

短磁聚焦变像管的成像畸变分析与测试

陈家埭¹, 蔡厚智¹, 白雁力^{1,2}, 廖昱博¹, 付文勇¹, 郭泉良¹, 刘进元¹¹深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060;²桂林电子科技大学教学实践部, 广西 桂林 541004

摘要 分别采用单、双透镜系统研制短磁聚焦变像管, 并利用 Lorentz 3D-EM 软件模拟电子运动成像, 研究其成像畸变。当成像比例为 1:1、阴极电压为 -3 kV 时, 模拟得到单、双透镜系统的空间分辨率分别为 17.07 lp/mm 和 24.49 lp/mm; 在离轴 6 mm 处, 单、双透镜系统的成像畸变率分别为 1.43% 和 0.98%; 在离轴为 12 mm 处, 单、双透镜系统的成像畸变率分别为 7.5% 和 2.5%。实验结果表明: 在离轴 6 mm 处, 单、双透镜系统的成像畸变率分别为 2.4% 和 0.9%; 在离轴 12 mm 处, 单、双透镜系统的成像畸变率分别为 8.5% 和 3.2%。研究表明, 采用双磁透镜成像系统有助于改善成像畸变, 提高空间分辨率。

关键词 成像系统; 变像管; 成像畸变; 空间分辨率

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031101

Imaging Distortion Analysis and Testing of Short Magnetic Focusing Image Converter Tube

Chen Jiayu¹, Cai Houzhi¹, Bai Yanli^{1,2}, Liao Yubo¹, Fu Wenyong¹,
Guo Quanliang¹, Liu Jinyuan¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Department of Experiential Practice, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract We use single- and double-lens systems to develop the short magnetic focusing image converter tubes respectively, and simulate the electronic motion imaging to study the imaging distortion by the Lorentz 3D-EM software. When the imaging ratio is 1:1 and the cathode voltage is -3 kV, the spatial resolutions of the single- and double-lens systems are 17.07 lp/mm and 24.49 lp/mm respectively; the imaging distortion rates of single- and double-lens systems are 1.43% and 0.98% at 6 mm off axis respectively; the imaging distortion rates of single- and double-lens systems are 7.5% and 2.5% at 12 mm off axis respectively. Experimental results show that the imaging distortion rates of single- and double-lens systems are 2.4% and 0.9% at 6 mm off axis respectively; the imaging distortion rates of single- and double-lens systems are 8.5% and 3.2% at 12 mm off axis respectively. It is concluded that the double-magnetic-lens imaging system can reduce the imaging distortion and improve the spatial resolution.

Key words imaging systems; image converter tube; imaging distortion; spatial resolution

OCIS codes 110.1758; 040.1490

1 引言

惯性约束核聚变(ICF), 即靶丸聚变, 是一种受控核聚变技术, 不仅是获取新能源的重要途径, 也是

获取核武器理论和实验数据的主要途径^[1-3]。在 ICF 诊断实验中, X 射线分幅相机可有效获取内爆动力学及内爆压缩动态二维空间分布^[4-5]。2012 年, 蔡厚智等^[6]研制了微通道板(MCP)行波选通分

收稿日期: 2017-09-07; **收到修改稿日期:** 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(11305107)

作者简介: 陈家埭(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事磁透镜成像方面的研究。E-mail: 1102255077@qq.com

导师简介: 刘进元(1953—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: lji@szu.edu.cn

幅相机,相机的时间分辨率约为 71 ps、空间分辨率约为 20 lp/mm。2013 年,该课题组研制了大面积行波选通分幅相机,相机的时间分辨率约为 62 ps,空间分辨率约为 18.9 lp/mm^[7]。近年来,美国 General Atomic 公司和劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的研究者通过改变相机结构和工作方式,将电子束时间展宽技术与 MCP 行波选通分幅相机结合,研制了行波选通分幅相机,该相机的时间分辨率约为 5 ps^[8]。美国 LLNL 用于国家点火装置上诊断实验的时间展宽分幅相机 DIXI(Dilation X-ray Imager)的图像压缩比为 3:1,相机的时间分辨率优于 10 ps,空间分辨率优于 300 μm ^[9]。

为了提高分幅相机的空间分辨率,需要对磁聚焦变像管的成像质量以及成像规律进行深入探讨和研究。通过实验发现,阴极的微带结构成像后在不同离轴位置产生的成像畸变程度是不同的。成像的畸变会影响成像质量,对成像畸变的研究有利于研制成像效果较好的分幅相机。1991 年,针对单磁透镜成像系统在离轴位置空间成像畸变较大的问题,Al-Obaidi^[10]利用双磁透镜的方法,实现了成像图片旋转并获得无畸变图片。由于双磁透镜电子光学系统有助于改善像质、提升空间分辨率^[11],且成像场曲较单磁透镜有明显改善^[12],因此本文采用双磁透镜成像系统,通过对成像畸变的模拟和测试,证实双磁透镜成像系统对短磁聚焦分幅变像管有减小成像畸变的作用。

2 软件模拟

2.1 模型介绍

Lorentz 3D-EM 软件是美国 IES(Integrated Engineering Software)公司开发的,该软件可以用于带电粒子在电场、磁场或者两者同时存在的作用场中的粒子束轨迹模拟和分析。利用该软件建立的单、双透镜磁聚焦变像管模拟模型分别如图 1、2 所示。两个模型采用相同的模拟材料,磁透镜的缝隙大小均为 4 mm,磁透镜外壳的纯铁厚度为 5 mm,纯铁的内层材料为铜绕组。双磁透镜两端边缘与阴极、成像面的距离分别为 80 mm 和 70 mm,而单磁透镜位于漂移区的中心位置。电子从阴极位置发射,给阴极施加 -3 kV 的电压;栅网(AM)接地,阴极与 AM 之间的距离为 1 mm,使得电子获得 3 keV 的能量;在磁透镜的聚焦作用下,成像面均在 500 mm 处。为保证成像比例为 1:1,给单透镜系统所施加的电流为 0.36 A。由于双磁透镜仅在少数几

个位置能成较高质量且成像比例为 1:1 的像^[13],双透镜系统中两个透镜所加电流大小均为 0.37 A。

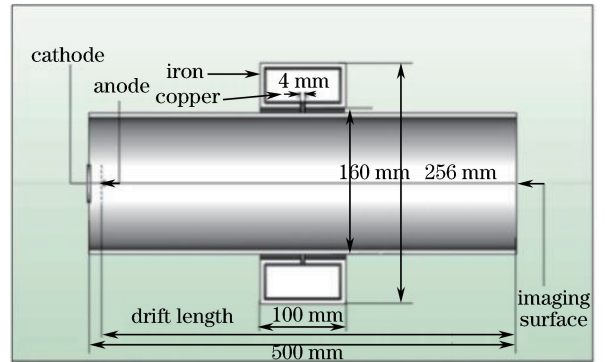


图 1 模拟的单透镜磁聚焦变像管的尺寸图

Fig. 1 Dimensional drawing of simulated single-lens magnetic focusing image converter tube

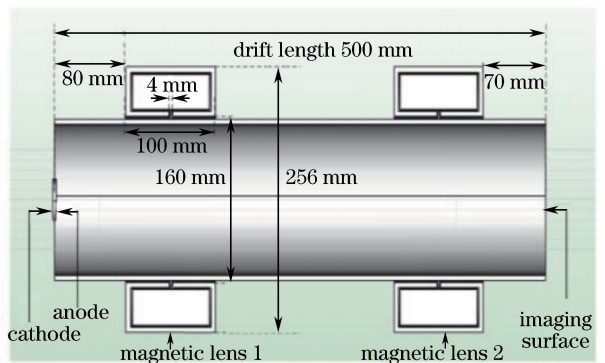


图 2 模拟的双透镜磁聚焦变像管的尺寸图

Fig. 2 Dimensional drawing of simulated double-lens magnetic focusing image converter tube

2.2 模拟结果

2.2.1 空间分辨率

空间分辨率是指像管分辨空间物体最小细节的能力。空间分辨率的计算公式^[14]为

$$T(f) = \exp[-(\pi\rho f)^2], \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, \quad (2)$$

式中 $T(f)$ 为空间调制传递函数(SMTF); f 为空间分辨率,单位为 lp/mm; ρ 为系统均方根半径,单位为 μm ; Δx 、 Δy 分别为成像面上电子落点位置的 x 、 y 坐标与理想成像点的差值。通常情况下,当 SMTF 的强度降到 0.1 时,对应的 f 可以定义为该点的极限空间分辨率^[15-17]。

利用软件获得在离轴距离分别为 6, 8, 10, 12, 14, 16 mm 处的电子坐标,每次发射的电子数为 405。模拟获得的空间分辨率如图 3 所示。在中心位置,双透镜与单透镜成像系统的空间分辨率分别为 24.49 lp/mm 和 17.07 lp/mm;当离轴距离小于

12 mm 时,双透镜成像系统的空间分辨率优于单透镜;当离轴距离大于 12 mm 时,两者的空间分辨率相近。

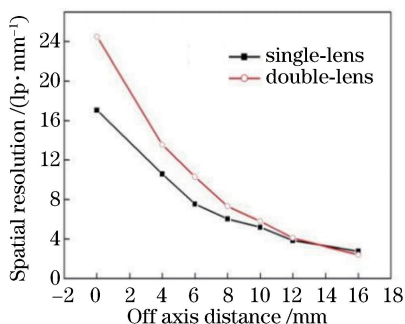


图 3 不同离轴位置的空间分辨率

Fig. 3 Spatial resolution at different off-axis positions

2.2.2 成像畸变

通过模拟获得离轴分别为 6, 8, 10, 12, 14 mm 处电子的落点坐标,图 4、5 分别为在离轴 6 mm 处的单透镜、双透镜成像系统的落点分布图。将落点坐标代入(3)、(4)式中,可以求得落点坐标的平均值分别为(-1.22, 5.96)和(4.99, 3.44)。

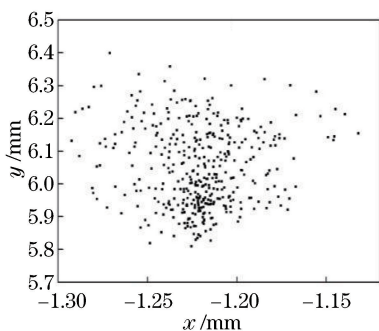


图 4 单透镜系统在 6 mm 处成像的电子落点坐标

Fig. 4 Electron landing coordinate in single-lens system imaging at 6 mm

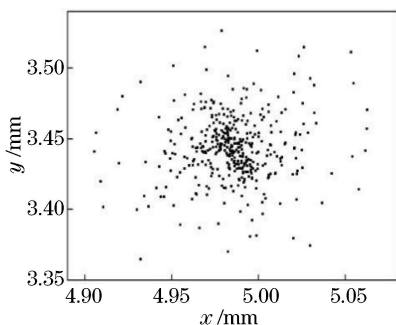


图 5 双透镜系统在 6 mm 处成像的落点坐标

Fig. 5 Electron landing coordinate in double-lens system imaging at 6 mm

进一步计算平均落点坐标与(0,0)的距离,从而

求得成像畸变率为

$$\eta' = [(L - a)/a] \times 100\%, \quad (3)$$

式中 $L = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ 为测得的平均坐标与(0,0)的距离,其中 (x_0, y_0) 为落点中心位置的坐标; a 为电子发射位置的离轴距离。

利用每个电子落点坐标进行计算,分别获得离轴 6, 8, 10, 12, 14 mm 处的畸变程度,如表 1 所示。可以看出,随着离轴距离的增大,畸变也随之增大;双透镜成像系统的成像畸变率比单透镜更小。

表 1 不同离轴位置处的成像畸变率

Table 1 Image distortion rate at different off-axis positions

Type of lens	$\eta' / \%$				
	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	14 mm
Single-lens	1.4	3.4	5.9	7.5	8.6
Double-lens	1.0	1.5	1.8	2.5	4.2

3 实验结果

3.1 实验装置介绍

实验装置包括普通紫外光源(UV)、光电阴极(PC)、AM、磁透镜、MCP、漂移管、成像屏(PS)以及图像传感器(CCD)。

图 6 为双磁透镜系统,普通紫外光照射在镀金的 PC 上,激发 PC 产生电子,电子在阴极与 AW 间被加速,经过漂移区被磁透镜 1、2 聚焦并成像于荧光屏,最后利用 CCD 采集图像。

实验条件为:在 PC 上施加-3 kV 的电压,AW 接地,在磁透镜上施加合适的成像电流,给 MCP 施加-700 V 的电压,给荧光屏施加 3400 V 的电压。

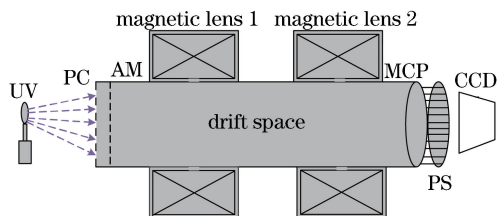


图 6 磁聚焦变像管的基本结构

Fig. 6 Basic structure of magnetic focusing image converter tube

3.2 实验结果分析

3.2.1 磁场的测量

保证成像比例均为 1:1,单透镜成像系统所加电流为 0.311 A,双透镜成像系统两个透镜所加的电流均为 0.292 A。利用高斯计对实验装置从真空管中心位置 0~500 mm 处的磁感应强度进行测量,并将测量结果与模拟结果进行对比,如图 7、8 所示。

单透镜系统模拟得到的磁感应强度约为 0.0040 T, 实验测得的磁感应强度约为 0.0038 T; 双透镜系统模拟得到的磁感应强度约为 0.0040 T, 实验测得的磁感应强度约为 0.0036 T; 模拟的磁场在中心位置的磁感应强度比实验值大, 其他位置都可以相对拟合对应。

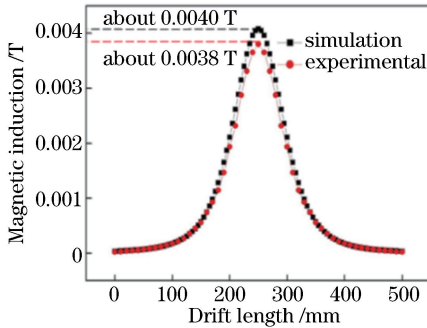


图 7 单透镜系统成像磁场的模拟与实验结果

Fig. 7 Simulation and experimental results of imaging magnetic field in single-lens system

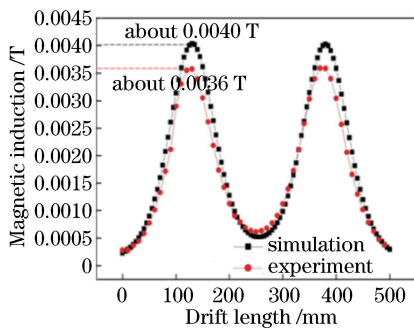


图 8 双透镜系统成像磁场的模拟与实验结果

Fig. 8 Simulation and experimental results of imaging magnetic field in double-lens system

3.2.2 畸变的测量与计算

为了更直观地看出实验装置的空间分辨率, 将阴极做成网格状, 如图 9 所示。图 9 是对单透镜系统以及双透镜系统分别成像后的结果, 其中图 9(a) 为单透镜系统的成像结果, 图 9(b) 为双透镜系统的成像结果。利用 Matlab 软件得到像素坐标, 图中每个格子的边长均为 2 mm。根据两点之间的距离, 计算得出离轴 6, 8, 10, 12 mm 处红箭头的长度, 以中心位置处的红线箭头为标准, 通过(3)式求得各个离轴位置的畸变率。

由图 9 可知, 在不同的离轴位置, 双磁透镜系统成像后的方格大小以及形状的变化没有单透镜明显。图 10 为单、双透镜系统的成像畸变率, 可以看出, 随着离轴距离的增大, 单、双透镜系统成像的畸变都增大。在离轴 6 mm 处, 实验测量获得单、双透

镜系统的成像畸变率分别为 2.4% 和 0.9%; 在离轴 12 mm 处, 单、双透镜系统的成像畸变率分别为 8.5% 和 3.2%。由模拟结果和实验结果都可以看出, 双透镜的成像畸变率比单透镜小。

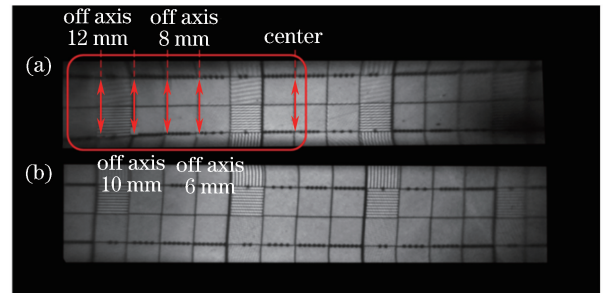


图 9 (a)单透镜和(b)双透镜系统的成像结果

Fig. 9 Imaging results of (a) single-lens and (b) double-lens systems

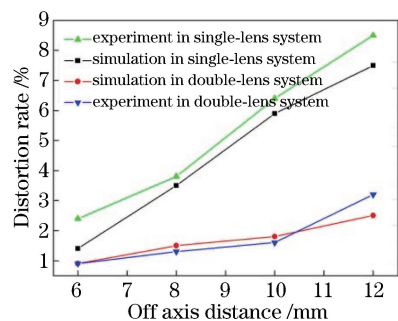


图 10 单透镜、双透镜系统的成像畸变率

Fig. 10 Image distortion rates of single-lens and double-lens systems

4 结 论

研究了短磁聚焦变像管的成像畸变。通过模拟计算空间分辨率, 以获取合适的成像; 利用软件模拟, 获取不同离轴位置处电子的落点坐标, 计算得到不同离轴位置处的畸变率, 并将其与实验测量结果进行比较。分析了双透镜与单透镜成像系统的成像畸变, 可以得出: 在成像比例为 1:1 的条件下, 成像畸变随着离轴距离的增大而增大; 双透镜成像系统比单透镜成像系统的成像畸变小; 双透镜成像系统的研制有助于改善短磁聚焦变像管的成像畸变。

参 考 文 献

- [1] Glenzer S H, Macgowan B J, Michel P, *et al.* Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies[J]. Science, 2010, 327 (5970): 1228-1231.
- [2] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, *et al.*

- Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 343-348.
- [3] Ze F, Kauffman R L, Kilkenny J D, *et al.* A new multichannel soft X-ray framing camera for fusion experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 5124-5126.
- [4] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.* Note: Non-gain microchannel plate gated framing camera[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(5): 056102.
- [5] Xiong G, Hu Z M, Li H, *et al.* One-dimensional space resolving flat-field holographic grating soft X-ray framing camera spectrograph for laser plasma diagnostics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(4): 043109.
- [6] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.* Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0117001.
蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. 宽微带 X 射线分幅相机的研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0117001.
- [7] Cai H Z, Long J H, Liu J Y, *et al.* Investigation of large-format microchannel plate gated X-ray framing camera[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Technology*, 2013, 30(1): 30-34.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 大面积 MCP 选通 X 射线分幅相机的研制[J]. *深圳大学学报理工版*, 2013, 30(1): 30-34.
- [8] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J, *et al.* Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [9] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, *et al.* Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10E116.
- [10] Naser B A. Design of free-distortion and rotation magnetic lens[J]. *Journal of Babylon University/ Pure and Applied Sciences*, 2014, 22(9): 2525-2529.
- [11] Bai Y L, Long J H, Cai H Z, *et al.* Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 013201.
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 013201.
- [12] Liao Y B, Liu J Y, Cai H Z, *et al.* Improvement of field curvature in magnetic-focusing image converter tube[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1004004.
廖昱博, 刘进元, 蔡厚智, 等. 磁聚焦变像管像场弯曲的改善研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1004004.
- [13] Liao Y B, Long J H, Cai H Z, *et al.* Imaging evaluation of magnetic double-lens framing tube under the same excitation[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2016, 33(6): 593-598.
廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 相同激励下双磁透镜分幅变像管的成像研究[J]. *深圳大学学报理工版*, 2016, 33(6): 593-598.
- [14] Du B C, Wang J R. *Electronoptics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 91.
杜秉初, 汪健如. *电子光学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 91.
- [15] Liao Y B, Long J H, Cai H Z, *et al.* Numerically simulated static spatial resolution of framing image converter using magnetic focusing via Matlab[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 012301.
廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 磁聚焦分幅变像管静态空间分辨率的 Matlab 模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 012301.
- [16] Bai Y L, Long J H, Cai H Z, *et al.* Simulated and measured spatial resolution of framing converter using short magnetic focusing [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2015, 32(2): 178-182.
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 短磁聚焦分幅变像管空间分辨率的模拟与测试[J]. *深圳大学学报理工版*, 2015, 32(2): 178-182.
- [17] Chen J Y, Long J H, Cai H Z, *et al.* Numerical calculation and experimental study on the image rotation angle of image converter tube using magnetic focusing[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2017, 34(3): 278-283.
陈家堉, 龙井华, 蔡厚智, 等. 磁聚焦变像管像转角的数值计算与实验研究[J]. *深圳大学学报理工版*, 2017, 34(3): 278-283.