

短磁聚焦时间展宽分幅变像管成像性能及像差分析

白雁力, 姚荣彬, 高海英, 党选举, 何国民

桂林电子科技大学教学实践部, 广西 桂林 541004

摘要 分幅变像管是惯性约束聚变诊断实验中重要的二维空间分辨诊断设备。为研究短磁聚焦时间展宽分幅变像管的成像性能,通过计算像管中电子运动轨迹和成像分布来模拟空间分辨率和成像面,并采用像差理论展开分析。结果表明,短磁聚焦成像系统的球差和场曲是造成像管空间分辨性能下降的主要因素,单/双透镜像管球差系数分别为 0.229 和 0.07,场曲分别为 0.021 和 0.009。球差系数和场曲越小,像管的成像性能越好。

关键词 超快光学; 惯性约束聚变; 分幅变像管; 时间展宽技术; 短磁聚焦; 像差; 空间分辨性能

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0332001

Analysis of Imaging Performance and Aberration of Pulse-Dilation Framing Converter Using Short Magnetic Focusing

Bai Yanli, Yao Rongbin, Gao Haiying, Dang Xuanju, He Guomin

Department of Education Practice, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract The framing converter is an important two-dimensional spatial resolution diagnostic device in the inertial confinement fusion experiment. In order to study the imaging performance of pulse-dilation framing converter using short magnetic focusing, the spatial resolution and imaging surface are simulated by the electron motion trajectory and imaging distribution of the converter, and the aberration theory is used for analysis. The result shows that the spherical aberration and field curvature of short magnetic focused system are the main reasons for the loss of spatial resolution, the spherical aberration of the single/double lenses tube are 0.229 and 0.07, the field curvature are 0.021 and 0.009, respectively. The smaller spherical aberration and field curvature are, the better imaging performance of the tube is.

Key words ultrafast optics; inertial confinement fusion; framing converter; pulse-dilation technology; short magnetic focusing; aberration; spatial resolution performance

OCIS codes 320.7080; 230.0250; 320.7160

1 引 言

X 射线分幅相机是具有皮秒时间分辨和微米量级空间分辨能力的超快诊断设备,在惯性约束聚变(ICF)实验中,X 射线分幅相机不仅能对聚变燃烧阶段的持续时间进行有效测量,而且还能获取内爆压缩动态图像的二维空间分布^[1-2]。目前,微通道板(MCP)行波选通分幅相机的时间分辨率为 60~100 ps^[3-5],为进一步提升相机的时间分辨性能,研究者将电子束时间展宽技术、均匀磁场成像技术和 MCP 行波选通分幅相机相结合,研制出时间展宽分幅相机^[6-8],在成像比例为 3:1 时,相机

时空分辨率可分别优于 10 ps 和 300 μm 。在此基础上,国内研究者研制了短磁聚焦时间展宽分幅变像管^[9-12],在成像比例为 1:1 时,像管轴上空间分辨率可优于 100 μm ,但由于受到短磁透镜产生的轴对称磁场影响,像管离轴位置空间分辨性能与轴上位置不一致,因此制约了大探测面积时间展宽分幅变像管的发展。

本文以短磁聚焦时间展宽分幅变像管为对象,借助 Lorentz-3EM 软件,通过追踪像管内电子轨迹和统计像管成像分布,模拟像管空间分辨率和成像面,并结合像差的球差和场曲理论,研究和分析短磁聚焦时间展宽分幅变像管的成像性能。

收稿日期: 2017-09-08; **收到修改稿日期:** 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61263013)、广西自然科学基金重点项目(2016GXNSFDA380001)、广西高校中青年骨干教师基础能力提升项目(2017KY0199)、广西教育厅高校科学技术研究项目(YB2014131)

作者简介: 白雁力(1979—),男,博士,副教授,主要从事超快诊断技术方面的研究。E-mail: bayaly@guet.edu.cn

2 磁透镜像差

磁透镜和光学透镜相似,如果运动电子不满足近轴条件,那么实际成像与理想成像就会出现差异,即磁透镜存在像差。像差主要包括球差、场曲、彗差和畸变等,其中畸变不影响成像清晰度,只造成图像形状失真^[13];而彗差是一种轴外像差,与球差同时存在,并随成像系统孔径和视场增加而变大。通常在孔径和视场较小的系统中,只有消去球差后,彗差才能明显被观察到^[14-15],而对孔径和视场较大的自由曲面成像性能的影响相对较大^[16]。由于短磁聚焦时间展宽分幅变像管成像系统孔径和视场相对较小,且球差并不能完全消除,因此,实验仅从球差和场曲两方面研究系统成像性能。

2.1 球差^[14-15]

球差即球面像差,是磁透镜最重要的几何像差之一,它决定磁透镜的分辨能力。在磁透镜中,球差是由透镜中近轴区域与远轴区域对电子束的作用力不同而产生的。球差的形成如图 1 所示,由物面轴上一点 O 发射出的近轴和远轴电子经过磁透镜聚焦后分别聚焦在像平面 1 和像平面 2(即高斯像面)上,由于近远轴电子聚焦的轴上距离不同,所以点 O 在像平面 2 上的成像不再是一个像点,而是一个模糊的圆斑(或称为“弥散斑”)。从图 1 中可以看到,在近远轴电子聚焦的轴向距离内,存在一个最小“弥散斑”,此时图像最清晰。“弥散斑”尺寸越小,表示磁透镜的像差越小、分辨能力越好。

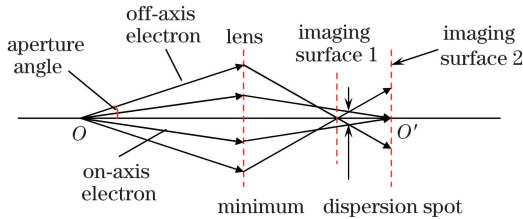


图 1 球差原理图

Fig. 1 Schematic of spherical aberration

单磁透镜的球差系数 C_s 为:

$$C_s = 140 \frac{V_r}{(NI)^2} f_0, \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{8mV_r}{e \int_{z_1}^{z_2} B^2(z) dz}, \quad (2)$$

式中 f_0 为磁透镜的焦距, V_r 为电子加速电压, N 为磁透镜线圈匝数, I 为线圈加载的激励电流, $B(z)$ 为轴上磁场强度, z 为轴向距离, m 和 e 分别为电子的质量和电荷量。球差系数随磁透镜激励的增大而逐

渐减小。根据谢尔赫原理^[14],由于磁饱和限制,球差并不能完全消除。

根据上述单透镜球差计算方法,结合组合透镜等效焦距公式,双磁透镜球差系数如(3)~(5)式所示^[15]:

$$C_s = \left[\frac{C_{s1} f_2^2}{f_1} + \frac{C_{s2} (d - f_1)^2}{f_2} \right] f_c / q^2, \quad (3)$$

$$q = d - f_1 - f_2, \quad (4)$$

$$f_c = \frac{f_1 f_2}{q}, \quad (5)$$

式中 C_{s1} 和 C_{s2} 分别为两个透镜的球差系数, f_c 为组合透镜的等效焦距, f_1 和 f_2 分别为两个透镜的焦距, d 为两个透镜的间距。

2.2 场曲

场曲^[14-15]指像场弯曲,是由物平面上各离轴位置发出的电子受到的磁场作用力不同引起的,由于轴对称磁场具有离轴越远磁场越强的特点,所以离轴远的电子,成像点离高斯像平面远;反之近,于是形成一弯曲像平面,其形成原理如图 2 所示。像面曲率 K 的计算为:

$$K = \frac{|u''(z)|}{[1 + u'(z)^2]^{3/2}}, \quad (6)$$

式中 $u(z)$ 为成像面方程, $u'(z)$ 和 $u''(z)$ 分别在成像面方程的一阶和二阶导数。

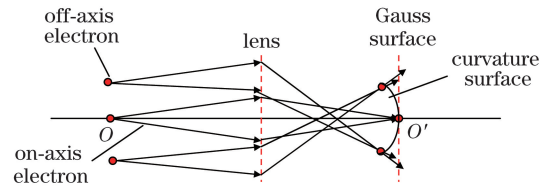


图 2 场曲原理图

Fig. 2 Schematic of field curvature

3 短磁聚焦分幅变像管模型

在 Lorentz-3EM 软件中建立的单/双透镜时间展宽分幅像管模型如图 3 所示,像管模型主要由阴极、栅网、磁透镜、漂移区和成像面组成,其中磁透镜的外径、内径、轴向宽度和缝隙宽度分别为 256, 160, 100, 4 mm;阴极和栅极电压分别为 -3 kV, 0 V,阴栅间距和漂移距离分别为 1,500 mm,为保证像管 1:1 的成像比例,将安匝数为 479 AN 的单透镜放置于像管漂移区中间;将安匝数为 713 AN 的两个透镜分别放置于像管漂移区两端。像管轴上磁场分布如图 3(c) 所示,单/双透镜像管轴上最大磁场强度 B 分别约为 4.2×10^{-3} T 和 6.5×10^{-3} T。

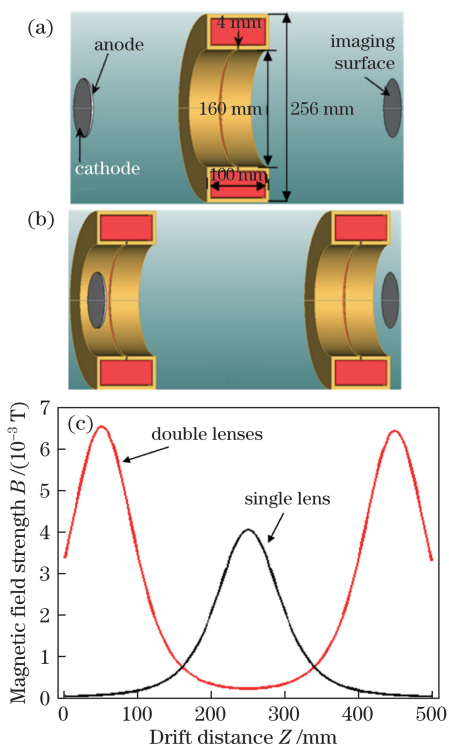


图 3 (a)单透镜像管模型；(b)双透镜像管模型；
(c)轴上磁场强度

Fig. 3 (a) Tube model of single lens; (b) tube model of double lenses; (c) magnetic field strength on axis

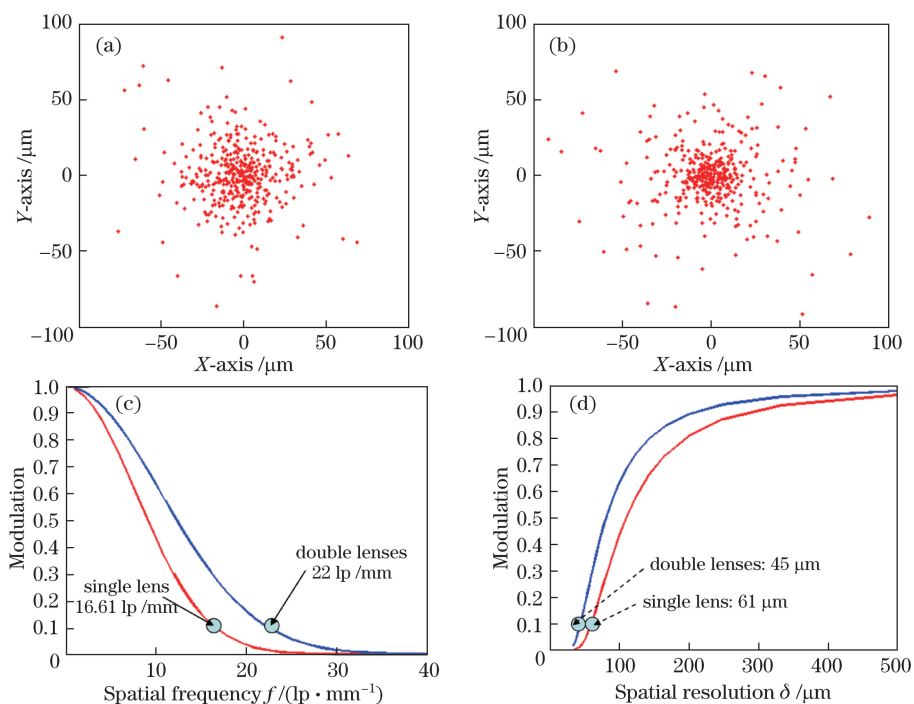


图 4 空间分辨率模拟结果。(a)单透镜像管轴上电子成像分布；(b)双透镜像管轴上电子成像分布；
(c)调制传递函数曲线；(d)调制度与空间分辨率的关系

Fig. 4 Simulation results of spatial resolution. (a) Distribution of electronic imaging on the axis of the single lens tube; (b) distribution of electronic imaging on the axis of the double lenses tube; (c) MTF curves; (d) relationship between modulation and spatial resolution

4 成像性能模拟与分析结果

实验从空间分辨率和成像面两方面对像管成像性能展开分析,单/双透镜像管阴极轴上发射点在像面上的成像分布分别如图 4(a)和(b)所示,采用文献[9]的方法,得到像管调制传递函数(MTF)曲线如图 4(c)所示,在调制度为 0.1 时,单/双透镜像管的空间频率 f 分别约为 16.61 lp/mm 和 22 lp/mm;根据空间频率 f 与空间分辨率 δ 的关系: $\delta = 1/f \times 10^3$,得到空间分辨率与调制度曲线如图 4(d)所示,当调制度为 0.1 时,单/双透镜像管的空间分辨率分别约为 61 μm 和 45 μm 。

从单/双透镜像管阴极离轴 0~20 mm 处分别发射若干个电子,各发射点电子轨迹在 YZ 平面上的投影如图 5 所示,以轴上点(0 mm)的最优成像位置 500 mm 为基准,单透镜阴极离轴 5, 10, 15, 20 mm 发射点的最优成像位置分别位于漂移区中的 498, 497, 489, 475 mm, 而双透镜像管则分别为 499, 498, 495, 492 mm。根据图 5(a)和(c)中发射电子的离轴距离与其最优成像位置之间的关系,通过曲线拟合,得到单/双透镜像管的成像面在 YZ 平面上的投影如图 5(b)和(d)所示。

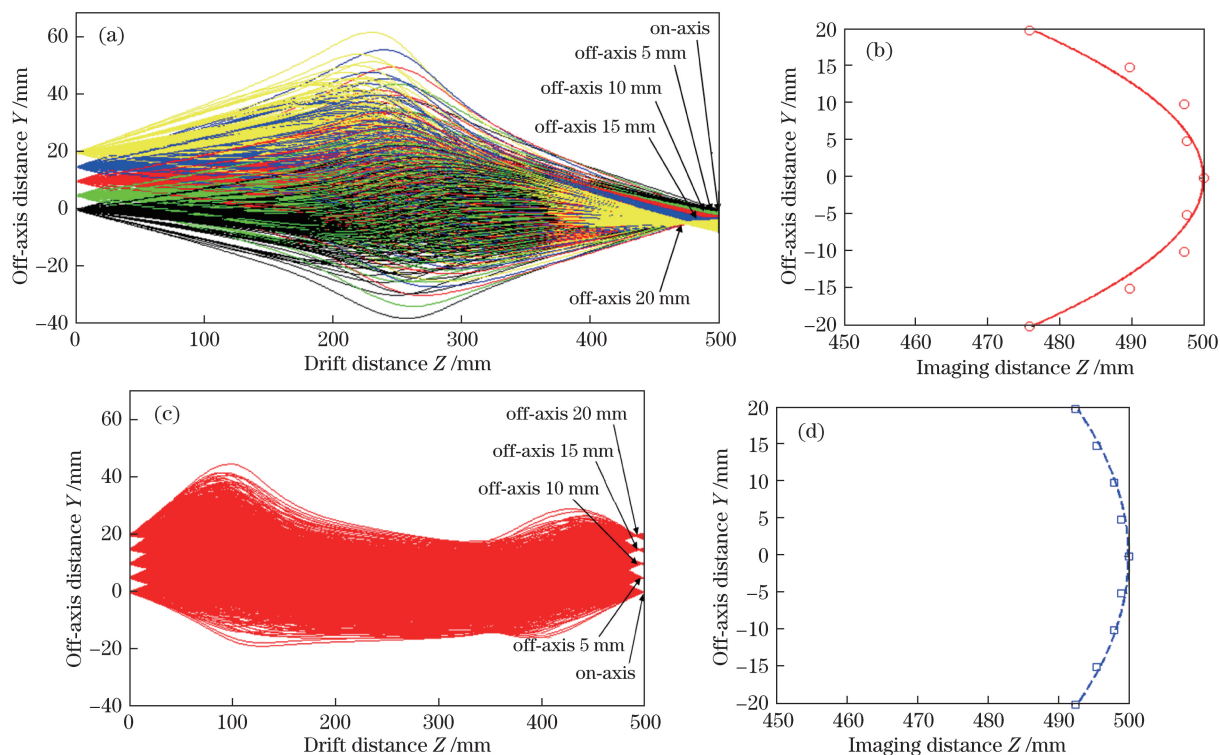


图 5 成像面模拟结果。(a)单透镜电子轨迹投影;(b)单透镜成像面拟合曲线;
(c)双透镜电子轨迹投影;(d)双透镜成像面拟合曲线

Fig. 5 Simulation results of imaging surface. (a) Electron trajectory projection of single lens;
(b) fitting curve of single lens imaging surface; (c) electron trajectory projection of double lenses;
(d) fitting curve of double lenses imaging surface

模拟结果显示,双透镜像管不仅轴上空间分辨率优于单透镜像管,而且成像面较单透镜更接近于平面。根据磁透镜的球差和场曲理论,当单/双透镜激励分别为 479 AN 和 713 AN,阴极电压为 -3 kV 和漂移距离为 500 mm 时,采用(1)~(5)式得到单/双透镜像管的球差系数分别为 0.229 和 0.07;采用(6)式计算图 5(b)和(d),得到单/双透镜像管的场曲分别为 0.021 和 0.009。综合模拟结果、球差和曲率分析发现,双透镜像管的成像性能优于单透镜像管。

5 结 论

采用 Lorentz-3EM 软件建立短磁聚焦时间展宽分幅变像管模型,模拟了单/双透镜像管空间分辨率和成像面,并采用像差理论分析了像管的成像性能。模拟和分析结果显示,双透镜像管空间分辨性能优于单透镜,单/双透镜像管球差系数分别为 0.229 和 0.07,场曲分别为 0.021 和 0.009。因此,轴对称磁场成像系统的球差和场曲是引起像管空间分辨性能损失的重要因素,球差系数和场曲越小,像管成像性能越好。成像性能的分析研究结果对高空间

分辨和大探测面积短磁聚焦时间展宽分幅变像管的结构设计具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Oertel J A, Aragonez R, Archuleta T, *et al.* Gated X-ray detector for the National Ignition Facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 10E308.
- [2] Bell P M, Bradley D K, Kilkenny J D, *et al.* Radiation hardening of gated X-ray imagers for the National Ignition Facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E540.
- [3] 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.
- [4] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.* Large-format microchannel plate gated framing camera[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2012, 677: 14-17.
- [5] 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.
- [6] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, *et al.*

- Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [7] 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.
- [8] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, *et al.* Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- [9] 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.
- [10] Bai Y L, Long J H, Liu J Y, *et al.* Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12): 124103.
- [11] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, *et al.* Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 016101.
- [12] Lei Y F, Long J H, Liu J Y, *et al.* Design of framing image tube with large detection area[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904009.
雷云飞, 龙井华, 刘进元, 等. 大探测面积分幅变像管设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904009.
- [13] Hao Y D, Yuan Y T, Miao W Y. Effect of image distortion of X-ray streak camera in fluid instability experiment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1503-1507.
郝铁聃, 袁永腾, 缪文勇. 流体不稳定性实验中条纹相机像场畸变的影响[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1503-1507.
- [14] Shao J Z. Principle of electronic ion optical instrument[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1989.
邵健中. 电子离子光学仪器原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
- [15] Zhao G J. Electron Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
赵国骏. 电子光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [16] Shi H D, Jiang H L, Zhang X, *et al.* Research on freeform optical system aberration characteristic based on vector aberration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1208003.
史浩东, 姜会林, 张新, 等. 基于矢量像差的自由曲面光学系统像差特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1208003.