic magnetic system with open magnetic rings. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 96-97)
- [7] 宋睿,周泉丰,雷文强,等.0.22 THz折叠波导行波管电子光学系统设计与实验研究[J].强激光与粒子束,2015,27:093101.(Song Rui, Zhou Quanfeng, Lei Wenqiang, et al. Design and experiment of electron optical system for 0.22 THz folded waveguide traveling wave tube. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 093101)
- [8] 蔡竺吟,吕国强,杨蕾,等.行波管周期永磁聚焦系统的设计[J].真空电子技术,2006(2):20-21.(Cai Zhuyin, Lv Guoqiang, Yang Lei, et al. Design of periodic permanent magnetic for traveling-wave tubes. *Vacuum Electronics*, 2006(2): 20-21)
- [9] 吉尔摩著.速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管[M].北京:国防工业出版社,2012.(Gilmour A S. *Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons*. Beijing: National Defense Industry Press, 2012)
- [10] 肖刘,万晓声,刘濮鲲,等.行波管过渡区磁场的研究与设计[J].微波学报,2012(s2):392-395.(Xiao Liu, Wan Xiaosheng, Liu Pukun, et al. Research and design of magnetic field in transition area for traveling-wave tubes. *Journal of Microwaves*, 2012(s2): 392-395)