

## 脉冲展宽分幅变像管场曲特性研究

雷云飞, 刘进元\*, 蔡厚智, 黄峻堃, 王勇, 邓珀昆

深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060

**摘要** 介绍了一种脉冲展宽分幅变像管, 并对其场曲特性和离轴空间分辨本领进行了分析。该分幅变像管采用多个短磁透镜将产生于阴极的电子图像成像于微通道板接收面。通过模拟仿真对透镜个数成像的场曲特性进行了研究, 并通过实验进行了验证。仿真计算结果表明, 采用多透镜可有效校正成像系统场曲, 提高空间分辨率。当成像比例为 1:1 时, 在离轴 30 mm 处单透镜、双透镜、三透镜和四透镜成像面与高斯像面的轴向偏离分别为 13 cm、4.7 cm、2.5 cm 和 1.7 cm。测试结果表明, 采用四透镜成像系统的离轴调制度较单透镜提升了约 40%。

**关键词** 超快光学; 超快诊断; 脉冲展宽; 磁透镜; 空间分辨率; 场曲

中图分类号 TN143

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2132001

## Study on Field Curvature Characteristics of Pulse-Dilation Framing Tube

Lei Yunfei, Liu Jinyuan\*, Cai Houzhi, Huang Junkun, Wang Yong, Deng Pokun

College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** In this paper, a pulse-dilation framing tube is developed, and the field curvature characteristics and off-axis spatial resolution of this tube are analyzed. Multiple short magnetic lenses are used in this tube to image the photoelectrons from the cathode onto the receiving surface of the microchannel plate. The field curvature characteristics of lenses number imaging are studied by simulations and verified by experiments. The simulation results show that the field curvature of the imaging system can be reduced by multiple lenses and the spatial resolution is improved. When the imaging ratio is 1:1, the axial deviations of simple lens, bilens, triplet lens, and four lenses from Gaussian image plane are 13 cm, 4.7 cm, 2.5 cm, and 1.7 cm, respectively. The experimental results show that the off-axis modulation of the four lenses system is 40% higher than that of the single lens.

**Key words** ultrafast optics; ultrafast diagnosis; pulse-dilation; magnetic lens; spatial resolution; field curvature

**OCIS codes** 320.7100; 330.6130; 320.5550; 220.1000

## 1 引言

行波选通分幅相机是一种具有高时空分辨率的脉冲诊断装置, 由于其具有对超快信号的探测能力和二维空间的分辨本领, 一直被广泛应用于惯性约束核聚变(ICF)、同步辐射源探测等科研领域<sup>[1-5]</sup>。行波选通分幅相机以传输电脉冲作为快门, 采用微通道板(MCP)对电子图像进行增益<sup>[6-7]</sup>, 是早期 ICF 实验的重要诊断设备<sup>[8-9]</sup>。但受制于 MCP 的渡越时间弥散, 传统行波选通分幅相机的时间分辨率一

直被限制在 50~100 ps<sup>[10]</sup>。目前, 惯性约束核聚变内爆阶段的持续时间一般只有 100 ps, 因此其变化过程很难被现有行波选通分幅相机所探测<sup>[11-12]</sup>。通过脉冲展宽技术将被测信号在时间上进行展宽并测量, 对测量出的信号采用时间压缩和脉冲重建的方法<sup>[13]</sup>, 可以提升探测信号时间分辨能力。2012 年, Nagel 等<sup>[14-16]</sup>将脉冲展宽技术与时间分幅技术相结合, 研制出脉冲展宽分幅相机, 将时间分辨率提升到 5 ps。本课题组于 2016 年研制的时间展宽分幅相机, 采用高压脉冲对电子束团进行展宽并利用延迟

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-20; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(11775147)、中国博士后科学基金(2018M643183)

通信作者: \*ljy@szu.edu.cn

光纤进行标定,使相机时间分辨率达到  $4 \text{ ps}^{[17]}$ 。

脉冲展宽分幅相机的成像系统主要分为长磁透镜和短磁透镜。由于长磁透镜系统的空间分辨率取决于电子在磁场中圆周运动半径,因此需要在整个漂移区上保持较高的磁场强度  $B$ 。为实现 1:1 成像的单个长磁透镜,漂移区  $B$  需达到  $798 \text{ Gs}$  ( $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$ )<sup>[18]</sup>。而短磁透镜成像所需的峰值磁场通常为  $20 \sim 40 \text{ Gs}^{[19-20]}$ 。在成像质量相近的情况下,长磁透镜线圈中的电流密度约为短磁透镜的 100 倍<sup>[21]</sup>。

目前对于脉冲展宽分幅相机的研究,其中一个重要方面是增大变像管的工作面积<sup>[22]</sup>。本课题组曾探究了时间展宽分幅相机,采用单个短磁透镜成像的方法对漂移区电子进行约束,成像比例为 2:1 时轴上空间分辨率达到了  $5 \text{ lp/mm}$ ,但是由于场曲的影响,空间分辨率随离轴距离 ( $r$ ) 增大而迅速下降,从而限制了变像管的工作面积<sup>[23-25]</sup>。大工作面脉冲展宽分幅相机通过优化成像系统,其工作面面积可达到半径  $30 \text{ mm}^{[26]}$ 。此外,单视线分幅相机使用触发电路控制 CMOS 单元代替传统行波选通,以较小的工作面面积实现大工作面相机的分幅数量<sup>[17]</sup>,但其电路设计难度较大<sup>[27]</sup>。

由于传输快门作用的影响<sup>[28]</sup>,脉冲展宽分幅相机成像系统的成像比例需设定为 1:1。本文对工作于 1:1 成像比例下的短磁透镜成像过程进行了理论计算和模拟仿真,分析了造成离轴空间分辨下降的原因,并提出了采用多个磁透镜改善场曲并提高离轴空间分辨率的方法。通过模拟仿真拟合出成像系统的场曲形状,证实了四透镜结构可有效降低成像系统的场曲。根据仿真结果研制出四透镜分幅变像管,其离轴调制度较单透镜提升了约 40%。

## 2 分幅变像管结构

脉冲展宽分幅变像管主要由阴极、阳极、漂移区、微通道板、荧光屏以及磁透镜成像系统组成,如图 1 所示。其中,阴极衬底材料为直径  $60 \text{ mm}$  的石英玻璃,上面制作有三条宽度  $12 \text{ mm}$ 、厚度为  $100 \text{ nm}$  的金属微带,阴极电压为  $-3 \text{ kV}$ 。阳极为透过率 80% 的镍制接地栅网,栅网距离阴极  $1 \text{ mm}$ ,阴极产生的电子经过加速后进入漂移区,漂移区长度约为  $550 \text{ mm}$ ,管壳接地。成像系统由分布式的短磁透镜组组成,磁透镜外径为  $256 \text{ mm}$ 、内径为  $160 \text{ mm}$ 、宽为  $50 \text{ mm}$ ,外包铁壳厚度为  $5 \text{ mm}$ ,内壳中心处开有  $4 \text{ mm}$  狭缝使磁场集中,成像比例为

1:1。MCP 直径  $106 \text{ mm}$ ,输入面制作有三条宽度为  $15 \text{ mm}$  的金属微带,输出面接地,电子经过 MCP 倍增后轰击荧光屏。荧光屏与 MCP 间采用近贴聚焦,间距为  $0.5 \text{ mm}$ 。

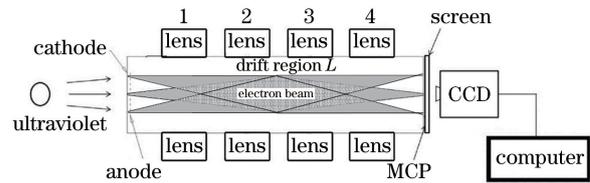


图 1 脉冲展宽分幅变像管示意图

Fig. 1 Schematic of the pulse-dilation framing tube

当紫外光或 X 射线照射到光阴极上时,光阴极释放出光电子。阴极上的展宽脉冲使阴栅间存在随时间变化的加速电场,光电子在加速电场作用下开始运动,并穿过阳极栅网进入漂移区,电子在漂移区运动过程中受到透镜磁场影响发生偏转,最终成像于 MCP 接收面上。由于时变的加速电场赋予了光电子轴向速度色散,产生时间较早的光电子相较于产生时间较晚的光电子以更快的速度通过漂移区,实现了电子束的时间放大,从而提高了分幅相机时间分辨率。MCP 通过电脉冲增益实现对电子图像的选通,曝光时间取决于选通电脉冲的半峰全宽,增益后的电子轰击荧光屏形成可见光图像。最后,图像被 CCD 相机观察并记录在电脑上。

在成像过程中,由于展宽脉冲与选通脉冲在微带上的传输速度相同,则在阴极长度方向上存在一定距离且同步于展宽脉冲的两个点,其在 MCP 上对应的成像点同步于选通脉冲的条件是两个像点在 MCP 微带上的距离等于对应物点在阴极上的距离,即成像比例为 1:1。当阴极图像以缩放比例成像于 MCP 时,展宽脉冲与选通脉冲实现同步的位置只有一个点,这便是传输快门效应<sup>[28]</sup>。

## 3 理论分析和模拟

### 3.1 像差理论

在电子光学系统中,短磁透镜的成像机制存在几何像差。实验表明,对脉冲展宽分幅变像管中的短磁透镜成像影响最大的两种像差是球差和场曲。前者主要影响变像管轴上空间分辨率<sup>[29]</sup>,而后者则主要影响离轴空间分辨率。在极坐标下这两类像差在高斯像面上的弥散斑大小可以表示为<sup>[30]</sup>

$$\Delta_s = Cr_d^3, \quad (1)$$

$$\Delta_t = Dx_a^2 r_d, \quad (2)$$

式中: $C$  和  $D$  分别表示球差系数和场曲系数; $x_a$  表

示物点的离轴距离;  $r_d$  表示光阑孔径。

(1)式表明,球差大小仅与  $r_d$  有关,和  $x_a$  无关,因此不会随  $x_a$  增大而增大。(2)式表明,场曲随  $x_a$  增大而增加,是造成分幅变像管离轴空间分辨率随  $x_a$  增加而下降的主要原因。在场曲的作用下,成像系统的像场弯曲为一个曲面,而实际的 MCP 接收面(即高斯像面)为一平面,这使得离轴物点发射的电子图像在接收面上扩散为一个弥散斑,造成了空间分辨率的下降。随着  $x_a$  的增大,场曲面与高斯像面的轴向偏离也相应增大,空间分辨率下降也更加严重。降低场曲面的曲率可有效缩短离轴位置上场曲面和高斯像面之间的轴向偏离,进而缩小弥散斑的大小,提高成像系统的空间分辨率。

### 3.2 分幅变像管场曲模拟

采用短磁透镜成像系统的分幅变像管,其场曲的曲率半径  $r_p$  在近轴模式下可表示为<sup>[31]</sup>

$$\frac{1}{r_p} = -\frac{e}{4mV^{3/4}} \int_{-\infty}^{+\infty} B^2(z) dz, \quad (3)$$

式中:  $e$  为电子电量;  $m$  为电子质量;  $V$  为加速电压;  $z$  为漂移区轴向距离。

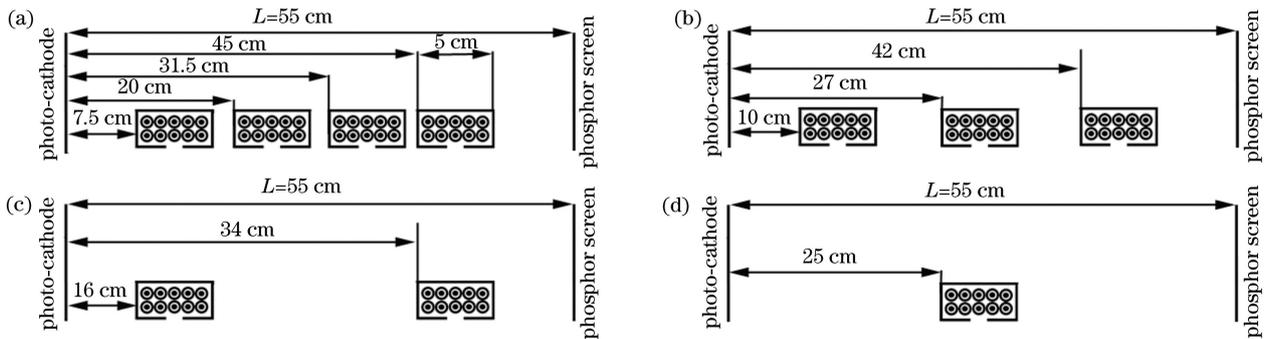


图 2 透镜排列方式示意图。(a)四透镜;(b)三透镜;(c)双透镜;(d)单透镜

Fig. 2 Diagram of lenses arrangement. (a) Four lenses; (b) triplet lens; (c) bilens; (d) simple lens

不同透镜个数成像系统结构在漂移区形成的  $B$  如图 3 所示,单透镜峰值位于漂移区中心,约为 32 Gs,而四透镜存在 4 个峰值,靠近漂移区中心的两个峰值为 21 Gs,两端处的峰值为 18 Gs。四透镜系统第一个峰值位于阴极附近,光电子离开阴极后立刻受到磁场作用,更多电子通过磁场的近轴部分,可以降低因近轴条件无法满足而形成的像差。

观察电子束团在磁场作用下的运动轨迹,再根据成像点位置拟合场曲面形状,如图 4 所示。图 4(a)为单透镜成像三维场曲拟合图(左)以及场曲面与中轴面交线的二维坐标分布图(右)。单透镜场曲非常严重,当轴上像点位于高斯像面时,离轴 30 mm 处成像点与高斯像面轴向偏离约 13 cm,因

从(3)式中可以看出,在漂移区上  $B^2 \geq 0$ ,因此变像管的场曲只能降低,无法完全消除。对于工作面积较小,成像区域主要在近轴区的电子光学系统,其场曲的形状近似为一个球面,大小可以由曲率半径  $r_p$  进行判断。但是,对于大工作面的分幅变像管,由于  $B$  随  $r$  的变化量无法忽略,因此(3)式中的  $B$  需改写为随  $r$  改变的函数  $B(r, z)$ ,分析表明  $B(r, z)$  随  $r$  增大而增大<sup>[21]</sup>。而得到的曲率半径  $r_p$  也将随着  $r$  变化而变化,因此不能简单以曲率半径来判断场曲的大小。同时,引入变量  $r$  也使(3)式的计算变得复杂,难以求得分析解,因此需要建立分幅变像管模型并对模型中的电子运动轨迹进行追踪,通过数值模拟完成对场曲面的拟合。

仿真模型中,阴极平面上设置有发射点,用于模拟不同  $r$  电子发射情况。发射点的光电子初始参数:初始能量为 1 eV,发射角在  $0^\circ \sim 180^\circ$  上服从均匀分布,阴极电压为 -3 kV, MCP 接收面电压为 -560 V,管壳、栅网以及 MCP 出射面接地。透镜排列方式如图 2 所示。

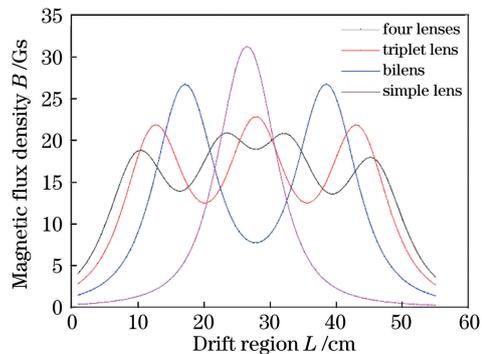


图 3 四种透镜结构分幅变像管漂移区轴上  $B$  分布示意图  
Fig. 3 Schematic of  $B$  distribution on the axis of drift zone of four lenses frames

此,在该位置上的电子轨迹到达高斯像面时形成一

个大型离散斑,无法成像。场曲造成了单透镜离轴空间分辨率严重下降,变像管的工作面积半径通常不会超过 12 mm。双透镜成像场曲拟合图以及二维坐标分布如图 4(b)所示。采用双透镜成像后,场曲出现了明显的改善,离轴 30 mm 处成像点与高斯像面轴向偏离约 4.7 cm,较单透镜大幅缩短。较小的场曲有助于双透镜变像管获得较大的工作面积,但接近场边缘处的空间分辨仍然不理想。三透镜成像场曲拟合图以及二维坐标分布如图 4(c)所示。三透镜成像场曲进一步缩小,离轴 30 mm 处成像点与高斯像面轴向偏离约 2.5 cm,在双透镜基础上又改善了一倍左右。此外,三透镜变像管成像系统的

场曲面在离轴 20 mm 处开始出现较为明显的曲率变化,这一变化使离轴 20 mm 以上的部分成像质量获得明显改善。四透镜成像场曲拟合图以及二维坐标分布如图 4(d)所示。四透镜成像系统下的场曲情况和三透镜类似,但离轴 30 mm 处成像点与高斯像面轴向偏离进一步缩短,达到约 1.7 cm。并且在离轴 20 mm 以上部分,四透镜系统同样出现了曲率变化,离轴 30 mm 处空间分辨已能够达到 5 lp/mm。四透镜系统使电子更多地通过磁场的近轴部分,且多磁透镜系统中的  $B$  随  $r$  变化幅度较小<sup>[21]</sup>,因此四透镜系统具有较其他透镜系统更小的场曲,在远轴部分具有更好的空间分辨本领。

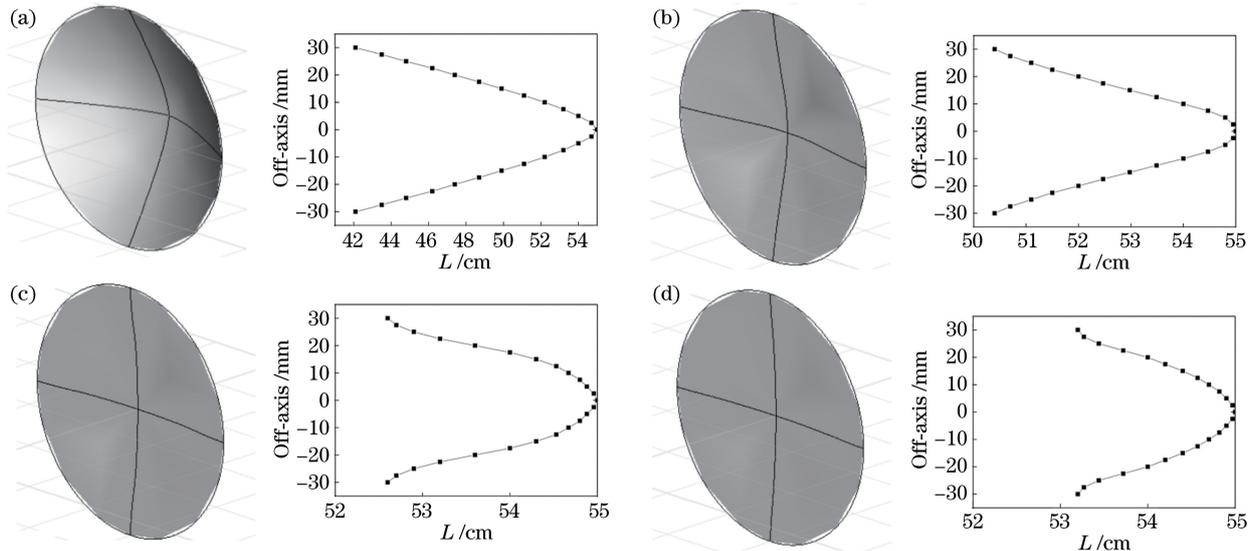


图 4 成像场曲三维拟合图与二维坐标分布。(a)单透镜;(b)双透镜;(c)三透镜;(d)四透镜

Fig. 4 Three-dimensional fitting diagrams and two-dimensional coordinate distribution of imaging field curvature.

(a) Simple lens; (b) bilens; (c) triplet lens; (d) four lenses

## 4 实验测试

改变高斯像面的位置,使高斯像面与场曲面相交,则交线处的空间分辨将达到极大值,用这种方法可以在实验中通过使像面不同  $r$  位置的空间分辨最大化来拟合场曲面的形状。但是,由于实验中的 MCP 和阴极相对位置固定,所以无法通过移动接收面来拟合场曲面形状。作为替代方案,通过记录不同阴极电压下各离轴位置的清晰点来拟合场曲像面。

实验装置如图 5 所示。采用直流紫外光源均匀照射变像管阴极,阴极上制作有分划板,电压为  $-3$  kV, MCP 输入面电压为  $-700$  V,荧光屏电压为  $3.4$  kV,栅网、管壳和 MCP 输出面接地, CCD 相机通过透镜与荧光屏耦合。磁透镜为可拆卸式,可

用于不同透镜个数下的成像测试。将四透镜按图 1(a)安装于漂移区,调节磁透镜电流,使阴极中间条带以 1:1 成像于 MCP 接收面,结果如图 6 所示。图上有 5 组分划板位于不同的离轴位置,当某组分划板空间分辨达到最高值时,表明该离轴位置处成像点正好位于 MCP 接收面上,图中点为中心轴线,箭头则表示待测分划板的  $r$ 。

图 7 为不同阴极电压所对应的各离轴位置清晰图像,图中选取的是 2 lp/mm 和 5 lp/mm 分划板图形。所选取的各图像对应离轴位置分别为 1.5 mm、10.5 mm、13.5 mm、22.5 mm 和 25.5 mm,图片下方数字表示该图像所对应的阴极电压。实验表明,单透镜场曲最为严重,近轴成像点(1.5 mm)和远轴成像点(25.5 mm)的阴极电压差异达到 400 V。四透镜场曲最小,近轴成像点和远轴成像

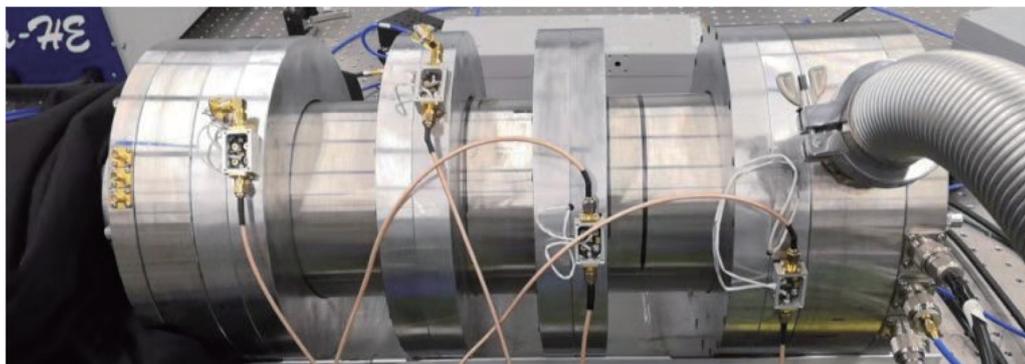


图 5 实验装置图

Fig. 5 Photograph of experimental device

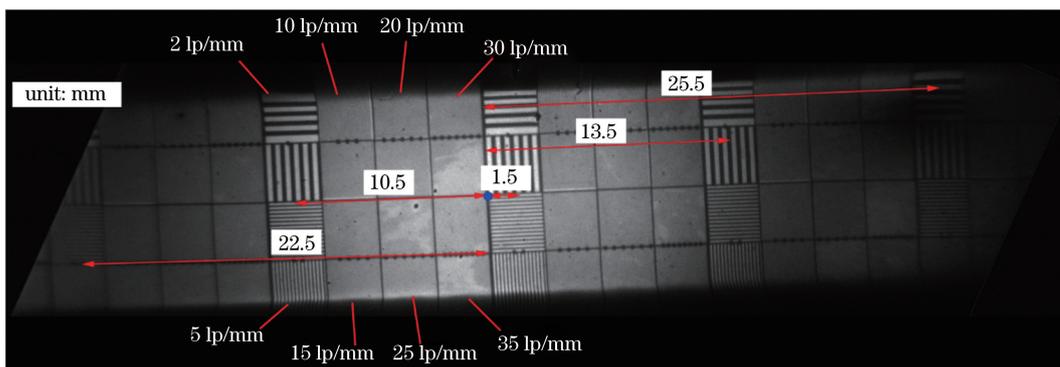


图 6 四透镜结构中央阴极条带成像结果

Fig. 6 Experimental result of the center cathode image with four lenses

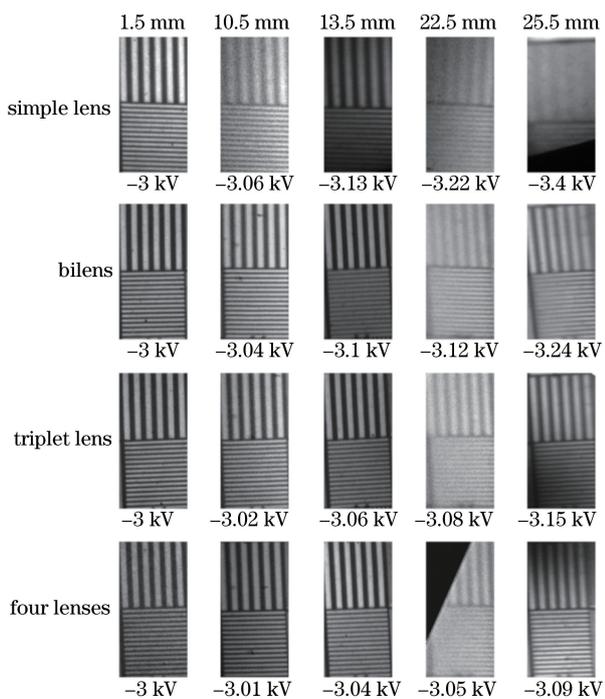


图 7 2 lp/mm 和 5 lp/mm 分划板图形清晰图像放大图

Fig. 7 Enlarged views of some clearly mask with 2 lp/mm and 5 lp/mm

点的阴极电压差异约为 90 V。阴极电压为 -3 kV

时 5 lp/mm 分划板位于不同  $r$  的调制度曲线如图 8 所示,调制度随着  $r$  增加而下降,在单透镜中最为严重,当  $r$  从 1.5 mm 变化为 25.5 mm 时,单透镜调制度从 40% 下降至不到 1%,而四透镜调制度从 50% 下降至 40%,表明四透镜能够显著提高系统的离轴空间分辨率。实验数据和模拟仿真结果较为符合,采用四透镜结构成像系统进行成像场曲最小,离轴调制度较单透镜提升了约 40%,且在边缘处具有

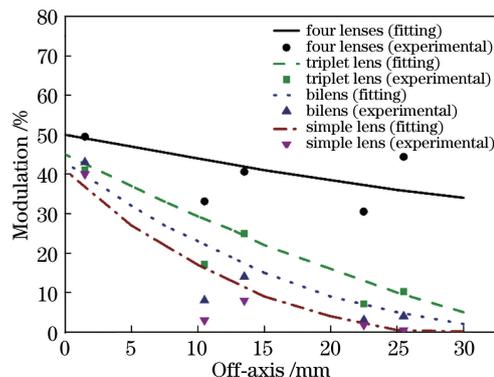


图 8 分划板空间调制度随  $r$  变化图

Fig. 8 Diagram of the spatial modulation system of mask varying with  $r$

较高的空间分辨率。

## 5 结 论

本文分析了采用短磁透镜成像系统的分幅变像管的场曲特性。针对单透镜成像离轴空间分辨较低的问题,提出了通过多个磁透镜改善场曲,进而提高离轴空间分辨率的方法。利用软件模拟了电子在变像管漂移区的运动,通过对电子运动轨迹进行追迹,对透镜个数下的场曲面形状进行了拟合。仿真结果表明,单透镜时场曲面离轴 30 mm 处成像位置与高斯像面的轴向偏离约 13 cm,而采用四透镜时这一偏离缩短为 1.7 cm,多透镜系统下的场曲得到了一定的改善。实验结果表明,采用多透镜结构可以有效降低成像面的像场弯曲,当采用四透镜结构时,近轴成像与远轴成像电压差较单透镜减小了 310 V,离轴 25.5 mm 处的调制度较单透镜提升了约 40%。综上所述,利用多透镜结构可有效降低成像系统场曲,提高离轴空间分辨率,可适用于大工作面积分幅变像管。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Rygg J R, Jones O S, Field J E, et al. 2D X-ray radiography of imploding capsules at the national ignition facility[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(19): 195001.
- [3] Town R P J, Bradley D K, Kritcher A, et al. Dynamic symmetry of indirectly driven inertial confinement fusion capsules on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(5): 056313.
- [4] Michel D T, Craxton R S, Davis A K, et al. Implosion dynamics in direct-drive experiments[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2015, 57(1): 014023.
- [5] Klir D, Shishlov A V, Kokshenev V A, et al. Characterization of neutron emission from mega-ampere deuterium gas puff Z-pinch at microsecond implosion times [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, 55(8): 085012.
- [6] Bradley D K, Bell P M, Kilkenny J D, et al. High-speed gated X-ray imaging for ICF target experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 4813-4817.
- [7] Liu J Y, Niu L H, Peng W D, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(5): 055104.
- [8] Kilkenny J D, Bell P, Hanks R, et al. High speed gated X-ray imagers [J]. *Proceedings of SPIE*, 1988, 0913: 147-152.
- [9] Bradley D K, Delettrez J, Jaanimagi P A, et al. X-ray gated images of imploding microballoons [J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 0981: 176-185.
- [10] Kilkenny J D. High speed proximity focused X-ray cameras [J]. *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(1): 49-69.
- [11] Liu J Y, Wang J, Shan B, et al. An accumulative X-ray streak camera with sub-600-fs temporal resolution and 50-fs timing jitter [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(20): 3553-3555.
- [12] Cai H Z, Liu J Y, Fu W Y, et al. Gated framing camera with three channels and its trigger jitter measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0204001.  
蔡厚智, 刘进元, 付文勇, 等. 三通道门控分幅相机及其触发抖动测量 [J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0204001.
- [13] Liu A L, Zhang J J, Li S N, et al. Fast target three-dimensional reconstruction algorithm for streak tube laser imaging radar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0110004.  
刘爱林, 张敬金, 李思宁, 等. 条纹管激光成像雷达目标三维重构快速算法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0110004.
- [14] 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.
- [15] 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]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- [16] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [17] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, et al. Dilation framing camera with 4 ps resolution [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 016101.
- [18] Engelhorn K, Hilsabeck T J, Kilkenny J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) X-ray imagers [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 10G123.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Lei Y F. Study of electron beam moiré fringes and spatial resolution of the time dilation X-ray framing [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017: 57-62, 67-72.
- 雷云飞. 分幅变像管空间分辨性能与电子束莫尔条纹研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2017: 57-62, 67-72.
- [22] 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.
- [23] Cai H Z, Long J H, Liu J Y, et al. Picosecond framing camera based on electron pulse time-dilation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206001.
- 蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 电子束时间展宽皮秒分幅相机 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1206001.
- [24] 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.
- [25] Cai H Z, Fu W Y, Lei Y F, et al. Temporal and spatial performances of framing camera based on magnetic focusing imaging and electron pulse time dilation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070401.
- 蔡厚智, 付文勇, 雷云飞, 等. 磁聚焦成像电子束时间展宽分幅相机的时空特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070401.
- [26] 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.
- [27] Liu X, Liu Y, Zhang C, et al. Resolution improvement and data processing of remote sensing images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 081002.
- 刘秀, 刘咏, 张翠, 等. 遥感图像分辨率提升与数据处理 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 081002.
- [28] Cai H Z, Fu W Y, Wang D, et al. Synchronous gating in dilation X-ray detector without 1:1 image ratio [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12470-12482.
- [29] Gao H Y, Bai Y L, Yao R B, et al. Transmission and imaging characteristics of femtosecond photoelectrons in pulse-dilation system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 123201.
- 高海英, 白雁力, 姚荣彬, 等. 脉冲展宽系统中的飞秒光电子传输成像特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 123201.
- [30] Du B C, Wang J R. *Electron optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 226-239.
- 杜秉初, 汪健如. *电子光学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 226-239.
- [31] Klemperer O. *Electron optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1971: 203-206.