

# 激光与光电子学进展

## 脉冲展宽 X 射线分幅相机空间分辨特性研究

罗秋燕<sup>1</sup>, 林楷宣<sup>1</sup>, 陈嘉杰<sup>1</sup>, 王佳恒<sup>1</sup>, 黄峻堃<sup>1</sup>, 付文勇<sup>2\*</sup>, 蔡厚智<sup>1</sup>, 刘进元<sup>1</sup>

<sup>1</sup>深圳大学物理与光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060;

<sup>2</sup>南阳理工学院计算机与信息工程学院, 河南 南阳 473500

**摘要** 采用蒙特卡罗方法、有限差分法和有限元法, 对脉冲展宽分幅相机的空间分辨特性进行了理论模拟和研究。光电阴极(PC)产生的电子脉冲首先通过脉冲展宽装置轴向拉伸, 然后通过三个短磁透镜组成的成像系统成像到微通道板上。当相机成像倍率为 1:1 时, 电子脉冲发射位置在 PC 面直径 15 mm 范围内, 相机的空间分辨率大于 10 lp/mm。最后研究了相机空间分辨率与电子脉冲的发射位置、PC 偏置电压、短磁透镜数量之间的关系, 结果显示, 空间分辨率与电子脉冲的发射位置、PC 偏置电压、短磁透镜数量正相关。

**关键词** 成像系统; 惯性约束聚变; 分幅相机; 脉冲展宽; 空间分辨率

中图分类号 TN143; O536

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2311001

### Research on Spatial Resolution Characteristics of Pulse Dilation X-Ray Framing Camera

Luo Qiuyan<sup>1</sup>, Lin Kaixuan<sup>1</sup>, Chen Jiajie<sup>1</sup>, Wang Jiaheng<sup>1</sup>, Huang Junkun<sup>1</sup>, Fu Wenyong<sup>2\*</sup>,  
Cai Houzhi<sup>1</sup>, Liu Jinyuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

<sup>2</sup>College of Computer and Information Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473500, Henan, China

**Abstract** In this study, we theoretically studied and simulated the spatial resolution characteristics of a pulse dilation framing camera using Monte Carlo, finite difference, and finite element methods. The electronic pulses produced by the photo-cathode (PC) are first axially stretched through the pulse dilation device and then imaged on a microchannel plate using an imaging system consisting of three short magnetic lenses. When the imaging ratio is 1 : 1 and the position of the electronic pulse emission is within 15 mm of the diameter of the PC surface, the spatial resolution is better than 10 lp/mm. Furthermore, we studied the relationship between spatial resolution and electronic pulse emission position, PC bias voltage, and the number of short magnetic lenses. Our results show that the spatial resolution is positively correlated with the emission position of electron pulse, PC bias voltage, and the number of short magnetic lenses.

**Key words** imaging systems; inertial confinement fusion; framing camera; pulse dilation; spatial resolution

## 1 引言

惯性约束聚变(ICF)的研究主要有靶物理论、靶物实验、制靶、驱动器和超快诊断等方面<sup>[1-4]</sup>。传统微通道板选通分幅相机时间分辨率通常在 35~100 ps 之间<sup>[5]</sup>, 分幅相机因同时具有高时间分辨率和

二维空间分辨的优点, 而成为研究 ICF 的重要诊断器件之一<sup>[6-8]</sup>。采用脉冲展宽技术可以将相机的时间分辨率提高一个数量级<sup>[9-11]</sup>, 2010 年, 美国 Lawrence Livermore 实验室将电子脉冲展宽技术加入传统微通道板选通分幅相机中, 并采用长磁透镜聚焦成像方式, 成功研制出了时间分辨率达到 5 ps、系统空间分

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-10-29; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(11775147)、广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515011474, 2019A1515110130)、深圳市科技计划项目(JCYJ20200109105201936, JCYJ20190808115605501)

通信作者: \*35023860@qq.com

分辨率大于 300  $\mu\text{m}$  的脉冲展宽型分幅相机。2016 年,深圳大学超快诊断团队利用电子脉冲展宽技术,并采用短磁透镜聚焦成像方式,研制出时间分辨率为 4 ps、系统近轴区域空间分辨率大于 110  $\mu\text{m}$  的脉冲展宽型 X 射线分幅相机<sup>[12-13]</sup>。但是,采用电子束脉冲展宽技术来提高相机时间分辨率,通常是以降低空间分辨率作为代价的。为了使相机获得更高的空间分辨率,就需要采用磁聚焦透镜对漂移区的电子团进行约束成像,因此有必要研究影响相机空间分辨率的相关因素。

本文采用蒙特卡罗方法、有限差分法和有限元法,

理论模拟了成像倍率为 1:1,由三个短磁透镜组合而成的脉冲展宽 X 射线分幅相机,并对相机的空间分辨特性进行理论研究。

## 2 脉冲展宽 X 射线分幅相机系统结构与工作原理

脉冲展宽 X 射线分幅相机的系统结构原理如图 1 所示,由光电阴极、阳极栅网、脉冲展宽装置、磁聚焦透镜成像系统、CCD 等组成。光电阴极具有将入射光转换为光电子和微带线的两个功能,可用于传输高压斜坡脉冲<sup>[14]</sup>。

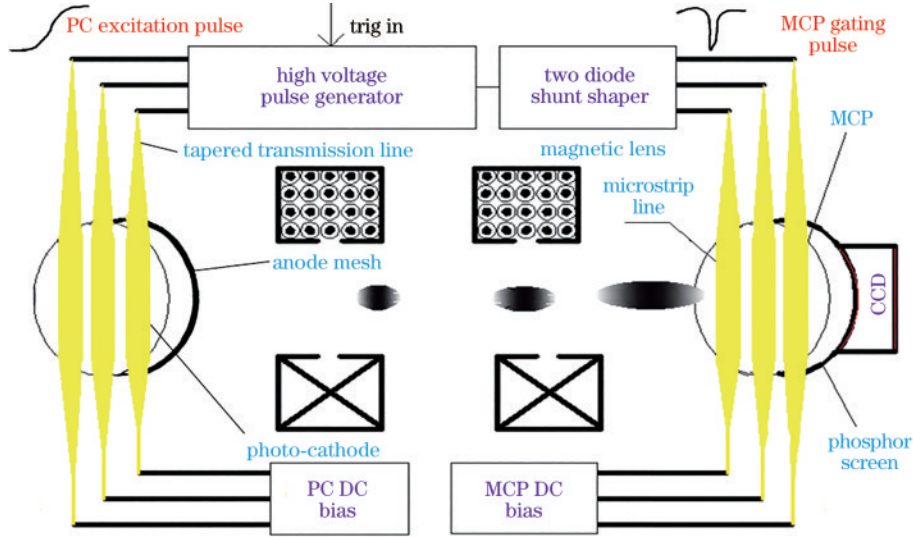


图 1 脉冲展宽分幅相机结构原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulsed dilation framing camera structure

相机阴极加载有负直流电压和高压斜坡脉冲,能够在光电阴极与阳极栅网产生随时间变化的电场,所产生的能量色散导致电子束团在穿过漂移区域时轴向拉伸,从而使得电子束团在空间上得到展宽。但是,光电子在漂移区域传输的过程中将会导致其在空间上散焦,因此需要采用短磁聚焦透镜对电子束团进行约束,随后微通道板(MCP)选通、增强电子束团,并轰击荧光屏被 CCD 记录。此外,脉冲展宽分幅相机为大口径的成像系统,相机成像结果受场曲影响较大,因此离中心位置越远,其空间分辨率越差。

## 3 空间分辨特性计算方法

脉冲展宽分幅相机成像的模拟过程为:1)设置初始条件,包括阴极电压、磁聚焦透镜参数、计算时间步长、初始电子个数、脉冲宽度等;2)采用蒙特卡罗法对光电阴极电子初始能量分布进行抽样计算;3)计算空间电荷效应及磁场产生的加速度;4)采用四阶 Runge-Kutta 法,结合电子落点处的电场分布、电子加速度,计算电子运动轨迹;5)若有电子未到达成像面,则需要重新计算电场及电子轨迹。

### 3.1 光电阴极电子初始能量分布

光电阴极电子的初始能量  $\xi$  一般服从  $\beta(k, l)$  分布<sup>[15]</sup>,其概率密度函数为

$$N(\xi) = \frac{(k+l+1)!}{k!l!} \xi^k (1-\xi)^l, \quad (1)$$

式中: $k$ 为已产生光电子的光子数,取正整数; $l$ 为未产生光电子的光子数,取正整数; $\xi$ 为产生光电子的概率; $N(\xi)$ 为入射  $(k+1)$  个光子产生  $k$  个光电子的概率,这里取  $\beta(1, 4)$  分布,并通过蒙特卡罗方法对光电子进行抽样。

### 3.2 空间电荷效应

任意时刻、任一个电子  $i$  受到的空间电荷作用力等于其余电荷与它的电场力之和,即

$$\mathbf{F}_i(t) = K \cdot e^2 \cdot \sum_{i \neq j} \frac{\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)}{|\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)|^3}, \quad (2)$$

式中: $K$ 为库仑常数; $e$ 为电子电荷量。

### 3.3 电子轨迹计算

光电阴极微带线是条带结构,在计算阴栅之间的电场时采用有限差分法<sup>[16-17]</sup>。对电子轨迹的计算以微分方程形式给出电子运动规律、电磁场分布和轨迹作

为初始条件,利用四阶 Runge-Kutta 法计算电子的运动轨迹<sup>[18-21]</sup>,在计算电子落点处的电场强度时采用两点拉格朗日插值法,在计算空间电荷效应产生的电场时采用库仑定律,在计算磁场产生的加速度时采用洛伦兹公式,最后再将所有加速度项相加得出电子总的加速度。求得所有电子在整个运动过程中的轨迹后,就可得到整个电子运动过程中的状态以及最终落在 MCP 输入面上的位置。由电子运动轨迹可以得到电子的落点位置,然后由电子的落点位置结合成像系统的调制传递函数(MTF)可以计算出相机的空间分辨率。

目前广泛采用 Csorba<sup>[22]</sup>提出的基于电子光学调制传递函数的方法进行计算。成像系统的调制传递函数为

$$MTF(f) = \exp[-(\pi\rho f)^2], \quad (3)$$

式中: $f$ 为空间频率; $\rho$ 值对应于电子在最佳像面上落点弥散斑的均方根半径 $\Delta r$ ,是电子在像面上的集中程度。通常将调制对比度降至10%时所对应的空间频率看作系统的极限空间分辨率。

#### 4 空间分辨特性模拟结果

采用三个短磁透镜组合方式进行电子束成像,设定每个短磁聚焦透镜长为10 cm,内直径为16 cm,外直径为25.6 cm,内侧狭缝宽度为0.4 cm,线圈匝数为1320,阴极电压为-3 kV,三个短磁透镜的中心位置与PC距离分别为12.3 cm、28.0 cm和43.0 cm,短磁透镜电流分别为 $I_1=0.260$  A, $I_2=0.200$  A, $I_3=0.250$  A,获得轴线上的磁场强度与位置的关系如图2所示,在轴上,磁场强度分布出现三个峰值,实际测量值与理论值基本一致。

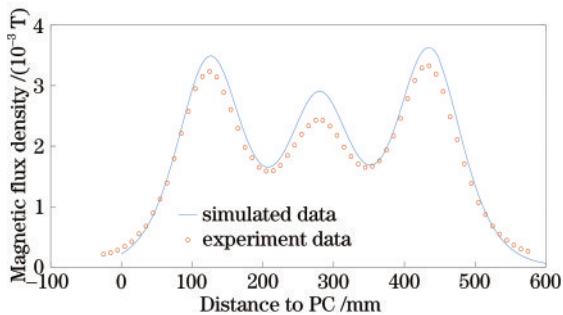


图2 轴上磁场强度与位置的关系

Fig. 2 Relationship between magnetic field intensity and position on axis

电子从PC原点发射,在漂移区内(PC到MCP)运动过程中的三维电子轨迹如图3所示,电子运动轨迹的XY截面如图4所示,YZ截面如图5所示。由图4、图5可知,当电子在阴极原点位置发射时,成像点位于MCP输入面的中心位置。MCP输入面电子落点位置图像如图6所示。

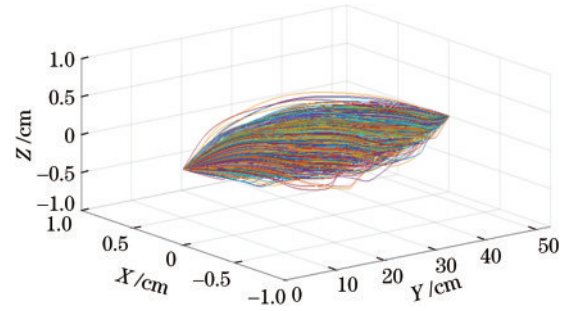


图3 电子三维轨迹

Fig. 3 Electronic three-dimensional trajectory

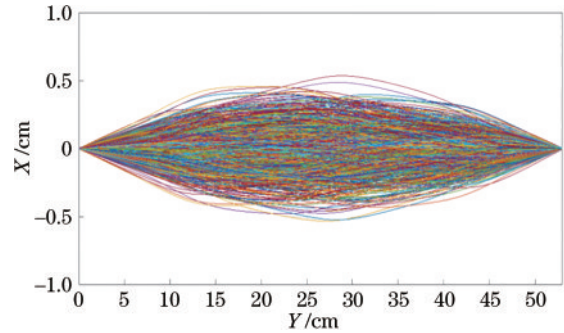


图4 XY截面电子轨迹

Fig. 4 Electron trajectories in XY cross section

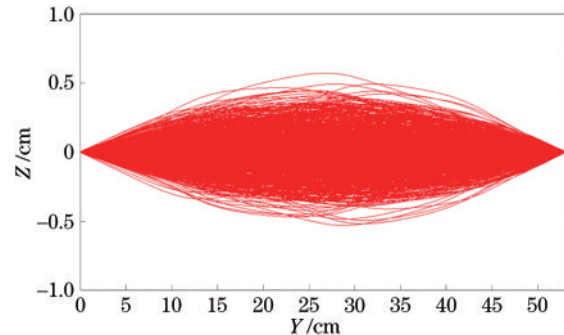


图5 YZ截面电子轨迹

Fig. 5 Electron trajectories in YZ cross section

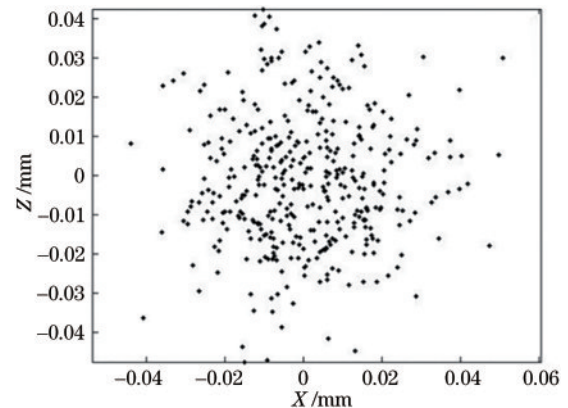


图6 电子在阴极中心处发射时MCP输入面电子落点位置  
Fig. 6 Position of electron drop point on MCP input surface when electrons are emitted at the center of cathode

#### 4.1 成像位置与发射位置关系

电子分别从阴极坐标(3,0)、(2,0)、(1,0)、(0,0)、(-1,0)、(-2,0)、(-3,0)位置发射时,采用上述三个短磁透镜组合方式将电子束团1:1聚焦成像在MCP输入面,电子在7个不同位置发射时的XY截面运动轨迹放在同一个图中,如图7所示。电子在光电阴极面轴心位置处发射时,其最佳成像位置位于MCP输入面的轴心,电子远离光电阴极面轴心处发射时,其成像位置也远离MCP输入面的轴心。离轴不同位置处发射的电子,其成像位置对应的二维图像坐标值如图8所示。由图8可知,电子发射位置距离光电阴极面轴心越近,其成像位置的Y坐标越大,阴极平面经短磁透镜成像后,像面变成了一个曲面。由于场曲像差与物高平方成正比,因此在宽口径成像器件中,此项像差较严重<sup>[23]</sup>。

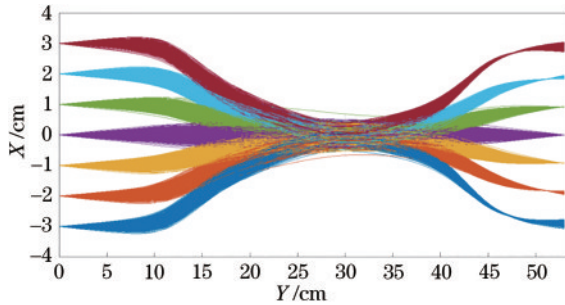


图7 XY截面的电子轨迹(从上到下发射位置的X坐标分别为3、2、1、0、-1、-2、-3)

Fig. 7 Electron trajectories in XY cross section (X coordinates of the launch position from top to bottom are 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, respectively)

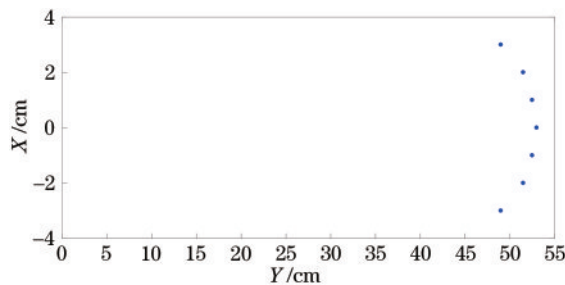


图8 成像位置的XY坐标值

Fig. 8 XY coordinate value of imaging position

离轴心不同距离发射的电子经短磁透镜成像在MCP输入面后,电子的落点图像如图9所示。由图9可知,发射位置距离阴极中心越远,落点的弥散斑面积越大,即空间分辨率越差。

目前,可采用球面光电阴极来有效地减小场曲,也可采用曲面MCP使之与像场弯曲匹配,或者采用环状结构的光电阴极微带线,在不同微带线加载合适的偏置电压来减小场曲,以提高相机在离轴区域的空间分辨率。

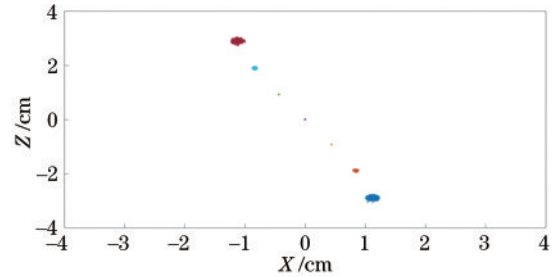


图9 MCP输入面电子落点图像

Fig. 9 Electron drop point image of MCP input surface

#### 4.2 空间分辨率与发射位置关系

在三个短磁透镜成像条件下,图10是成像倍率为1:1时,模拟阴极电子在离轴6 mm、12 mm、18 mm和24 mm发射位置成像后在MCP面的落点图像(0 mm处发射位置的落点图像见图6)。由MCP面的电子落点位置,再根据式(3)可计算出各个发射位置的传递函数曲线,从而获得相机空间分辨率。

由图6、图10可知,当在5个不同的发射位置模拟3个短磁透镜组合成像时,相机静态空间分辨率分别为20.8 lp/mm、11.4 lp/mm、5.4 lp/mm、2.7 lp/mm和1.7 lp/mm。阴极面在直径15 mm范围内,相机空间分辨率大于10 lp/mm,在直径25 mm范围内,相机空间分辨率大于5 lp/mm。当模拟两个短磁透镜组合成像时,在相同电子发射位置,获得静态空间分辨率分别为20.1 lp/mm、10.6 lp/mm、4.6 lp/mm、2.4 lp/mm和1.4 lp/mm。单个短磁透镜时获得静态空间分辨率分别为16.4 lp/mm、7.1 lp/mm、2.5 lp/mm、1.2 lp/mm和0.7 lp/mm。静态空间分辨率与电子离轴发射位置的关系如图11所示,电子发射位置离轴越小,相机的空间分辨率越好。从图11还可以看出,随着短磁聚焦透镜个数的增多,相机的空间分辨率得到明显提高。

#### 4.3 空间分辨率与阴极电压关系

采用单个短磁透镜在电子成像比为1:1,电子发射点位于阴极轴心时,在阴极加载不同的负直流偏置电压,电子束团经过脉冲展宽后聚焦成像在MCP的输入面,通过统计电子的落点坐标,计算静态空间分辨率,结果如图12所示,随着阴极电压的增大,相机的静态空间分辨率逐渐提高。

### 5 脉冲展宽X射线分幅相机实验结果

为方便得到相机空间分辨率,在阴极上刻有分划板,分划板中每小格都为3 mm×3 mm,每小格对应的线对数如图13所示。阴极图像上能够最高清晰分辨的线对数即为相机的静态空间分辨率。

在成像倍率为1:1时,相机系统的静态空间分辨率图像如图14所示。在离轴6 mm位置处可以观测到10 lp/mm的分划板,在离轴15 mm位置处可以观测到5 lp/mm的分划板。相机系统中心位置处静态空间分

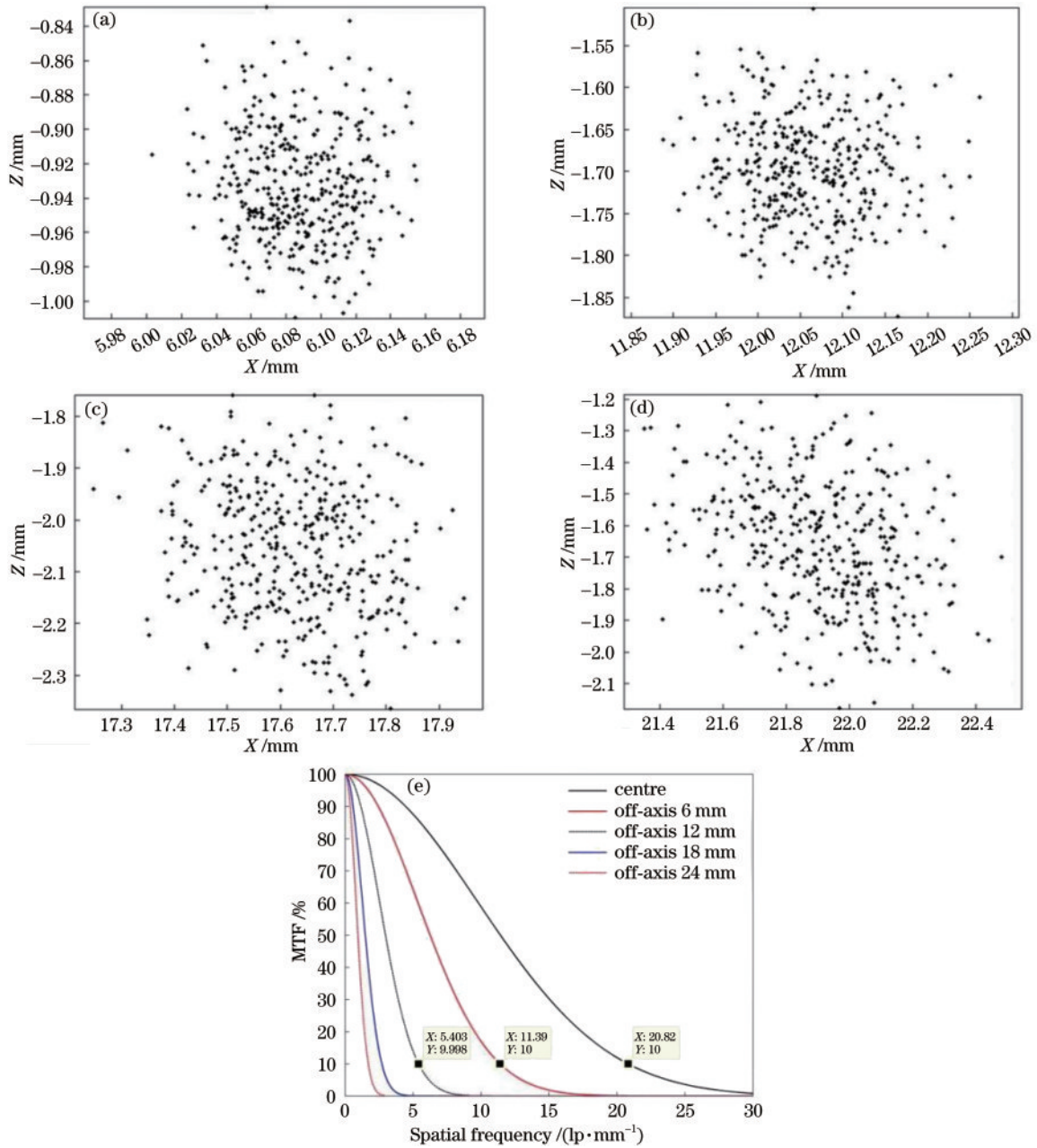


图 10 模拟结果。(a)~(d)电子从不同位置发射时在MCP面上的落点分布;(e)调制传递函数曲线

Fig. 10 Simulation results. (a)~(d)Distributions of drop points on the MCP surface when electrons are emitted from different positions; (e) modulation transfer function curves

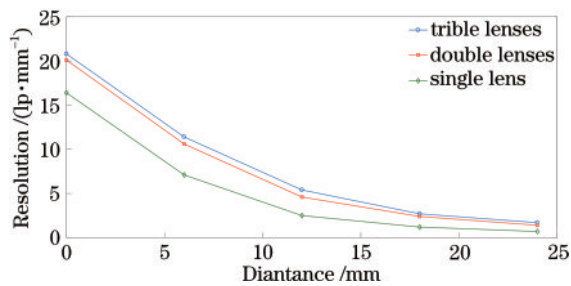


图 11 静态空间分辨率与电子离轴发射位置的关系

Fig. 11 Relationship between static spatial resolution and off-axis electron emission position

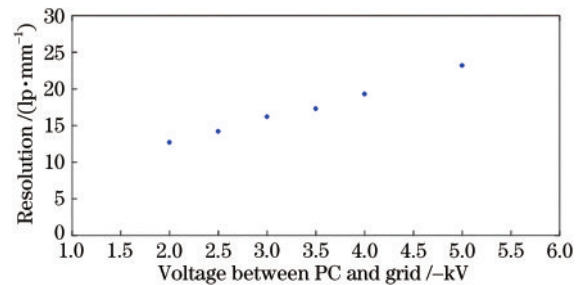


图 12 静态空间分辨率与阴极电压的关系

Fig. 12 Relationship between static spatial resolution and cathode voltage

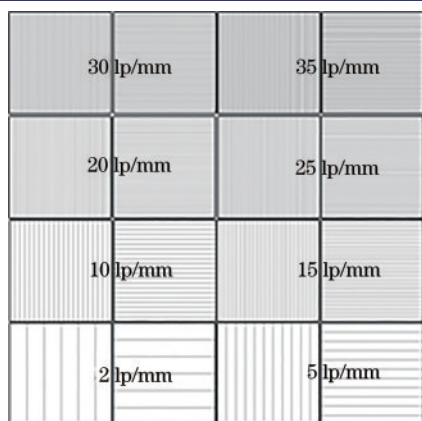


图 13 阴极的分辨率板示意图  
Fig. 13 Resolution plate diagram of cathode

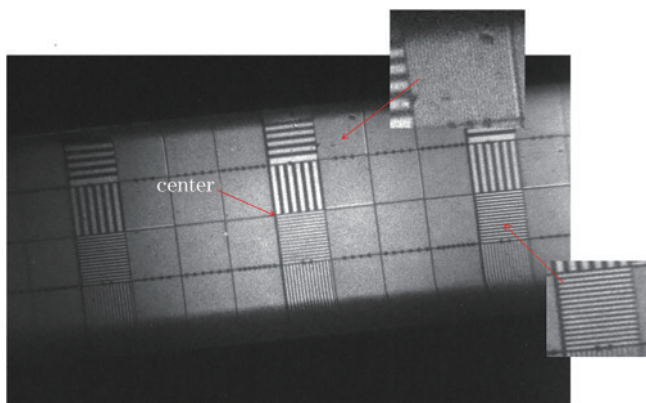


图 14 三磁透镜成像的静态空间分辨率实验结果  
Fig. 14 Experimental results of static spatial resolution of three magnetic lens imaging

分辨率最好,从中心到边缘,系统静态空间分辨率逐渐变差,实验结果与模拟结果基本一致。

## 6 结 论

本文建立了脉冲展宽分幅相机理论模型,并对其在成像倍率为 1:1 情况下的空间分辨率进行了理论模拟。PC 端电压为 -3.0 kV,三个短磁透镜组合聚焦成像,当电子发射位置距离阴极中心越近时,相机的空间分辨率越好。在光电阴极面直径 15 mm 范围之内,相机的空间分辨率大于 10 lp/mm。此外,通过对相机成像位置与发射位置关系的研究可知,阴极平面经短磁透镜聚焦成像后,像面变成了一个曲面。然后,研究了相机系统内短磁透镜数量与其空间分辨率的关系,随着短磁透镜数量的增加,相机的空间分辨率得到明显提高。最后,研究了加载在光电阴极的偏置电压与相机空间分辨率的关系,随着偏置电压的逐渐升高,相机空间分辨率也逐渐提高,空间分辨率与阴极偏置电压正相关。后续将通过增加短磁透镜数量、增大阴极偏置电压来继续提高相机的空间分辨率。

## 参 考 文 献

- [1] 蔡厚智,龙井华,刘进元,等. 电子束时间聚焦技术[J]. 光子学报, 2016, 45(2): 0204001.  
Cai H Z, Long J H, Liu J Y, et al. Time focus technology for the electron bunch[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(2): 0204001.
- [2] Bachmann B, Hilsabeck T, Field J, et al. Resolving hot spot microstructure using X-ray penumbral imaging (invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(11): 11E201.
- [3] Pickworth L A, Ayers J, Bell P, et al. The National Ignition Facility modular Kirkpatrick-Baez microscope[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(11): 11E316.
- [4] 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): 0632001.
- [5] 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.
- [6] 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): 112003.  
Tian J S. Introduction to development of streak and framing cameras[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112003.
- [7] 王峰,关赞洋,理玉龙,等. 基于神光 III 装置的光学诊断系统介绍[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(6): 065205.  
Wang F, Guan Z Y, Li Y L, et al. Optical diagnostic systems based on Shenguang III [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48(6): 065205.
- [8] 曹柱荣,袁铮,陈韬,等. 神光装置上 X 射线时空诊断技术概况与展望[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(6): 065206.  
Cao Z R, Yuan Z, Chen T, et al. Progress and plans of X-ray temporal and spatial diagnosis technology of Shenguang facilities[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48(6): 065206.
- [9] 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.
- [10] 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]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11E504.
- [11] 雷云飞,刘进元,蔡厚智,等. 脉冲展宽分幅变像管场曲特性研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2132001.  
Lei Y F, Liu J Y, Cai H Z, et al. Study on field curvature characteristics of pulse-dilation framing tube[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2132001.
- [12] 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.

- [13] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, et al. Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 016101.
- [14] 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.
- [15] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 2 版. 北京: 原子能出版社, 2006.  
Xu S Y. Application of Monte Carlo method in experimental nuclear physics[M]. 2nd ed. Beijing: Atomic Press, 2006.
- [16] 杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
Du B C, Wang J R. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [17] 刘祖平. 束流光学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.  
Liu Z P. Beam optics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005.
- [18] 张珂, 蔡厚智, 刘进元, 等. 时间展宽 X 射线分幅相机空间分辨特性[J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 0211003.  
Zhang K, Cai H Z, Liu J Y, et al. Spatial resolution for the time dilation X-ray framing camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0211003.
- [19] 冯焱焱, 郑玉才, 方二伦, 等. 像管的设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.  
Feng C T, Zheng Y C, Fang E L, et al. Design and analysis of image tube[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.
- [20] 周立伟. 宽束电子光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.  
Zhou L W. Electron optics with wide beam focusing[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993.
- [21] 王新华, 王爱平. 龙格-库塔法结构程序设计方法[J]. *淮北煤师院学报(自然科学版)*, 1995, 16(3): 48-52.  
Wang X H, Wang A P. Structure program composition method of Runge-Kutta[J]. *Journal of Huaibei Industry Teachers College (Natural Sciences Edition)*, 1995, 16(3): 48-52.
- [22] Csorba I P. Modulation transfer function of image tube lenses[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(10): 2647-2650.
- [23] 徐大伦. 变相管高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1990.  
Xu D L. High speed photography with phase change tube [M]. Beijing: Science Press, 1990.