

## 双磁透镜与单磁透镜分幅变像管空间分辨特性的比较

廖昱博<sup>1,2</sup>, 龙井华<sup>3</sup>, 蔡厚智<sup>1</sup>, 雷云飞<sup>1</sup>, 刘进元<sup>1</sup>

- (1. 深圳大学 光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060;
2. 赣南师范大学 物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000;
3. 深圳大学 物理科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

**摘要:** 基于时间展宽技术, 设计研制了大面积阴极分幅变像管。借助 Matlab 编程分别对单磁透镜和双磁透镜像管在离轴空间分辨率和像场畸变等方面特征作了数值模拟, 并采用阴极微带光刻分辨率板进行测试验证。实验测试显示, 在缩小一倍成像下, 双透镜像管在离轴 9 mm 以内的空间分辨率优于 5 lp/mm。相比单透镜像管, 双透镜像管具有更高的空间分辨率, 更大的有效成像范围以及更小的成像畸变。因而, 采用双透镜成像能够有效地提高像管的空间分辨能力, 可为分幅相机性能的进一步提升提供新的思路。

**关键词:** 分幅变像管; 时间展宽技术; 空间性能; 短磁聚焦; Matlab 模拟

**中图分类号:** TN143; TN16 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0520002

## Spatial resolution performance comparison of magnetic double-lens and single-lens framing tubes

Liao Yubo<sup>1,2</sup>, Long Jinghua<sup>3</sup>, Cai Houzhi<sup>1</sup>, Lei Yunfei<sup>1</sup>, Liu Jinyuan<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. School of Physics and Electronic Information Science, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China;
3. College of Physics Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** A large cathode framing tube was designed and developed based on the pulse-dilation technique. By virtue of Matlab programming, the spatial resolution of off-axis positions and the imaging distortion for magnetic double-lens and single-lens imaging were numerically simulated respectively. Resolution plates photoetched on the cathode micro-stripe were adopted to test the spatial performance of the tube. The experimental results show that at an imaging magnification of 2:1, the spatial resolution of the positions within 9 mm from the centre is higher than 5 lp/mm. Compared to magnetic single-lens imaging, the magnetic double-lens tube possesses a higher spatial resolution, a wider imaging range and a lower distortion, which provides a new way to improve the spatial resolving power of framing image converter tube.

**Key words:** framing tube; pulse-dilation technique; spatial performance; short magnetic focusing; Matlab simulation

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(11305107)

作者简介: 廖昱博(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事超快诊断方面的研究。Email: bobocome@126.com

导师简介: 龙井华(1972-), 女, 助理教授, 博士, 主要从事超快诊断方面的研究。Email: jhlong@szu.edu.cn

## 0 引言

激光惯性约束核聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 是实现受控核聚变的一种途径。其利用高功率激光作为驱动器均匀照射微球靶丸表面, 产生高温等离子体而向外蒸发。受反冲力作用, 靶丸球壳向靶心压缩形成高温高密度热斑, 达到点火条件, 进而触发高效释放聚变能的微型热核爆炸<sup>[1]</sup>。通过测量 ICF 中释放的 X 射线的时空分布, 人们可以获得爆聚的基本信息和特征参数。因此, 应用并发展各种先进的等离子体诊断技术是 ICF 研究中十分重要的组成部分。

典型的 ICF 过程持续时间很短, 大约在几百皮秒至数纳秒之间, 涉及的空间尺度仅为数十微米左右<sup>[2-3]</sup>。这就要求诊断工具必须兼备较高的时间分辨和空间分辨能力。X 射线分幅相机利用变像管来实现图像的光电转换、脉冲选通以及图像增强, 是研究亚纳秒时间范围内瞬变现象的主要工具<sup>[4]</sup>。其利用微通道板 (MCP) 上的微带来传输电压脉冲, 从而充当电子快门, 曝光时间可达 ~100 ps, 空间分辨率可达 ~50  $\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>。通过减小 MCP 厚度, 还可将曝光时间进一步缩短至 35 ps<sup>[6]</sup>, 但薄 MCP 信噪比差, 很大程度上限制了其应用。近些年来, 美国利弗莫尔国家实验室 Hilsabeck 等<sup>[7-8]</sup> 又将时间展宽技术 (Pulse-dilation technique) 和 MCP 行波选通技术相结合, 成功研制出了时间展宽分幅相机。在时间展宽分幅像管中, 光阴极与 MCP 之间间隔以长达 500 mm 的漂移区。当 X 光脉冲照射到阴极上, 激发的光电子束在加载于光阴极上的斜坡电压脉冲的作用下产生速度梯度, 即使得早些时候产生的光电子比晚些时候产生的光电子具有更大的速度。因而经过漂移区后, 光电子束在时间上被展宽, 并通过长磁透镜将其成像在 MCP 微带上, 在快门脉冲的选通作用下, 时间分辨率可达 5 ps<sup>[7]</sup>。然而, 其空间分辨能力并不理想, 动态空间分辨率仅为 ~300  $\mu\text{m}$ 。该研究小组通过改进磁透镜结构, 设计研制了短磁聚焦时间展宽分幅相机, 经测试, 时间分辨率为 11 ps, 动态空间分辨率优于 100  $\mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>。但比之于传统的分幅相机, 其空间分辨能力仍有待提高。

文中引入双磁透镜设计分幅像管, 通过对双磁

透镜与单磁透镜分幅像管的静态空间分辨特性的数值模拟、分析比较以及实验测试, 旨在为进一步提升分幅相机空间分辨能力提供重要依据。

## 1 像管模型与模拟方法

文中模拟的分幅像管结构包含光阴极、栅网、短磁透镜、漂移管以及理想成像屏。光阴极加 -3 kV 电压, 栅网接地, 阴栅加速区区长 1 mm。短磁透镜是线圈密绕于铝芯, 外覆软铁屏蔽罩的结构。线圈匝数  $N$  为 1 320, 磁透镜宽 100 mm, 平均直径  $D$  为 208 mm, 内壳上开有 4 mm 环形空气缝隙。漂移区管长  $L$  为 500 mm, 理想成像屏置于漂移管末端。结合实际测试条件, 将模拟的成像倍率设定为 2:1, 即缩小一倍成像。

采用空间直角坐标系描述, 坐标原点定于漂移管中心。阴栅间加速场近似匀强电场处理。磁场分布的计算, 当磁透镜缝隙较小时, 轴上磁感应强度分布为<sup>[10]</sup>:

$$B=1.32\mu_0 N I \text{sech}^2(2.63z/D)/D \quad (1)$$

式中:  $z$  为轴上点的坐标;  $I$  为磁透镜激励电流;  $D$  为磁透镜平均直径;  $\mu_0$  为真空中的磁导率。由此, 再根据磁场的幂级数展开式, 进而可得空间中任意一点的磁场分布<sup>[11]</sup>。采用电子轨迹追迹方法计算静态空间分辨率。分别从阴极中心、离轴 9、12、18 和 24 mm 等处随机抽样发射 400 个电子。其初能量遵从 0~1 eV 上的  $\beta(1, 4)$  分布; 发射角遵从  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内的余弦分布; 方位角遵从  $0^\circ \sim 360^\circ$  内的均匀分布。从电子运动微分方程出发, 采用龙格-库塔四阶公式计算电子轨迹, 时间步长设定为 0.5 ps。最后统计像面上落点分布, 得到相对于理想像点的弥散斑方均半径  $\overline{\Delta r}$  (单位: mm), 由调制传递函数求得空间分辨率  $f^{[12]}$  (Modulation Transfer Function, MTF):

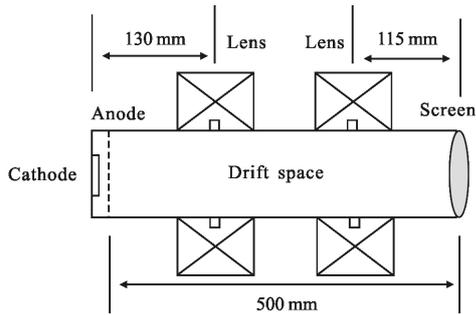
$$\text{MTF}=\exp[-(\pi\overline{\Delta r}f)^2] \quad (2)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 像管静态空间分辨特性的模拟结果与分析

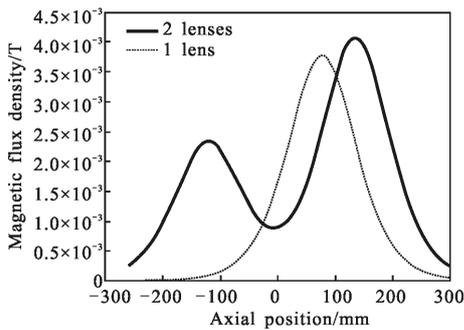
反复调整磁透镜位置和激励条件, 经数值模拟, 确定 2:1 最佳成像时单透镜中心距离理想成像面 173 mm, 双透镜位置如图 1(a) 所示。单透镜成像激励条件为 472 安匝; 双透镜成像激励条件为 290 安匝 (前) 和 508 安匝 (后)。轴上磁场分布如图 1(b) 所示。

由图可知，单透镜和双透镜轴上最大磁感应强度分别为  $3.8 \times 10^{-3} \text{ T}$  和  $4.1 \times 10^{-3} \text{ T}$ 。光电子束在磁场作用下产生聚焦，同时绕光轴旋转一定角度后，成像于屏上。从单透镜和双透镜像管阴极中心发射的光电子束轨迹分别示于图 2(a)和(b)中。



(a) 双磁透镜像管模型

(a) Image tube using double magnetic lenses

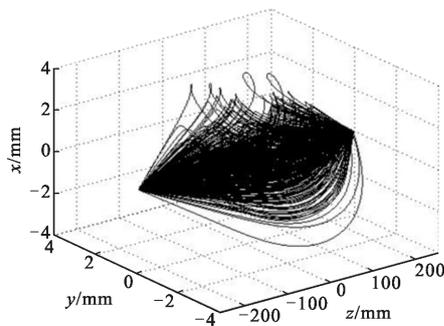


(b) 轴上磁场分布

(b) Distribution of magnetic flux density on the axis

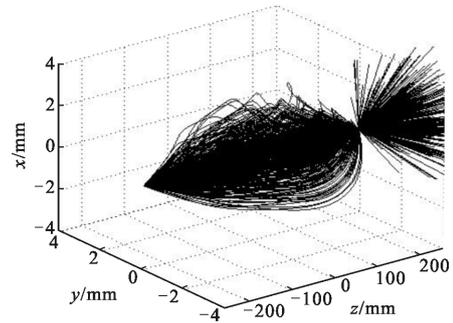
图 1 分幅变像管结构模型以及两种像管轴上磁场分布

Fig.1 Model of the framing tube and distribution of magnetic flux density on the axis



(a) 单磁透镜成像的电子轨迹

(a) Electron trajectories through the magnetic single-lens imaging



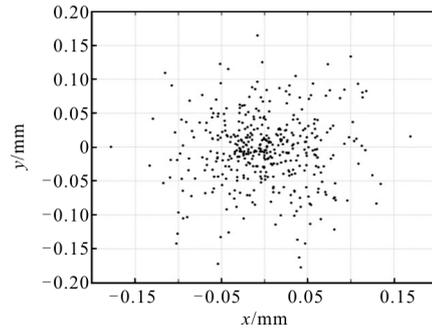
(b) 双磁透镜成像的电子轨迹

(b) Electron trajectories through the magnetic double-lens imaging

图 2 阴极中心发射的电子轨迹

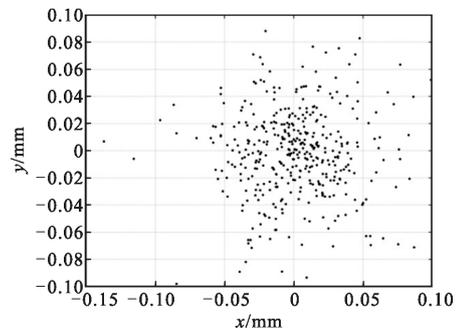
Fig.2 Electron trajectories launched from centre of photocathode

阴极上的物点发射的电子束总有一定的发散角，经过电子光学系统成像，其不再是一个点，而扩散成一个像斑(如图 3 所示)。统计像面上落点对理想成像点的偏离，得出单透镜像管和双透镜像管阴



(a) 单磁透镜成像

(a) Magnetic single-lens imaging



(b) 双磁透镜成像

(b) Magnetic double-lens imaging

图 3 阴极中心发射的电子轨迹在像面上的落点分布

Fig.3 Placements distribution of the electrons on the imaging plane launched from centre of photocathode

极中心落点对应的方均根半径分别为  $0.085 \text{ mm}$  和  $0.054 \text{ mm}$ 。将其分别代入公式(2)中，当 MTF 降至

0.1 时,求得单透镜像管阴极中心的空分分辨率为 5.7 lp/mm,双透镜像管为 8.9 lp/mm(如图 4 所示)。同理还可得轴外的空分分辨力。图 5 给出了两种像管的空分分辨力模拟结果。图中单透镜像管离轴的空分分辨力下降较快,离轴 12 mm(对应像面上 6 mm 处)的空分分辨力既降至 0.9 lp/mm,几乎不能成像。相比之下,双透镜像管离轴 12 mm(对应像面上 6 mm)以内空分分辨力下降较为平缓,而且离轴 18 mm(像面上 9 mm 处)仍有一定的空分分辨能力。对比可知,双透镜像管的空分分辨力明显优于单透镜像管。

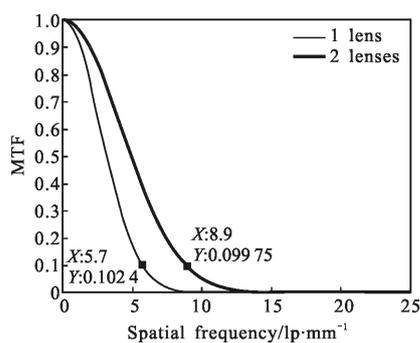


图 4 两种分幅变像管阴极中心对应的空分调制传递函数曲线

Fig.4 Curve of MTF at the centre of cathode of two tubes

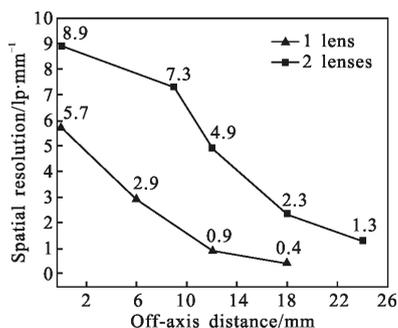


图 5 两种分幅变像管各离轴点的空分分辨力模拟结果

Fig.5 Simulated spatial resolutions of the two framing tubes

利用像面落点分布,还可以获取轴外成像畸变的信息。畸变一般是指因像面上离轴不同高度点成像倍率的差异所表现出来的一种像差。以像斑的中心位置(落点坐标平均值)来确定像高,计算像面上各离轴位置实际放大倍率与理想放大倍率的偏差率,即为畸变率,表 1 所示。单透镜像管畸变较大,各离轴位置的畸变均在 6% 以上,边缘畸变率达到 14.8%。而双透镜像管各离轴点畸变均较小,边缘畸变率仅为 3.2%。说明对于成像畸变,采用双透镜像

管会有明显的改善。

表 1 两种分幅变像管畸变率的模拟结果

Tab.1 Simulated distortion ratios of the two framing tubes

Off-axis distance/mm	Image height/mm	Image ratio	Distortion ratio
Single lens 6	3.183	0.531	6.2%
Single lens 12	6.558	0.546	9.2%
Single lens 18	10.341	0.574	14.8%
Double lenses 9	4.563	0.507	1.4%
Double lenses 12	6.096	0.508	1.6%
Double lenses 18	9.207	0.511	2.2%
Double lenses 24	12.384	0.516	3.2%

## 2.2 静态空分分辨力测试结果与分析

像管静态空分分辨力的实际测试采用最新研制的大面积阴极像管。大面积阴极像管的物面是尺寸为 72 mm×12 mm 的镀金微带结构,像管末端装配有 MCP、荧光屏和图像采集系统(CCD)。由于 MCP 是尺寸为 40 mm×8 mm 的微带结构,为确保阴极的像完全落在 MCP 上,选择 2:1 的成像倍率。为便于直接测量各离轴位置的空分分辨力,利用光刻技术在阴极微带上规则地刻划上各种空分频率的分辨率板,每块分辨率板是尺寸为 3 mm×3 mm 的小方格,其线对数分别为 2,5,10,15,直至 35 lp/mm。测试时,直接用紫外灯作为光源采集静态图像。测试条件为:阴极电压-3.0 kV,MCP 电压-560 V,屏压+3.4 kV。单透镜成像的励磁电流为 0.344 A;双透镜成像的励磁电流为 0.220 A(前)和 0.385 A(后)。实验时像管内部真空压强值控制在 1.0×10<sup>-3</sup> Pa 以下。离轴各点空分分辨力的确定采用如下方法:首先,由静态图像确定各离轴位置所能观测到的分辨率板的线对数(包括纵横两个方向);并测量该分辨率板条纹的调制度;然后,根据公式(2),得到方均根半径,即对应一条 MTF 曲线;最后,计算 MTF 值降至 0.1 时对应的空分分辨力,即为该位置的空分分辨力。

两种像管的静态测试结果如图 6 所示。其中上半部分是单透镜缩小一倍成像的结果,下半部分则是双透镜成像的情况。对于单透镜成像,在阴极中心附近尚能观察到 5 lp/mm 的成像,2 lp/mm 区在

纵横两个方向都有较好的对比度。但是,其离轴的空间分辨能力下降得较快,轴外 12 mm 之外的成像已相当模糊,并且像的畸变随离轴距离的增大急剧增加。因此,有效成像范围非常有限,像质也很不理想,这与数值模拟结果大致相符。对于双透镜的成像,首先,其在阴极中心附近的分辨能力要优于单透镜,在纵横两个方向均可以观测到 5 lp/mm 区的成像。其次,离轴的空间分辨率变化比较平缓,离轴 9 mm 仍能分辨 5 lp/mm 区的细节。而且,在离轴更远的区域仍具有一定的空间分辨能力,同时,整个像场的畸变也很小。因此,其有效成像范围较宽,成像质量也优于单透镜。双透镜像管各离轴位置条纹调制度和相应的空间分辨率测量值见表 2,这与先前模拟结果基本相符。

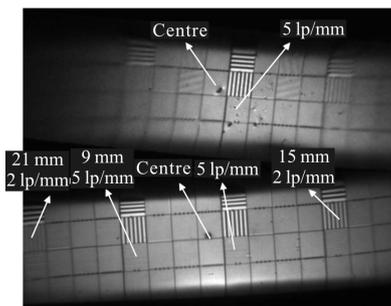


图 6 两种分幅变像管的静态测试图像(上半部分:单磁透镜成像;下半部分:双磁透镜成像)

Fig.6 Static testing results of the two framing tubes  
(upper: magnetic single-lens imaging;  
lower: magnetic double-lens imaging)

表 2 双磁透镜像管各离轴位置空间分辨率的测量值

Tab.2 Measured off-axis spatial resolution values for the magnetic double-lens tube

Off-axis distance/mm	Fringe contrast	Spatial resolution /lp·mm <sup>-1</sup>
3	12%(5 lp/mm)	5.2
9	10%(5 lp/mm)	5.0
15	34%(2 lp/mm)	2.9
21	24%(2 lp/mm)	2.5

综上所述,在 2:1 成像倍率下,比较了双透镜像管与单透镜像管的空间分辨特性。数值模拟和实验测试结果均表明,双透镜像管具有更高的空间分辨率,更大的有效成像范围以及更小的成像畸变。

因而,采用双透镜成像能够有效地提高像管的空间分辨能力,可为分幅相机性能的进一步提升提供新的思路。

### 3 结论

采用 Matlab 软件数值模拟的方法辅助像管设计,在 2:1 成像倍率下对短磁聚焦双透镜分幅变像管与单透镜像管的空间分辨特性作了详细的分析比较,并利用最新研制的大阴极变像管加以测试验证。测试结果显示,相比单透镜成像,采用双透镜成像能够有效地提高空间分辨率、扩大成像范围和减小成像畸变。这与数值模拟的结果符合得较好。鉴于双磁透镜在改善成像质量方面所表现出的明显优势,进一步探讨多个磁透镜组合成像对像管性能的影响无疑具有重要的理论和现实意义,这也将是下一步工作的重点。

### 参考文献:

- [1] Jiang Shaoen, Jing Longfei, Huang Yunbao, et al. Novel free-form hohlraum shape design and optimization for laser-driven inertial confinement fusion [J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(10): 102710.
- [2] Jiang Shaoen, Ding Yongkun, Miao Wenyong, et al. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China [J]. *Science In China(Series G)*, 2009, 39(11): 1571-1583. (in Chinese)  
江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 等. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展[J]. 中国科学 G 辑, 2009, 39(11): 1571-1583.
- [3] Mayuko Koga, Takashi Fujiwara, Tatsuhiko Sakaiya, et al. Measurement of heating laser injection time to imploded core plasma by using X-ray framing camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79 (10): 10E909.
- [4] Cai Houzhi. Research on temporal and spatial characteristics of microchannel plate [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2010: 34. (in Chinese)  
蔡厚智. 微通道板时空特性的研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2010: 34.
- [5] Oertel J A, Archuleta T N, Schrank L. S. The large format X-ray imager [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 701-704.
- [6] Bradley D K, Pvl P Bell, Landen O L. Development and characterization of a pair of 30-40 ps X-ray framing cameras [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1):

- 716–718.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Bai Yanli, Long Jinghua, Liu Jinyuan, 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.
- [10] Du Bingchu, Wang Jianru. *Electron Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 188. (in Chinese)  
杜秉初, 汪健如. *电子光学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 188.
- [11] Liao Yubo, Long Jinghua, Cai Houzhi, et al. Numerically simulated static spatial resolution of framing image converter using magnetic focusing via Matlab [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 012301. (in Chinese)  
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.
- [12] Zhou Liwei, Ai Kecong, Fang Erlun. Study of electron optical modulation transfer function and root mean square radius in the photo electronics image focusing systems [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1982, 3: 36–51. (in Chinese)  
周立伟, 艾克聪, 方二伦. 成像系统的电子光学调制传递函数与方均根半径的研究 [J]. *北京工业学院学报*, 1982, 3: 36–51.