

双透镜脉冲展宽分幅相机成像特性研究

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 报道了一种采用双磁透镜校正像差的脉冲展宽分幅相机, 并对其空间分辨率、场曲及象散特性进行分析。当缩放比例为 2:1 时, 采用单透镜的分幅相机工作面的半径为 15 mm, 离轴 15 mm 处空间分辨率为 2 lp/mm; 采用双透镜对像差进行校正后, 工作面的半径提升至 30 mm, 离轴 15 mm 处空间分辨率提升为 5 lp/mm。通过实验和仿真对单透镜和双透镜成像系统的像场弯曲进行拟合, 场曲面离轴 15 mm 处成像点与轴上像点的轴向距离在单透镜成像系统中约为 11 cm, 在双透镜成像系统中约为 3 cm。对双透镜系统的象散进行分析, 并对子午像面和弧矢像面进行拟合, 相机的子午空间分辨率和弧矢空间分辨率均可达到 10 lp/mm。

关键词 超快诊断; 脉冲展宽; 磁透镜; 空间分辨率; 场曲; 象散

中图分类号 TN143

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1832001

Imaging Performance of Double-Lens Pulse-Dilation Framing Camera

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

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

Abstract In this study, a pulse-dilation framing camera using double magnetic lenses to correct aberrations is reported. The spatial resolution, field curvature, and astigmatism characteristics of the camera were analyzed. When the imaging ratio is 2:1, the radius of the working area of the framing camera with a single magnetic lens is 15 mm, and the spatial resolution at a 15-mm off-axis distance is 2 lp/mm. When double magnetic lenses are used in this system, some aberrations are corrected, the radius of the working area is 30 mm, and the spatial resolution at a 15-mm off-axis distance is 5 lp/mm. The field curvature of the camera with a single lens and double lenses was measured and simulated. In a single-lens imaging system, the axial distance between the imaging point at 15-mm off-axis of the field surface and the image point on the axis is around 11 cm, while in a double-lens imaging system, it is about 3 cm. The astigmatism of the double-lens system is analyzed. In the experiment, sagittal and tangential image surfaces are fitted, and the sagittal and tangential resolutions can reach 10 lp/mm.

Key words ultrafast measurement; pulse dilation; magnetic lens; spatial resolution; field curvature; astigmatism

1 引言

微通道板(MCP)行波选通分幅相机作为一种具备二维空间分辨能力的超快诊断设备, 一直广泛应用于惯性约束聚变(ICF)、Z箍缩等科研领域^[1-6]。受限于MCP的渡越时间弥散和选通电脉冲宽度等^[7], 传统行波选通分幅相机的时间分辨率通常只有 35~100 ps^[8-9], 并且难以获得进一步的提升。在行波选通分幅相机的时间分辨能力无法提高的情况下, 在时间上对被测信号进行展宽并测量^[10], 对测量出的信号进

行时间压缩和脉冲重建^[11], 从而提升系统的时间分辨率, 基于这一方法研制的分幅相机被称为脉冲展宽型分幅相机^[12]。具体来讲就是将时变的展宽电脉冲加载于光电阴极(PC), 从而在阴栅之间引入与时间相关的电子加速电压, 变化的轴向电场赋予光电子束轴向速度色散。由于光电子束前后速度的差距, 其经过漂移区到达MCP输入面时被拉伸, 实现电子束的时间放大, 从而提高了分幅相机时间分辨率。脉冲展宽分幅相机相较于传统行波选通分幅相机具有更高的时间分辨率^[13-14], 对于内爆阶段的持续时间一般只有 100 ps

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-07-22; 录用日期: 2021-07-28

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

左右的 ICF 实验,具备更好的瞬态探测能力^[15-16]。近年来,美国利弗莫尔实验室(LLNL)研发的展宽 X 射线变像管(DIXI)的时间分辨率达到 5 ps^[17-18]。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光纤进行标定,时间分辨率达到 4 ps^[19-20]。

由于短磁透镜自身存在像差,成像系统受到像差影响,导致相机的空间分辨本领下降。采用单个短磁透镜成像的分幅相机的轴上空间分辨率达到了 5 lp/mm,但是空间分辨率随离轴距离增大而迅速下降,从而限制相机的工作面积^[21-24]。

本文研制了一种双磁透镜脉冲展宽分幅相机,对其空间分辨性能和像差特性进行了分析。对比双磁透

镜和单磁透镜在 2:1 缩放倍率下的成像结果,实验结果表明双磁透镜能有效提升相机在离轴位置的空间分辨率,使相机有效工作面的半径从 15 mm 提升至 30 mm。通过仿真对两种成像系统的场曲进行拟合,从像差角度分析了双透镜改善离轴空间分辨率的原因。此外,还对双透镜成像系统的象散特性进行仿真与实验,测试结果表明象散也是造成离轴空间分辨率下降的原因之一。

2 脉冲展宽分幅相机结构

脉冲展宽分幅相机主要由以下部分组成:光电阴极、阳极栅网、磁透镜成像系统、行波选通变像管、电控系统和 CCD。相机整体结构和实物照片如图 1 所示。

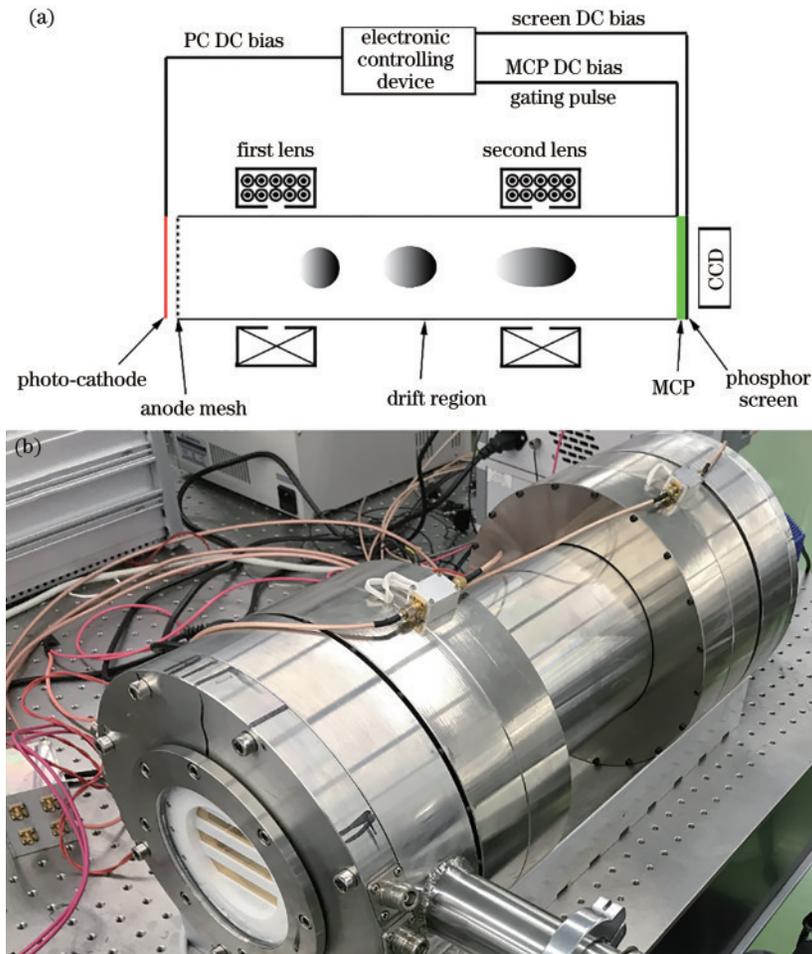


图 1 脉冲展宽分幅相机。(a)结构图;(b)实物图

Fig. 1 Pulse-dilation framing camera. (a) Schematic diagram; (b) photograph

光电阴极结构与实物如图 2 所示。3 条金属阴极微带蒸镀在直径约为 90 mm 的石英玻璃衬底上,每条微带的宽度为 12 mm,相邻两条阴极微带的间隙为 9 mm,微带厚度为 80 nm。用于测试空间分辨率的分划板被直接制作在阴极上,避免光学成像误差等因素对空间分辨率测试造成影响。电路板上的微带线将阴极与电控系统连接,阴极电压为 -3 kV。栅极接地,采用 20 lp/mm 的镍制栅网。阴极与栅极之间的加速区宽度约为 1.5 mm。

如图 3 所示,行波选通变像管由 MCP 和荧光屏组成。MCP 厚度为 0.5 mm,直径为 56 mm,微孔直径为 12 μ m。MCP 输入面有 3 条金属阳极微带,每条微带的宽度为 8 mm,两条 MCP 微带的间隔为 3 mm。荧光屏用于将电子图像转换为可见光图像,采用近贴聚焦,与 MCP 输出面的距离为 0.5 mm。CCD 通过透镜与荧光屏耦合,用于记录可见光图像。微带阳极上加载电压为 -700 V,荧光屏电压为 3.4 kV。

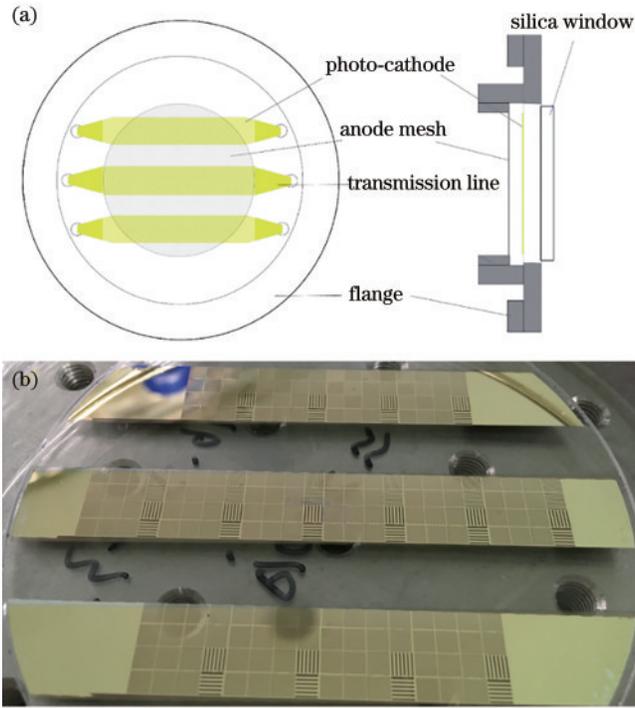


图 2 光电阴极。(a)结构图;(b)实物图

Fig. 2 Transmission photo-cathode. (a) Schematic diagram; (b) photograph

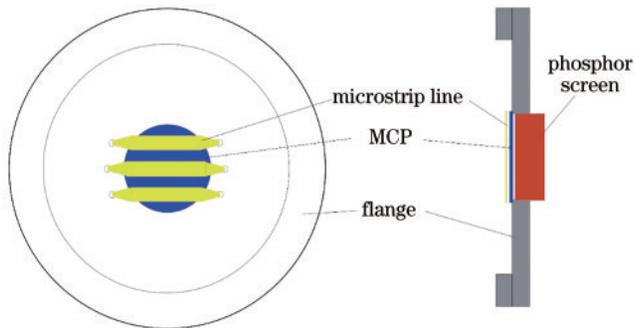


图 3 微通道板结构图

Fig. 3 Schematic of microchannel plate

漂移区长度约为 55 cm, 阴极产生的光电子在漂移区中受到透镜磁场作用成像于 MCP 接收面。成像系统由两个短磁透镜组成, 成像比例为 2:1, 第一个磁透镜与阴极的距离为 12.5 cm, 第二个磁透镜与阴极距离为 42.5 cm。第一个磁透镜线圈电流设置为 0.198 A, 而第二个磁透镜线圈电流为 0.334 A 至 0.345 A 可调, 用于进行像场弯曲测试。磁透镜线圈为 1320 匝, 外包铁壳, 如图 4(a) 所示。透镜内径为 160 mm, 外径为 256 mm, 宽度约为 100 mm, 铁壳内圈中心处开有 4 mm 狭缝, 磁场通过狭缝泄漏至漂移区。漂移区的轴上磁场分布如图 4(b) 所示。单个透镜的轴上磁场分布类似于高斯分布, 但两个透镜的磁场叠加则会形成双峰结构。其中磁场强度的第二个峰值随第二个线圈电流变化而变化, 当线圈电流为 0.334 A 时对应磁场强度为 3.31 mT, 当线圈电流为 0.345 A 时对应磁场强度为 3.42 mT。

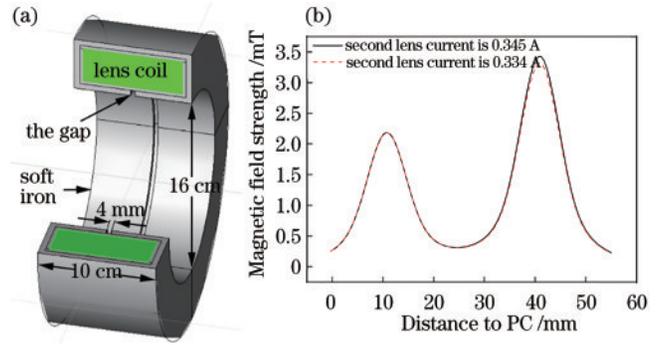


图 4 磁透镜与轴上磁场强度。(a)磁透镜结构;(b)漂移区磁场分布

Fig. 4 Magnetic lens and magnetic field strength on the axis. (a) Schematic of magnetic lens; (b) magnetic field distribution in drift region

3 实验与仿真结果

相机的空间分辨率受到成像系统的像差影响, 主要通过实验与仿真对成像系统的像差与空间分辨进行分析。实验装置如图 5(a) 所示。实验中采用直流紫外光源均匀照射, 阴极和 MCP 微带上均加载直流电压, 避免光源、加速电压和增益的不均匀性对空间分辨率测试的影响。在阴极中央条带上分布有 6 组分划板, 每组分划板的结构如图 5(b) 所示。分划板的空间频率分别为 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 lp/mm, 方向互相垂直。在实验过程中, 紫外光源均匀照射分划板阴极, 产生电子图像, 阴极发射的光电子被阴栅间电场加速后进入漂移区, 经磁透镜成像于 MCP 接收面, 成像比例为 2:1。电子图像通过荧光屏转变为可见光图像, 并被 CCD 所记录。

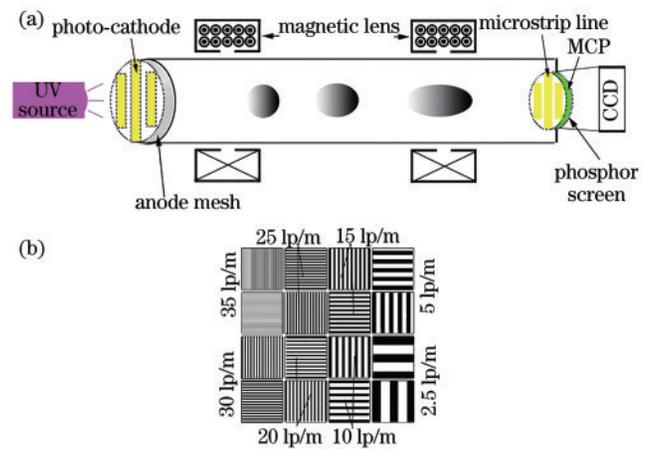


图 5 实验装置示意图与分划板结构。(a)空间分辨率实验装置结构图;(b)阴极分划板结构

Fig. 5 Diagram of experimental setup and grating structure. (a) Experimental setup of the spatial resolution measurement; (b) grating structure of the PC

3.1 空间分辨率测试

通过双透镜成像的中央阴极条带图像如图 6(a) 所示, 通过单透镜成像的中央阴极条带如图 6(b) 所

示。由于材料表面部分位置存在缺陷,图像某些位置出现黑斑并造成分划板图形的变形,变形部分不列入分辨率考察。图中圆点为系统的光轴,图 6(c)和图 6(d)分别为图 6(a)和图 6(b)方框部分分划板的强度 I 的分布。令 I_{\max} 为强度峰值, I_{\min} 为强度谷值,则图形的调制度 $M^{[25]}$ 可以表示为

$$M = \frac{\overline{I_{\max}} - \overline{I_{\min}}}{\overline{I_{\max}} + \overline{I_{\min}}} \quad (1)$$

根据式(1)求出不同离轴距离处 2 lp/mm 与 5 lp/mm 两组分划板的调制度,调制度随离轴距离变化

的曲线如图 7 所示。实验中,将 2 lp/mm 分划板调制度下降至 5% 处的离轴距离定义为有效工作面半径。在单透镜成像系统中,图像调制度随离轴距离增加而快速下降,5 lp/mm 分划板在离轴 15 mm 处的调制度低于 1%,而 2 lp/mm 分划板在离轴 15 mm 处的调制度低于 5%、离轴 20 mm 处下降至 1%,有效工作面的半径约为 15 mm。而在双透镜成像系统中,离轴位置的调制度得到了较为明显的改善,调制度在离轴 15 mm 之后才出现较为明显的下降,2 lp/mm 分划板在离轴 30 mm 处的调制度约为 5%,有效工作面的半径达 30 mm。

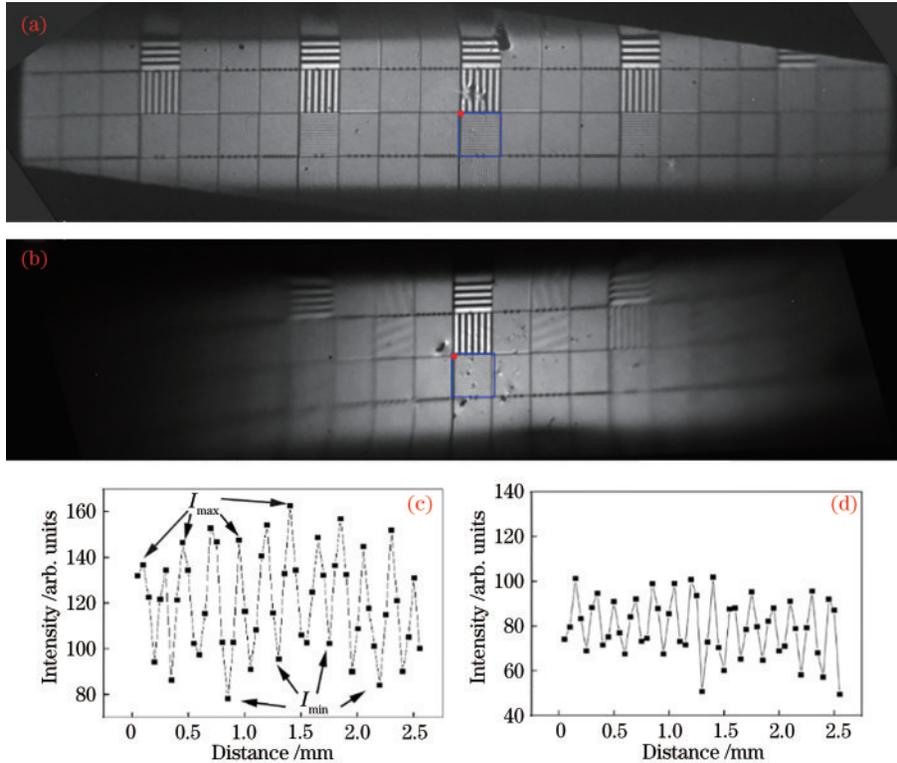


图 6 中央阴极条带图像及分划板强度分布。(a)双透镜中央阴极条带图像;(b)单透镜中央阴极条带图像;(c)双透镜方框部分分划板的强度分布;(d)单透镜方框部分分划板的强度分布。

Fig. 6 Middle PC images and corresponding grating intensity. (a) Middle PC image with double magnetic lenses; (b) middle PC image with single magnetic lens; (c) corresponding grating intensity of double magnetic lenses; (d) corresponding grating intensity of single magnetic lens

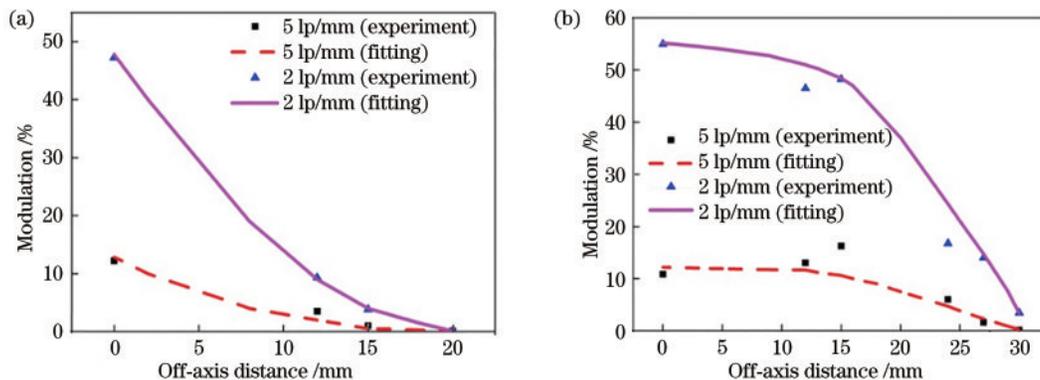


图 7 分划板调制度随离轴距离变化的曲线。(a)单透镜调制度变化曲线;(b)双透镜调制度变化曲线

Fig. 7 Modulation of the grating versus off-axis distance. (a) Modulation curve of the single lens; (b) modulation curve of the double lenses

3.2 场曲特性

造成调制度随离轴距离增加而下降的主要原因是像差使像场弯曲成一个曲面。磁透镜成像系统近轴部分的像场弯曲近似球面,曲率半径 $r_p^{[26]}$ 可以表示为

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

式中: B 是漂移区磁场强度; V 是阴极间加速电压; z 是轴向距离; e/m 为荷质比。

如图 8(a) 所示,通过追迹不同离轴距离物点发射的电子束轨迹在磁场中的情况,统计离轴像点的空间

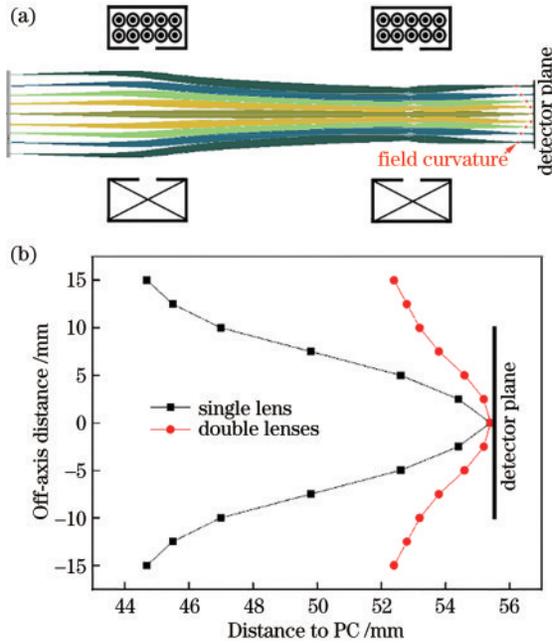


图 8 电子束运动轨迹与场曲。(a) 双磁透镜仿真电子轨迹; (b) 像场弯曲拟合
Fig. 8 Electron trajectory and field curvature. (a) Simulated electron trajectory of double magnetic lenses; (b) fitting of the field curvature

位置,可以对像场弯曲面的形状进行拟合。图 8(b) 为单透镜和双透镜在 2:1 缩放比率下的像场弯曲面形状。单透镜像场弯曲的情况较为严重,离轴 15 mm 处成像点(对应发射点离轴 30 mm)与轴上像点的轴向距离约为 11 cm;而双透镜则对场曲有良好的抑制效果,离轴 15 mm 处成像点与轴上像点的轴向距离约为 3 cm。双透镜使电子更多地通过磁场的近轴部分,因此具有较单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。

3.3 象散特性

通过改变探测器接收面的轴向位置,可以观测到同一发射点在探测面上电子散布的变化,使探测面与像场弯曲面相交于不同离轴距离,交点处即为最佳成像点。由于实验设备中 MCP 接收面与阴极之间的轴向距离相对固定,无法直接进行接收面平移,通过改变第二个线圈中的电流,使双透镜成像面发生轴向平移的方法实现这一目的,不同电流下的像场弯曲面位置如图 9(a) 所示。当线圈电流变化较小时,线圈电流导致的像场弯曲面形变可以忽略,这种方法将像场弯曲面与阴极物面之间的距离通过电流表示,两者之间的关系如图 9(b) 所示。

通过上述方法得到不同电流下探测面上的电子散布,如图 10 所示。图 10(a) 为轴上图像,轴上发射点在探测面上的电子散布在不同电流作用下均为旋转对称图形,在子午和弧矢方向上的空间分辨率相同,当探测面与像场弯曲面相交时,即电流约为 0.342 A 时,空间分辨率达到最佳。发射点离轴 8 mm 与离轴 20 mm 时电子散布图像分别如图 10(b) 与图 10(c) 所示,当电流较小时,电子向弧矢方向成像,随着电流逐渐增大,成像方向逐渐转变为子午方向,相较于离轴 8 mm,这种特性在离轴 20 mm 时表现得更加明显。

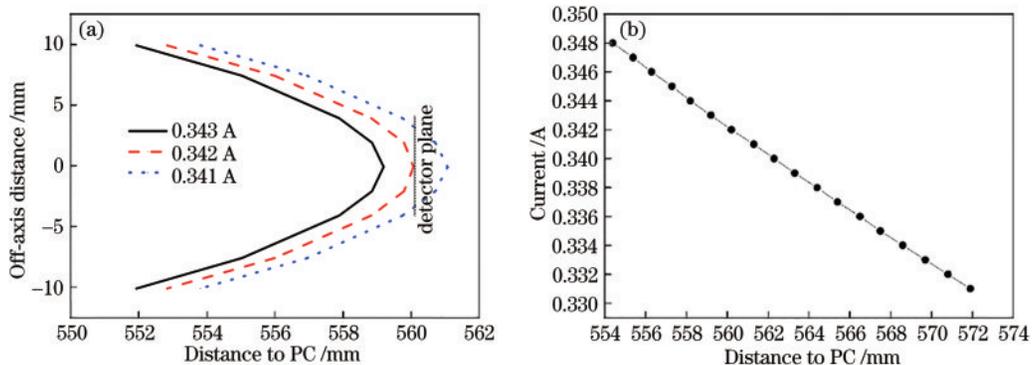


图 9 像场弯曲面与对应的参数关系。(a) 不同电流下的像场弯曲面; (b) 物像距离与线圈电流对应关系
Fig. 9 Curved surface of image field and corresponding parameter relationship. (a) Curved surface of image field under different currents; (b) corresponding relationship between object image distance and coil current

不同离轴位置发射点的电子向子午/弧矢两个不同方向成像,且对应成像电流随离轴位置变化而变化,表示成像面被分裂成两个,如图 11 所示。造成这一现

象的原因是象散,成像面在象散作用下分裂为子午像面和弧矢像面,两个像面仅在轴上像点处重合,空间分辨率也分为子午方向分辨率和弧矢方向分辨率,分别

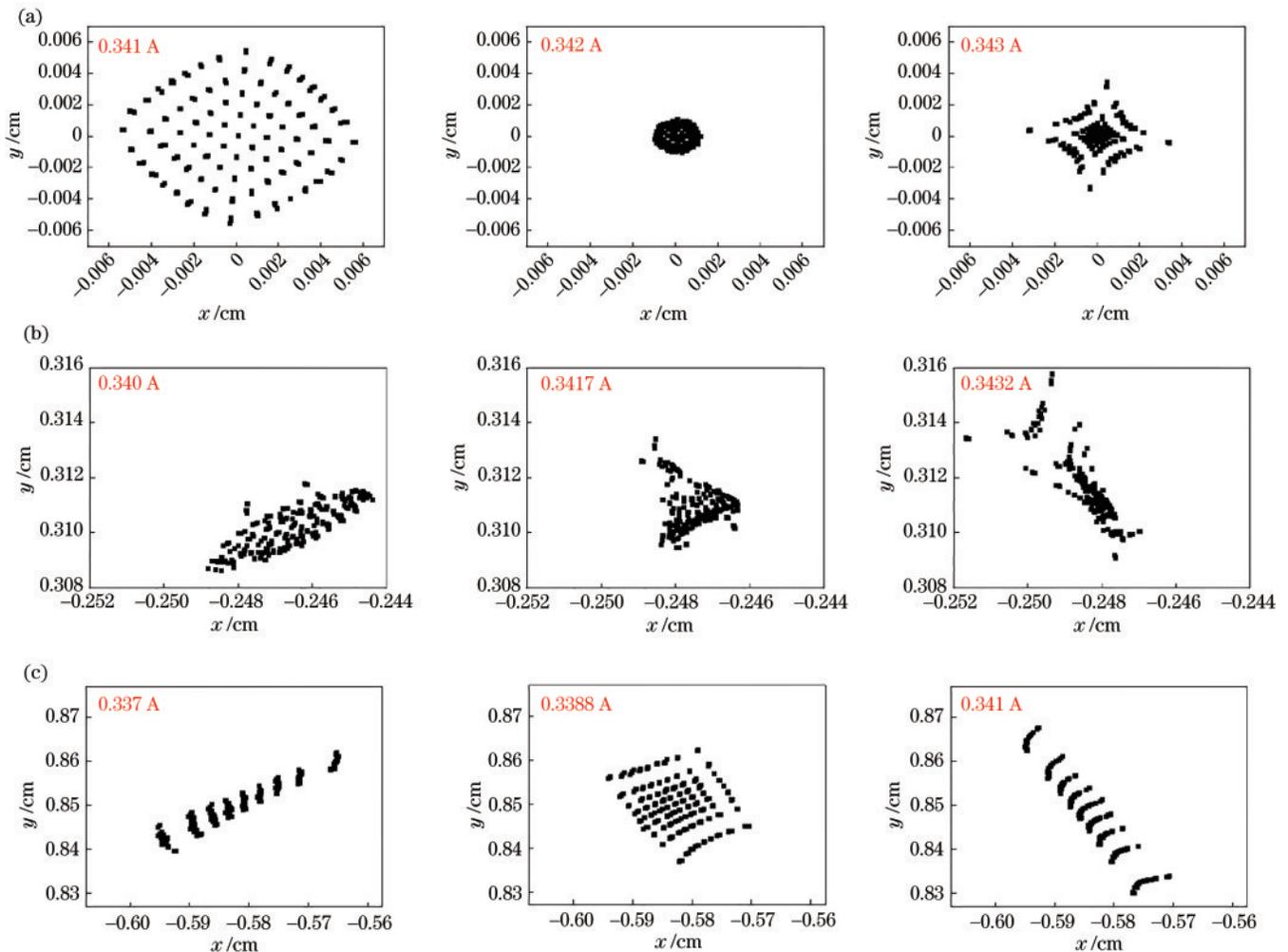


图 10 不同离轴距离发射点在接收面上的电子散布。(a)轴上发射点;(b)离轴 8 mm 发射点;(c)离轴 20 mm 发射点
 Fig. 10 Electron dispersion of imaging points on the receiving surface at different off-axis distances. (a) On-axis imaging point;
 (b) imaging point at 8-mm off-axis; (c) imaging point at 20-mm off-axis

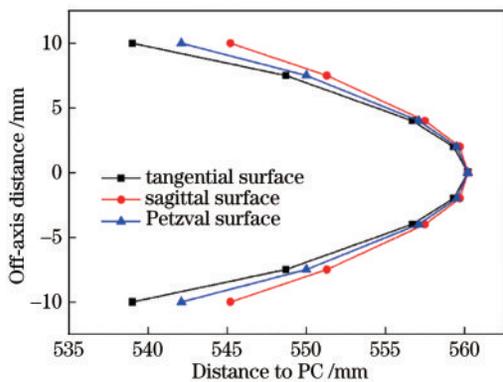


图 11 象散示意图
 Fig. 11 Diagram of the astigmatism

在子午像面和弧矢像面上达到最大值。子午像面和弧矢像面之间存在一个 Petzval 面,在该像面上子午空间分辨率等于弧矢空间分辨率,但均小于其成像过程中所能达到的最大值,因此象散也是造成离轴空间分辨率下降的重要原因。

图 12 为阴极中央条带在不同电流下的成像结果,

放大部分为 10 lp/mm 分划板。对于离轴距离最远的两组分划板(左起第 1 和第 4),当电流为 0.336 A 时,子午方向的图像可以分辨,而弧矢方向不能分辨,该电流处的成像方向为子午方向;当电流为 0.341 A 时,子午方向图像不能分辨,而弧矢方向图像可以分辨,成像方向转变为弧矢方向;当电流从 0.341 A 变化至 0.343 A 时,上述变化同样发生在离轴较近的两组分划板上(左起第 2 和第 3)。结果表明当离轴距离发生变化时,子午像面和弧矢像面之间的距离也发生变化。

不同离轴发射点的子午和弧矢空间分辨率随线圈电流变化的曲线如图 13 所示,图中的实线为理论数据,曲线的峰值分别为子午像面和弧矢像面上的空间分辨率,两条曲线的交点即为 Petzval 面上的空间分辨率。两条曲线峰值之间的距离随着离轴距离增加而增加,表明象散随离轴距离增大而增大。虚线为实验结果,在空间分辨率小于 10 lp/mm 的区域,实验结果和理论结果符合得很好,但是在理论值超过 10 lp/mm 区域,实验测得的数据则远小于理论值。原因是透镜成像比例为 2:1,行波选通变像管的极限空间分辨率约

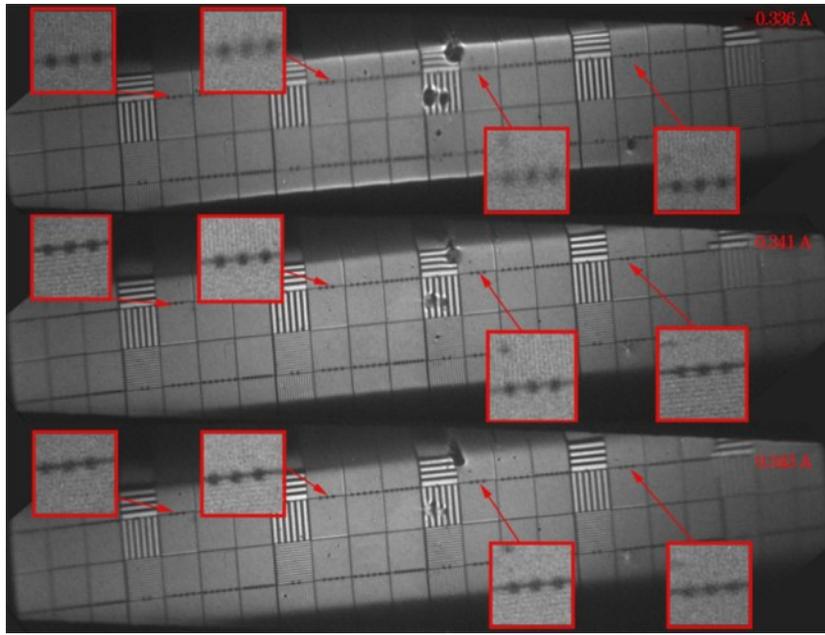


图 12 不同电流下阴极中央条带成像结果

Fig. 12 Middle PC images with different coil currents in second lens

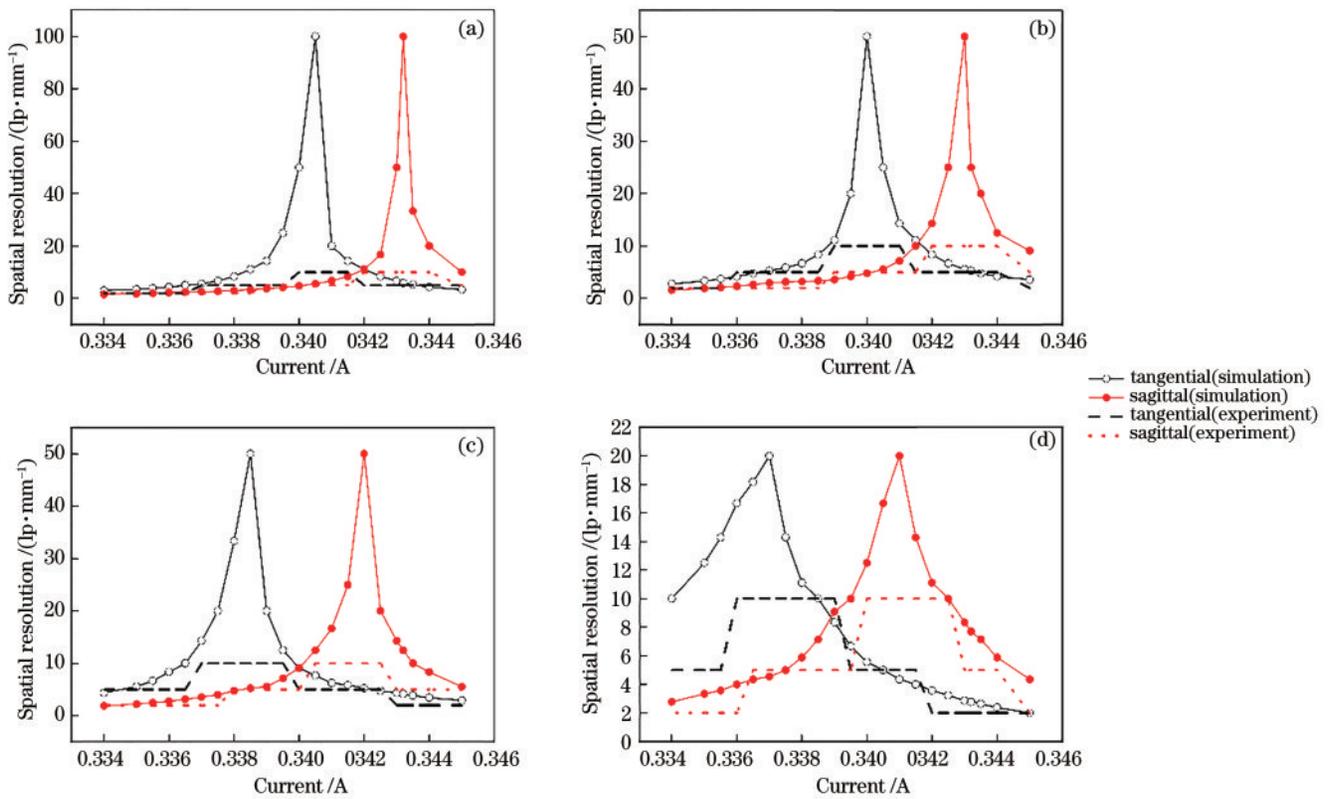


图 13 子午空间分辨率和弧矢空间分辨率随线圈电流变化的曲线。(a)离轴 4 mm 发射点;(b)离轴 8 mm 发射点;(c)离轴 15 mm 发射点;(d)离轴 20 mm 发射点

Fig. 13 Tangential and sagittal spatial resolutions versus the coil current in second lens. (a) Imaging point at 4-mm off-axis; (b) imaging point at 8-mm off-axis; (c) imaging point at 15-mm off-axis; (d) imaging point at 20-mm off-axis

为 20 lp/mm, 当阴极图像以 2:1 成像于行波选通变像管的 MCP 接收面后, 其在阴极的极限空间分辨率为 10 lp/mm, 因此无法观测到 10 lp/mm 以上的实验图像; 当子午和弧矢像面上的空间分辨率达到 10 lp/mm

时, 其在 Petzval 面上的空间分辨率为 5 lp/mm。

4 结 论

介绍了一种使用双磁透镜提升系统空间分辨率的

脉冲展宽型分幅相机,并对其空间分辨本领、场曲以及象散特性等进行了分析。相机采用分划板阴极对成像系统的空间分辨率和像差进行测量,缩放比为 2:1。在场曲的作用下,单磁透镜空间分辨率随离轴距离增加而快速下降,工作面的半径为 15 mm;双磁透镜有效降低了系统场曲,提升了离轴空间分辨率,工作面的半径为 30 mm。

此外,还对双磁透镜的象散特性进行了仿真和测试。理论分析表明,造成空间分辨率下降的另一个原因是象散将成像面分裂为子午像面和弧矢像面。在两个像面上,不同方向的图像具有不同的空间分辨率,即子午空间分辨率和弧矢空间分辨率,只有在 Petzval 面上这两个空间分辨率才能达到统一。实验结果表明,在弧矢和子午像面上,弧矢空间分辨率和子午空间分辨率能够达到 10 lp/mm,而在 Petzval 面上的空间分辨率将下降至 5 lp/mm。

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] 李成名, 李宾. 基于太赫兹调制的超快 X 射线脉冲长度复原方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0632001.
Li C M, Li B. Algorithm to reconstruct ultra-fast X-ray pulse based on terahertz modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0623001.
- [7] Kilkenny J D. High speed proximity focused X-ray cameras[J]. *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(1): 49-69.
- [8] Bell P M, Kilkenny J D, Hanks R L, et al. Measurements with a 35-psec gate time microchannel plate camera[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1346: 456-464.
- [9] 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.
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.
- [10] 付文勇, 蔡厚智, 王东, 等. 脉冲展宽 X 射线光电二极管的研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1032001.
Fu W Y, Cai H Z, Wang D, et al. Study on pulse-dilation X-ray diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1032001.
- [11] 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.
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.
- [12] Cai H Z, Fu W Y, Bai Y L, et al. Simulation of a dilation X-ray framing camera[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26(4): 043003.
- [13] Cai H Z, Fu W Y, Wang D, et al. Dilation X-ray framing camera and its temporal resolution uniformity[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2817-2827.
- [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]. *The Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10E116.
- [15] Atzeni S, Meyertervehn J. The physics of inertial fusion[J]. *Plasma Physics & Controlled Fusion*, 2004, 46: 1805.
- [16] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [17] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited) [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [18] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- [19] 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.
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.
- [20] 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.
- [21] 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.
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.
- [22] 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.
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.
- [23] 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.
- 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.
- [24] 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.
- 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.
- [25] Lei Y F, Liao Y B, Long J H, et al. Observation of electron beam moiré fringes in an image conversion tube [J]. Ultramicroscopy, 2016, 170: 19-23.
- [26] Klemperer O. Electron optics[M]. New York: Cambridge University Press, 1971: 203-206.