

【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

## 静电聚焦提升脉冲展宽分幅相机空间均匀性

朱云斐<sup>1,2</sup>, 白雁力<sup>1</sup>, 钟思<sup>3</sup>

1) 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西桂林 541004; 2) 桂林电子科技大学光电工程学院, 广西桂林 541004;  
3) 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西桂林 541004

**摘要:** 为提升脉冲展宽分幅相机的空间分辨均匀性, 利用静电聚焦等位面均匀和像面漂移小的特性, 采用静电透镜设计成像系统, 构建脉冲展宽分幅相机电场分布和成像特性的关系, 利用空间调制传递函数评估空间分辨率, 并通过将空间分辨率的数值波动转换为梯度变化百分比的形式, 对区域内的空间分辨率不均匀度进行定量描述. 研究表明, 等径双静电透镜成像系统能够增大探测区域, 并降低空间分辨率不均匀度, 满足脉冲展宽分幅相机向大面积探测的发展需求. 在漂移区长度为400 mm, 透镜孔径、轴向宽度和间距分别为200 mm、60 mm和210 mm的情况下, 为避免电极电压过高引起的等位面均匀性变差和电子能量弥散增加, 当第1和第2透镜电极分别加载-4.5 kV和10.0 kV电压时, 脉冲展宽分幅相机的有效探测区域半径可达21 mm, 离轴空间分辨率的波动范围为321.4~340.3  $\mu\text{m}$ , 探测区域内的空间分辨率不均匀度为 $(1.11 \times 10^{-4})\%$ , 均优于3磁透镜成像系统40.08~482.29  $\mu\text{m}$ 的波动范围和0.027%的不均匀度. 研究结论可为静电聚焦成像系统在脉冲展宽分幅相机中的应用提供理论基础, 有助于量化并提升空间分辨率的均匀性.

**关键词:** 惯性约束聚变; 超快诊断技术; 脉冲展宽分幅相机; 静电聚焦技术; 空间分辨均匀性; 空间调制传递函数

中图分类号: TN143

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.05548

## Electrostatic focusing in the improvement of spatial uniformity of pulse-dilation framing camera

ZHU Yunfei<sup>1,2</sup>, BAI Yanli<sup>1</sup>, and ZHONG Si<sup>3</sup>

1) School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi Province, P. R. China

2) School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi Province, P. R. China

3) School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi Province, P. R. China

**Abstract:** To improve spatial resolution uniformity of pulse-dilation framing camera, the imaging system of the pulse-dilation framing camera is designed using electrostatic lens, based on the characteristic of small image surface drift and homogeneous equipotential surface of the electrostatic focusing, the relation between the distribution of electric field and imaging characteristics is built, then the spatial resolution and the non-uniformity degree in the region are respectively estimated and quantitatively described by using the spatial modulation transfer function and converting

Received: 2023-10-08; Accepted: 2023-12-20; Online (CNKI): 2024-04-20

**Foundation:** National Natural Science Foundation of China (11865007); Natural Science Foundation of Guangxi Province (2022GXNSFAA035561); Director's Foundation of Guangxi Key Laboratory of Automatic Testing Technology and Instruments (YQ22101); Open-end Foundation of Guangxi Key Laboratory of Automatic Testing Technology and Instruments (GIP2210)

**Corresponding author:** Professor ZHONG Si (zhongsikm@qq.com)

**Citation:** ZHU Yunfei, BAI Yanli, ZHONG Si. Electrostatic focusing in the improvement of spatial uniformity of pulse-dilation framing camera [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(5): 548-555. (in Chinese)



the numerical fluctuation of spatial resolution into the form of gradient change percentage. The research results show that the detection area is increased and the non-uniformity degree is decreased using the imaging system of the double electrostatic lens with equal-diameter, which conforms to the development trend of large area detection. In the case, the length of drift region is 400 mm, the lens aperture, the axial width and the space between lenses are respectively 200 mm, 60 mm and 210 mm, to avoid the deterioration of isoplane uniformity and the increase of electron energy dispersion caused by excessive electrode voltage, when the first and second lens electrodes are respectively  $-4.5$  kV and  $10.0$  kV, the radius of the effective detection area for the pulse-dilation framing camera is 21 mm, the fluctuation range of the off-axis spatial resolution is  $321.4 \sim 340.3 \mu\text{m}$ , the spatial resolution non-uniformity degree is  $(1.11 \times 10^{-4})\%$ , which is superior to three magnetic lenses with the fluctuation range of  $40.08 \sim 482.29 \mu\text{m}$  and the non-uniformity degree of  $0.027\%$ . The study conclusion not only provides a theoretical basis for the feasibility of the imaging system of the electrostatic focusing in the pulse-dilation framing camera, but proposes a new idea to quantify and improve the spatial resolution uniformity.

**Key words:** inertial confinement fusion; ultrafast diagnostic technology; pulse-dilation framing camera; electrostatic focusing technique; spatial resolution uniformity; spatial modulation transfer function

微通道板(microchannel plate, MCP)分幅相机是具有  $60 \sim 100$  ps 时间分辨率的二维超快诊断设备<sup>[1-3]</sup>, 广泛应用于惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)诊断实验中的等离子体时空演化过程采集<sup>[4-5]</sup>. 为满足内爆聚变阶段对更短持续过程的探测需求<sup>[6-7]</sup>, 文献[8-9]将脉冲展宽技术和MCP分幅相机相结合, 设计由阴栅加速带、漂移区、MCP及荧光屏构成的脉冲展宽分幅相机, 该设备在阴栅加速带加载时变电场, 使先产生的光电子具有更快的加速度, 在通过漂移区后, 光电子束信号的时间宽度展宽. 采用MCP测量展宽后的信号, 以此使时间分辨率成倍提升. 由于脉冲展宽分幅相机具有优于  $10$  ps 的超快时间分辨率, 逐渐成为超快诊断技术领域的研究热点.

基于磁聚焦的脉冲展宽分幅相机, 具有易于实现不同倍率成像及像差小的特点, 其通常采用磁透镜设计成像系统, 根据透镜类型的不同, 可分为螺线管、短磁及长磁透镜3种. 在螺线管和长磁透镜方面, NAGEL等<sup>[10-11]</sup>采用4个直径为  $40$  cm、轴向宽度为  $8$  cm的螺线管透镜设计成像系统, WANG等<sup>[12]</sup>采用孔径为  $0.6$  m的长磁透镜包裹漂移区设计成像系统, 这两种系统类似均匀磁场, 通过增大磁场强度提升空间分辨率. 在长磁透镜的理论研究中, 虽然将磁场强度增大至  $0.5$  T能获得较好的空间分辨率, 但相机在探测区域内最高和最低的空间分辨率数值比约为  $1.45$ , 空间分辨率的均匀性并不理想. 在短磁透镜方面, BAI等<sup>[13-18]</sup>采用孔径为  $16$  cm、轴向宽度为  $10$  cm及漏磁缝隙为  $4$  mm的磁透镜设计成像系统, 考虑到这是一种轴对称非均匀磁

场, 虽然采用2个或3个透镜能获得较好的轴上空间分辨率, 但在探测区域内的空间分辨率数值比分别约为  $14.6$  和  $12.2$ <sup>[19]</sup>, 空间分辨率的均匀性非常差. 在磁聚焦成像系统研究中, 虽然通过增加磁场强度和透镜个数能获得较高的空间分辨率, 但由于不同离轴位置绕轴旋转运动的电子束聚焦特性不同, 导致相机的空间均匀性不甚理想, 并使系统体积和磁屏蔽难度增大. 因此, 探讨一种新型、轻便的成像系统, 对于提升脉冲展宽分幅相机的空间分辨性能与探测面积具有重要意义.

本研究采用等径双静电透镜设计成像系统, 探讨静电聚焦应用于脉冲展宽分幅相机中的可行性. 建立静电聚焦脉冲展宽分幅相机模型, 分析成像系统电场分布的多样性和电子运动轨迹特点; 研究电场分布对空间分辨性能的影响; 基于梯度和相对误差, 通过将空间分辨率波动趋势转换为梯度变化百分比的形式, 实现探测区域内空间分辨率不均匀度的量化.

## 1 静电聚焦脉冲展宽分幅相机成像原理

采用CST(computer simulation technology)软件建立的静电聚焦脉冲展宽分幅相机模型如图1. 模型主要由阴极、阳极、漂移区、MCP、荧光屏和等径双静电透镜构成, 其中, 阴极与阳极的间距为  $1$  mm; 漂移区长度为  $400$  mm; MCP与荧光屏的间距为  $0.5$  mm; 双静电透镜孔径、轴向宽度和间距分别为  $200$  mm、 $60$  mm和  $210$  mm.

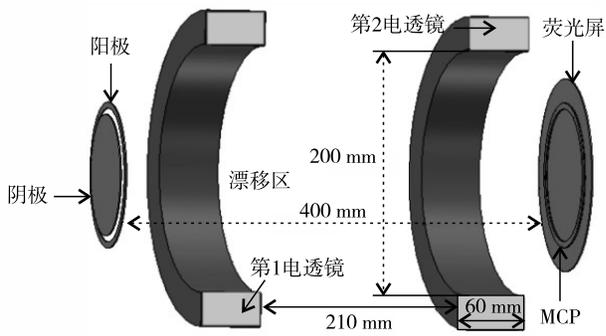


图1 静电聚焦脉冲展宽分幅相机模型

Fig. 1 Model of pulse-dilation framing camera using electrostatic focusing.

当第1和第2电透镜分别为负电极和正电极时，电场力方向、电场分布和电子轨迹如图2。由图2(a)可见，电场线(electric field line)方向由正电极指向负电极，而电场力 $F$ 方向则始终指向正电极；当电子处于 $P$ 处时，由于沿轴电场分力 $F_2$ 与电子运动方向一致，具有加速作用，而垂直于轴向的 $F_1$ 对电子则具有聚焦作用；当电子在 $P'$ 处时，电场力 $F'$ 仍指向正电极， $F'_2$ 对电子的作用与 $F_2$ 相同，而 $F'_1$ 则对电子具有发散作用。由图2(b)可见，由于电场分布曲线上仅在沿轴320 mm处存在1个零点，因此，电子在负电场作用下做加速运动，在正电场下做减速运动。基于电场力作用和电场分布特性，在漂移区中的电子运动轨迹如图2(c)，电子在负电极的第1电透镜附近聚焦，而在正电极的第2电透镜附近发散。

在第1和第2电透镜分别为正电极和负电极的情况下，漂移区内的电场力、电场分布和电子轨迹如图3。由图3(a)可见，电场线方向由正电极指向负电极，而电子受力方向则始终指向正电极；当电子处于 $P$ 处时，由于沿轴电场分力 $F_2$ 与电子运动方向相反，因此， $F_2$ 对电子具有减速作用，而 $F_1$ 对电子则具有发散作用；当电子在 $P'$ 处时， $F'_2$ 对电子的作用与 $F_2$ 相同，而 $F'_1$ 则对电子具有聚焦作用。由图3(b)可见，在电场分布曲线上，沿轴100 mm和320 mm处存在2个零点，因此，电子将经历加速-减速-加速的运动过程。漂移区的电子运动轨迹如图3(c)，电子在正电极的第1电透镜附近发散，而在负电极的第2电透镜附近聚焦。

## 2 空间分辨率计算方法

空间分辨率指能分辨两物点的最小距离，在电

<http://journal.szu.edu.cn>

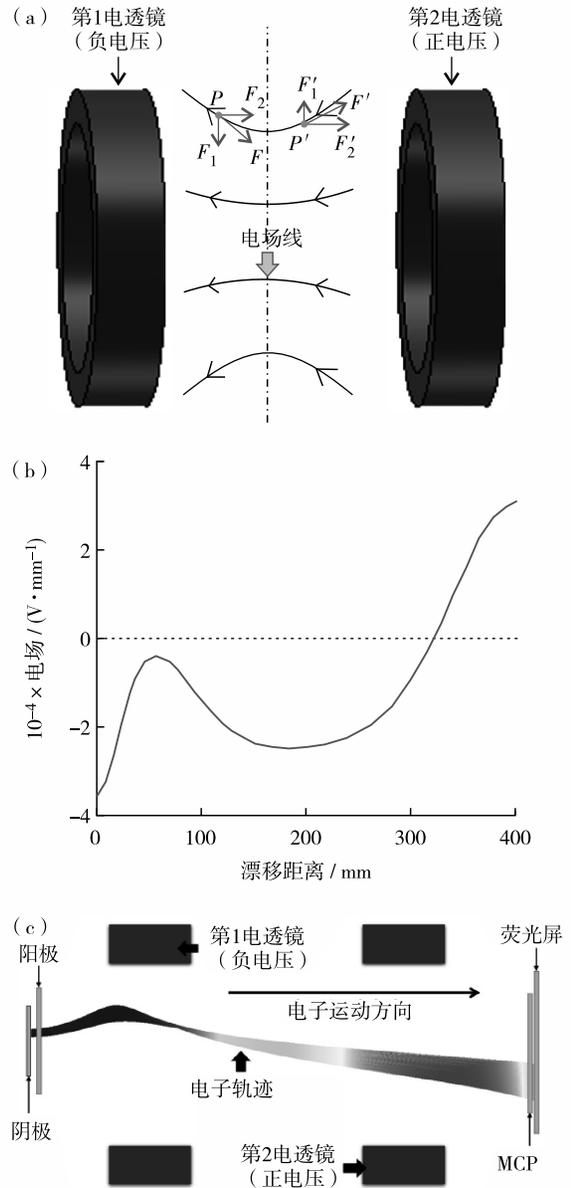


图2 静电聚焦特性分析 (a)电场线和电场力方向;(b)电场分布;(c)电子运动轨迹

Fig. 2 Characteristic analysis of electrostatic focusing.

(a) Electric field lines and direction of electric field forces, (b) electric field distribution, and (c) electronic motion trajectory.

子光学成像系统中，通常采用成像调制度下降到0.1时对应的空间频率标定<sup>[20]</sup>。由于脉冲展宽分幅相机的长漂移区结构和光电子初始参量的不同，因此，从阴极某一物点发射的若干个光电子，经过漂移区传输后，在荧光屏上不再是1个理想的像点，而呈现为1个弥散斑。所以，要获得脉冲展宽分幅相机的空间分辨率，则需要将弥散斑和空间调制传递函数结合，计算为

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (1)$$

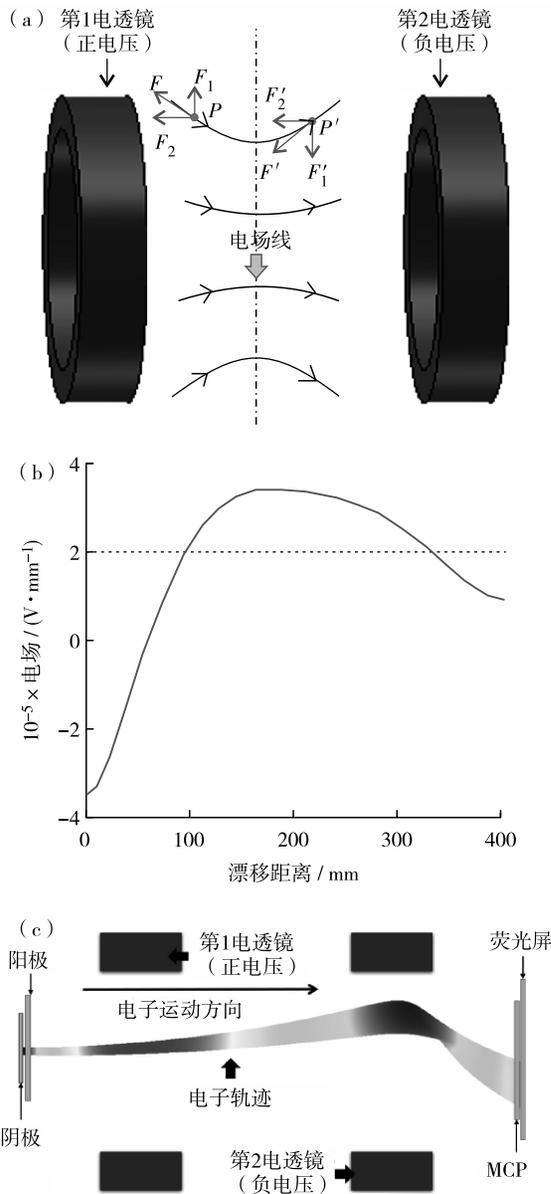


图3 静电聚焦特性分析 (a)电场线和电场力方向;(b)电场分布;(c)电子运动轨迹

Fig. 3 Characteristic analysis of electrostatic focusing. (a) Electric field lines and direction of electric field forces, (b) electric field distribution, and (c) electronic motion trajectory.

$$\Delta x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_0| \quad (2)$$

$$\Delta y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_0| \quad (3)$$

$$M = \exp[-(\pi \Delta r f)^2] \quad (4)$$

$$\delta = 1000/f \quad (5)$$

其中,  $\Delta r$ 为成像分布的均方根半径;  $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为电子落点相对于成像分布中心 $x_0$ 和 $y_0$ 的距离平均值;  $x_i$ 和 $y_i$ 为第 $i$ 个电子的落点坐标;  $x_0$ 和 $y_0$ 为成像分布中心;  $n$ 为光电子数目;  $M$ 为调制度;  $f$ 为空间

频率(单位: lp/mm);  $\delta$ 为空间分辨率(单位:  $\mu\text{m}$ ).

在计算空间分辨率的过程中, 阴极某一位置发射的若干光电子, 在成像系统作用下成像到荧光屏, 通过统计成像分布的电子落点坐标, 采用式(1)~式(3)计算 $\Delta r$ , 并由式(4)构建空间调制传递函数, 将调制度为0.1时的空间频率标定为极限空间频率, 通过式(5)将空间频率转换为与空间分辨率.

在图1的静电聚焦脉冲展宽分幅相机模型中, 当光电子初始能量满足 $0 \sim 0.6 \text{ eV}$ 的 $\beta(1,4)$ 分布、发射仰角满足 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的余弦分布, 方位角满足 $U(0^\circ, 180^\circ)$ 和初始位置满足0或1均匀分布, 且光电阴极电压为 $-4.0 \text{ kV}$ 、MCP电压为 $-0.7 \text{ kV}$ 、荧光屏电压为 $3.4 \text{ kV}$ 、漂移区长度为 $400 \text{ mm}$ , 以及第1和第2电透镜的电压分别为 $16.0 \text{ kV}$ 和 $-5.2 \text{ kV}$ 时, 从阴极轴上发射 $1 \times 10^4$ 个电子的成像分布如图4(a), 通过统计成像分布坐标, 采用式(1)至(3)计算 $\Delta r = 101.7 \mu\text{m}$ . 构建的空间调制传递函数曲线如图4(b), 当 $M = 0.1$ 时, 对应 $f = 4.75 \text{ lp/mm}$ , 即 $\delta = 210.4 \mu\text{m}$ .

### 3 电场分布对空间分辨率的影响

#### 3.1 不同电场分布下的空间分辨率分析

根据静电聚焦的成像原理和电子运动特性的多样性, 采用等径双静电透镜成像系统的脉冲展宽分幅相机, 其空间分辨性能与电场分布密切相关. 表1为等径双透镜的电极电压, 漂移区内的电场分布如图5(a), 当第1和第2电透镜分别为正电极和负电极时, 且第1电透镜电压由 $16.0 \text{ kV}$ 下降至 $2.0 \text{ kV}$ 、第2透镜电压由 $-5.2 \text{ kV}$ 提高至 $-4.7 \text{ kV}$ , 对应具有两个零点的电场分布曲线(A、B、C和D)为凸型抛物线, 其中, 最大电场强度由 $71.7 \text{ kV/mm}$ 下降至 $22.3 \text{ kV/mm}$ , 最小电场强度由 $-273.4 \text{ kV/mm}$ 提高至 $-105.3 \text{ kV/mm}$ ; 而当第1和第2电透镜分别为负电极和正电极时, 当第1电透镜电压由 $-4.1 \text{ kV}$ 提高至 $-4.9 \text{ kV}$ 、第2电透镜电压由 $3.0 \text{ kV}$ 提高至 $16.0 \text{ kV}$ , 对应的具有1个零点的电场分布曲线(E、F、G和H)为凹型抛物线, 其中, 最大电场强度由 $31.1 \text{ kV/mm}$ 提高至 $177.9 \text{ kV/mm}$ , 最小电场强度由 $-35.6 \text{ kV/mm}$ 下降至 $-70.9 \text{ kV/mm}$ .

基于图5(a)的8种不同电场分布形式, 从阴极轴上至离轴 $21 \text{ mm}$ 位置分别发射 $1 \times 10^4$ 个电子, 通

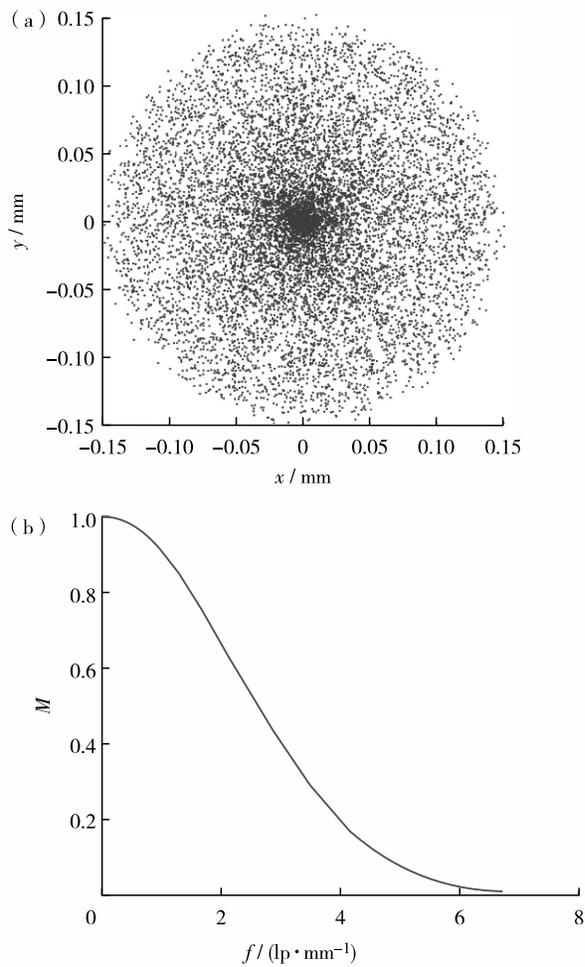


图4 空间分辨率计算 (a)阴极轴上的光电子成像分布; (b)空间调制传递函数曲线

Fig. 4 Spatial resolution calculation. (a) Photoelectron imaging distribution on the cathode axis, and (b) space modulation transfer function.

表1 等径双静电透镜的电压

Table 1 Voltage of the double electrostatic lenses with equal-diameter kV

分布曲线	第1电透镜	第2电透镜
A	16.0	-5.2
B	10.0	-5.1
C	5.0	-4.9
D	2.0	-4.7
E	-4.1	3.0
F	-4.9	5.0
G	-4.5	10.0
H	-4.4	16.0

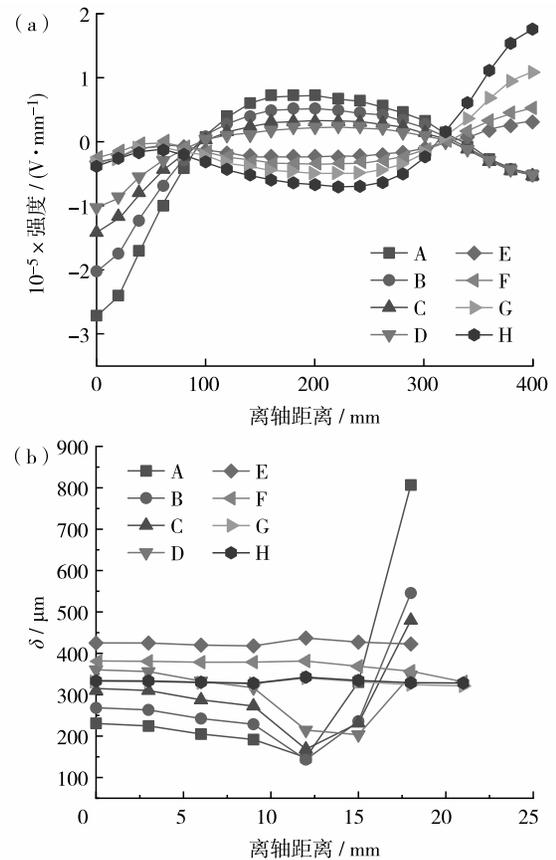


图5 电场对空间分辨率的影响 (a)电场分布对比; (b)空间分辨率对比

Fig. 5 Influence of electric field distribution on spatial resolution. Comparison of (a) electric field distribution and (b) spatial resolution.

过统计成像分布的坐标信息, 计算获得的空间分辨率对比见图5(b). 在第1和第2电透镜分别正电极和负电极情况下, 探测区域半径为18 mm, 当电场分布由A变化到D时, 轴上空间分辨率由230.7 μm下降至360.3 μm, 离轴18 mm的空间分辨率由807.0 μm提高至347.5 μm; 而在第1和第2透镜分别为负电极和正电极情况下, 随着电场分布由E变化到H, 探测区域半径由18 mm增大至21 mm, 轴上空间分辨率由425.2 μm提高至334.0 μm, 离轴21 mm的空间分辨率由331.3 μm提高至328.4 μm.

根据电场分布及其对应空间分辨率的分析结果可知, 随着电场分布由A变化至H, 探测区域半径由18 mm增大至21 mm, 考虑到静电透镜电极电压过大, 会引起等位面均匀性变差和电子能量弥散增加的情况出现, 因此, 电极电压尽量不高于10.0 kV. 当电场分布为G时, 脉冲展宽分幅相机离轴0~21 mm的整体空间分辨率可认为达到最优,

即 332.4、331.6、329.0、326.8、340.3、331.6、324.5 和 321.4  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 空间分辨率不均匀度分析

脉冲展宽分幅相机的空间分辨率不均匀度是指在探测区域内, 轴上和离轴位置之间的空间分辨率波动程度, 是评价空间分辨性能优劣的重要指标. 由于采用标准差或方差, 评价具有一定规律的空间分辨率曲线波动程度时的直观性不足, 而对于二维曲线而言, 梯度也可用于描述曲线在某一位置的变化率或波动程度. 通过计算二维曲线上所有位置的梯度, 能实现对曲线整体变化量或波动程度的表征. 相对误差表示测量值的绝对误差与理想值之间的比值. 因此, 本研究通过将离轴空间分辨率波动转换为梯度变化百分比的无量纲形式, 对探测区域内的空间分辨率不均匀度进行量化.

在探测区域内采用高阶多项式函数, 将离轴空间分辨率的离散点拟合为连续曲线, 计算空间分辨率曲线值与梯度之间的关系, 即

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 + 1\right]\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

其中,  $f(x, y)$  为高阶多项式曲线函数;  $\nabla f(x, y)$  为曲线数值的梯度. 计算曲线在区间  $[a, b]$  的梯度总和, 即

$$U = \int_a^b |\nabla f(x, y)| dx \quad (7)$$

其中,  $U$  在数值上为曲线长度, 用于表示空间分辨率曲线的整体变化量或波动程度. 采用相对误差将空间分辨率的梯度量转换为百分比的形式, 以此量化探测区域内空间分辨率的不均匀度. 相对误差计算为

$$\gamma = \frac{U - U_i}{U_i} \times 100\% \quad (8)$$

其中,  $\gamma$  为相对变化率, 其数值越小, 表示探测区域内空间分辨率的均匀性越好;  $U_i$  为理想情况下的空间分辨率曲线变化量 (通常为曲线长度, 即直线).

当电场分布为 G 时, 计算得到探测区域离轴 0 ~ 21 mm 内的空间分辨率曲线如图 6(a). 空间分辨率曲线的梯度最大相对变化率 (即空间分辨率不均匀度) 为  $(1.11 \times 10^{-4})\%$ . 电场 A—H 分布下的空间分辨率不均匀度对比如图 6(b). 其中, 电场 A—

E 分布的探测区域半径为 18 mm, 不均匀度分别为 0.211 0%、0.084 7%、0.055 1%、0.020 2% 及  $(1.67 \times 10^{-4})\%$ ; 电场 F—H 分布的探测区域半径为 21 mm, 不均匀度分别为  $(6.67 \times 10^{-4})\%$ 、 $(1.11 \times 10^{-4})\%$  和  $(4.76 \times 10^{-5})\%$ . 随着第 1 透镜的电极电压由 16.0 kV 变化至 -4.4 kV、第 2 透镜的电压由 -5.4 kV 变化至 16.0 kV, 脉冲展宽分幅相机探测区域逐渐变大, 在空间分辨率提升的同时, 不均匀度逐渐降低. 当电场分布为 G 时, 静电聚焦与文献 [19] 的 3 磁透镜成像系统的空间分辨率及不均匀度对比如表 2. 可见, 随着离轴位置增加至 21 mm, 静电透镜空间分辨率的波动范围非常小, 其最优和最差值分别为 321.41  $\mu\text{m}$  和 340.30  $\mu\text{m}$ ; 3 磁透镜成像系统的空间分辨率波动非常大, 由 40.08  $\mu\text{m}$  变至 482.29  $\mu\text{m}$ .

由于离轴 3 mm 探测区域较小, 因此, 暂不考虑此区域内的空间分辨率不均匀度. 当探测区域半径为 6 mm 时, 静电透镜和 3 磁透镜系统的不均匀

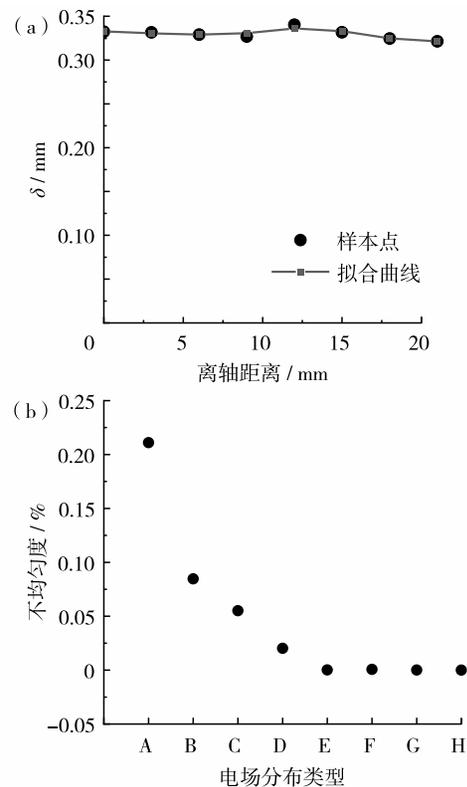


图 6 空间分辨率不均匀度分析 (a) 电场 G 的空间分辨率及其拟合曲线; (b) 不同电场下的空间分辨率不均匀度对比

Fig. 6 Analysis of spatial resolution non-uniformity. (a) Spatial resolution and its fitting curve under electric field G and (b) comparison of spatial resolution non-uniformity under different electric fields. The solid circles are for sample data. The solid line with squares is for fitting curve.

度分别为  $(1.68 \times 10^{-5})\%$  和  $0.0043\%$ ; 随着探测区域半径增加至 21 mm, 二者的不均匀度分别变化  $(1.11 \times 10^{-4})\%$  和  $0.027\%$ . 可见, 3 磁透镜系统具有的强聚焦磁场和较小像差, 使相机在小探测区域内具有较好的空间分辨率, 但由于 3 磁透镜对旋转绕轴运动的离轴电子束聚焦不一致, 随着探测区域变大, 离轴空间分辨率明显下降, 导致空间分辨率的不均匀度增大. 虽然双静电透镜系统由于聚焦能力和像差的不足, 导致小探测区域内的空间分辨率较磁透镜差, 但其具有的电子轨迹不旋转、像面漂移程度小和等位面均匀等优点, 使相机在大探测区域内具有良好的整体空间分辨率及较小的不均匀度.

表2 静电聚焦与 3 磁聚焦成像系统空间分辨率及其不均匀度对比

Table 2 Spatial resolution and non-uniformity degree comparison between electrostatic and three magnetic focusing systems

离轴距 离/mm	空间分辨率/ $\mu\text{m}$		探测区域不均匀度/%	
	静电透镜	3 磁透镜	静电透镜	3 磁透镜
0	332.42	40.08		
3	331.60	63.67		
6	329.05	87.72	$1.68 \times 10^{-5}$	0.0043
9	326.80	125.68	$4.58 \times 10^{-5}$	0.0068
12	340.30	185.19	$6.04 \times 10^{-5}$	0.0111
15	331.64	268.08	$8.61 \times 10^{-5}$	0.0163
18	324.54	370.37	$1.12 \times 10^{-4}$	0.0214
21	321.41	482.29	$1.11 \times 10^{-4}$	0.0268

## 结 语

采用等径双静电透镜设计脉冲展宽分幅相机成像系统, 分析静电聚焦的成像原理、电场分布特性和电子运动类型多样性, 通过追踪电子运动轨迹和统计成像分布, 采用空间调制传递函数计算空间分辨率, 并通过梯度和相对标准差量化空间分辨率不均匀度. 研究结果表明, 静电聚焦成像系统的电场分布能有效提升探测区域内的空间分辨率均匀性, 能满足脉冲展宽分幅相机向大面积探测的发展要求. 在漂移区长度为 400 mm, 阴极电压为  $-4.0$

kV, 双透镜的孔径、轴向宽度和间距分别为 100 mm、60 mm 和 210 mm 情况下, 为避免电极电压过高引起的等位面均匀性变差和电子能量弥散增加, 当第 1 和第 2 透镜电极电压为  $-4.5$  kV 和 10.0 kV 时, 脉冲展宽分幅相机的有效探测区域半径达到 21 mm, 空间分辨率波动范围为  $321.4 \sim 340.3 \mu\text{m}$ , 整体不均匀度为  $(1.11 \times 10^{-4})\%$ , 优于 3 磁透镜成像系统  $40.08 \sim 482.29 \mu\text{m}$  的空间分辨率波动范围和  $0.027\%$  的不均匀度. 研究结论不仅为静电聚焦成像系统在脉冲展宽分幅相机中的应用可行性提供理论基础, 而且为空间分辨率均匀性的提升和量化提供新思路和新手段. 在后续工作中, 一方面将针对双静电透镜成像系统空间分辨率的不足, 通过改进透镜的结构和数目, 在提高聚焦能力和减小像差的同时, 逐步提升脉冲展宽分幅相机的空间分辨性能; 另一方面, 将探讨静电聚焦与电子束时间展宽之间的物理机制, 并分析不同电场对脉冲展宽分幅相机时间分辨性能的影响, 为后期实验研究的展开奠定良好理论基础.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11865007); 广西省自然科学基金资助项目(2022GXNSFAA035561); 广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金资助项目(YQ22101); 广西自动检测技术与仪器重点实验室开放基金资助项目(GIIP2210)

作者简介: 朱云斐(471073257@qq.com), 桂林电子科技大学硕士研究生. 研究方向: 超快诊断技术.

引 文: 朱云斐, 白雁力, 钟思. 静电聚焦提升脉冲展宽分幅相机空间均匀性[J]. 深圳大学学报理工版, 2024, 41(5): 548-555.

## 参考文献 / References:

- [1] SCHNEIDER M B, JONES O S, MEEZAN N B, et al. Images of the laser entrance hole from the static x-ray imager at NIF [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E538.
- [2] JIANG Shaoen, WANG Feng, DING Yongkun, et al. Experimental progress of inertial confinement fusion based at the ShenGuang-III laser facility in China [J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(3): 032006.
- [3] 田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 32-48.  
TIAN Jinshou. Introduction to development of streak and framing cameras [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 32-48. (in Chinese)
- [4] 王峰, 张兴, 理玉龙, 等. 激光惯性约束聚变研究中高时空诊断技术研究进展[J]. 强激光与粒子束,

- 2020, 32(11): 16-31.
- WANG Feng, ZHANG Xing, LI Yulong, et al. Progress in high time- and space-resolving diagnostic technique for laser-driven inertial confinement fusion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(11): 16-31. (in Chinese)
- [ 5 ] TOMMASINI R, LANDEN O L, HOPKINS L B, et al. Time-resolved fuel density profiles of the stagnation phase of indirect-drive inertial confinement implosions [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(15): 155003.
- [ 6 ] ZYLSTRA A B, HURRICANE O A, CALLAHAN D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion [J]. *Nature*, 2022, 601(7894): 542-548.
- [ 7 ] ABU-SHAWAREB H, ACREE R, ADAMS P, et al. Lawson criterion for ignition exceeded in an inertial fusion experiment [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(7): 075001.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 伍思其, 白雁力, 高海英, 等. 脉冲叠加技术提升脉冲展宽分幅相机时间均匀性[J]. *光学学报*, 2023, 43(5): 253-258.
- WU Siqi, BAI Yanli, GAO Haiying, et al. Improvement of temporal uniformity of pulse-dilation framing camera using pulse superposition technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 253-258. (in Chinese)
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] WANG Qiangqiang, CAO Zhurong, CHEN Tao, et al. Theoretical study on temporal and spatial performance of magnetic solenoid used in dilation x-ray imager [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(7): 073302.
- [ 13 ] BAI Yanli, YAO Rongbin, GAO Haiying, et al. Achieving a large detector sensitive area of short magnetic focusing pulse-dilation framing tube using a combination lens [J]. *Optik*, 2019, 178: 1097-1101.
- [ 14 ] CAI Houzhi, FU Wenyong, WANG Dong, et al. Synchronous gating in dilation x-ray detector without 1:1 image ratio [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12470-12482.
- [ 15 ] YAO Rongbin, BAI Yanli, GAO Haiying, et al. Performance evaluation of the imaging system of a pulse-dilation framing camera [J]. *Optik*, 2019, 184: 253-258.
- [ 16 ] LIU Jinyuan, FU Wenyong, WANG Dong, et al. Simulation of the static spatial resolution characteristics for a dilation imager with long magnetic focusing lens [J]. *Optik*, 2020, 204: 163506.
- [ 17 ] LI Xiaodong, BAI Yanli. Influence of lens aperture size on spatial performance of short magnetic focusing framing camera [J]. *Optik*, 2020, 202: 163659.
- [ 18 ] LUO Qiuyan, LIN Kaixuan, CHEN Jiajie, et al. Theoretical study of the spatial resolution characteristics of magnetic focusing framing tubes [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, 50(11): 4660-4666.
- [ 19 ] 罗秋燕, 林楷宣, 陈嘉杰, 等. 脉冲展宽X射线分幅相机空间分辨特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(23): 120-126.
- LUO Qiuyan, LIN Kaixuan, CHEN Jiajie, et al. Research on spatial resolution characteristics of pulse dilation X-ray framing camera [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(23): 120-126. (in Chinese)
- [ 20 ] 周立伟, 艾克聪, 方二伦. 成象系统的电子光学调制传递函数与均方根半径的研究[J]. *北京工业学院学报*, 1982(3): 36-51.
- 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)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 溯心】