

doi:10.3788/gzxb20184702.0211003

时间展宽 X 射线分幅相机空间分辨特性

张珂,蔡厚智,刘进元,付文勇

(深圳大学 光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室,广东 深圳 518060)

摘 要:利用 Monte Carlo 方法、有限元法和有限差分法建立了时间展宽 X 射线分幅相机的理论模型,对相机静态空间分辨特性进行了理论研究。当光电阴极的电压为 -3 kV ,采用三个磁透镜,成像倍率为 2:1 时,相机的静态空间分辨率优于 $110\ \mu\text{m}$ 。研究了空间分辨率与发射位置、阴极电压、磁聚焦透镜数量的关系,模拟结果表明,发射位置离中心越近,阴极电压越高,磁聚焦透镜个数越多,空间分辨率越好。此外,平面的光电阴极经磁聚焦透镜成像后,像面不是一个平面而是一个曲面。

关键词:分幅相机;时间展宽;空间分辨率;惯性约束聚变;Z 箍缩

中图分类号:TN143;O536

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0211003-7

Spatial Resolution for the Time Dilation X-ray Framing Camera

ZHANG Ke, CAI Hou-zhi, LIU Jin-yuan, FU Wen-yong

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: The spatial resolution of the time dilation X-ray framing camera is simulated by using the Monte Carlo method, the finite element method and the finite difference method. While DC bias on the photo-cathode is -3 kV and three large aperture magnetic lens are used to image the electrons from the photo-cathode onto the microchannel plate with the image ratio of 2:1, the theoretical static spatial resolution is better than $110\ \mu\text{m}$. The relationship between the spatial resolution and the point of electron emitted from the photo-cathode is obtained. While the distance of the electron emitting point to the center of the photo-cathode is increased, the spatial resolution is worse. The variation of the spatial resolution with the photo-cathode voltage is provided. The spatial resolution is improved with increasing photo-cathode voltage. In addition, the spatial resolution is better by increasing the numbers of the magnetic lens. Furthermore, it can be seen from the simulation results that the image plane is a curved surface while the photo-cathode is a plane.

Key words: Framing camera; Time dilation; Spatial resolution; Inertial confinement fusion; Z-pinch

OCIS Codes: 110.7440; 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120; 250.0040

0 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)实验中,激光打靶产生的等离子体 X 射线辐射包含极其丰富的物理信息,其持续时间在纳秒量级。采用具有皮秒量级时间分辨的超快相机对 X 射线辐射特性进行探测是 ICF 研究的关键诊断技术^[1-5]。门控微通道板(Microchannel Plate, MCP)分幅相机可以获得 X 射线辐射的二维空间分布及其时间特性,因而在 ICF 研究中具有比较重要的作用^[6-8]。ICF 研究的不断深入,尤

基金项目:国家自然科学基金(No.11775147),深圳市科技计划项目(Nos. JCYJ20170302153912966, JCYJ20160608173121055)和深圳大学新引进教师科研启动项目(No.2017015)资助

第一作者:张珂(1989-),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为电子技术, E-mail: kezhang810@gmail.com

通讯作者:蔡厚智(1983-),男,副研究员,博士,主要研究方向为超快诊断技术, Email: caihzlvzf@163.com

收稿日期:2017-08-09; **录用日期:**2017-10-12

<http://www.photon.ac.cn>

其是聚变燃烧阶段,对门控 X 射线分幅相机的时间分辨率提出了优于 30 ps 的需求.由于 MCP 中电子渡越时间弥散较大,限制了时间分辨率的进一步提高,使得门控 MCP 分幅相机的时间分辨率约 60 至 100 ps,无法满足上述要求^[9-10].减小 MCP 厚度可以降低渡越时间弥散,提高时间分辨率.1990 年,P. M. Bell 等采用 0.2 mm 厚的 MCP,获得时间分辨率约 35 ps 的门控 MCP 分幅相机^[11].但薄 MCP 相机比较脆弱、增益低、信噪比差.2010 年,美国 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)提出采用电子束时间放大技术来提高时间分辨率,成功地获得了具有 5 ps 时间分辨率的 X 射线分幅相机^[12].该相机首先利用电子脉冲时间放大技术对电子束团进行时间宽度展宽,再用传统的 MCP 变像管对时间放大后的电子束团进行测量,从而获得高的时间分辨率^[13-15].然而,从光阴极(Photo-Cathode,PC)到 MCP 有一段 50 cm 的漂移区,电子束团在漂移区运动时将会在空间发散,影响了相机的空间分辨率,为了改善空间分辨率,需采用磁聚焦透镜将电子束团成像在 MCP,因而有必要对相机的空间分辨特性进行研究.

空间分辨率是分幅相机最重要的性能指标之一,目前关于该方面的文章比较欠缺,为了满足我国 ICF 实验的需求,为后续实验研究时间展宽 X 射线分幅相机打下坚实的理论基础,本文利用 Monte Carlo 方法、有限元法和有限差分法建立了时间展宽 X 射线分幅相机的理论模型,并对相机静态空间分辨特性进行了理论研究.

1 相机结构及理论模型

1.1 相机结构

时间展宽 X 射线分幅相机的结构示意图如图 1,主要组成部分为电子束时间展宽器(包括微带阴极、阳极栅网、漂移区)、大口径磁聚焦透镜、MCP 变像管(包括 MCP 微带线、MCP、荧光屏)、CCD 和高压脉冲发生器(产生加载在微带阴极上的阴极脉冲和加载在 MCP 上的门控脉冲).相机中,微带阴极和 MCP 分离,两者之间有一 50 cm 的漂移区.微带阴极上加载有负直流高压和脉冲电压,栅网接地,从而使得阴极和栅网间存在一随时间变化的电场,该电场加速阴极产生的光电子,并使得先产生的光电子获得更大的能量,这样,先发射的光电子将以更快的速度通过漂移区,拉开与后发射光电子的距离,电子束团的时间宽度将增大,然而电子束在漂移区运动时,将在空间发散,故采用磁聚焦透镜将电子束从阴极成像至 MCP,然后利用 MCP 变像管对电子束进行选通、增益,并将电子图像转换成可见光图像传输至 CCD 进行采集处理.由于电子束团时间宽度被展宽,因而整个系统的时间分辨率比单独的门控 MCP 分幅相机要高得多.然而,由于电子束需要经过 50 cm 漂移区的传输,因此系统的空间分辨率比传统近贴聚焦的门控 MCP 分幅相机更差.此外,时间展宽 X 射线分幅相机为一宽口径电子光学成像系统,故离轴较远的位置空间分辨率较差.

1.2 理论模型

阴极产生的光电子具有以下几种统计分布:初始位置分布、光电子发射时间分布、光电子发射角度分布及初始能量分布.光电子的初始位置采用均匀分布,发射时间采用高斯分布,发射仰角采用余弦分布,方位角采用均匀分布,初始能量一般服从 $\beta(k, l)$ 分布^[16],即

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

本文采用 $\beta(1,4)$ 分布.设定分布后,采用 Monte Carlo 方法对阴极光电子的统计分布进行抽样.

时间展宽 X 射线分幅相机中既有静态电场,也有随时间变化的电场,电子从阴极运动到 MCP 时,所有电极形成的电场均采用有限差分法进行计算,电场力将对电子进行作用.此外,电子本身与其它电子相互作用产生的库仑力也将对电子进行作用. T 时刻,第 m 个电子受到的库仑力为

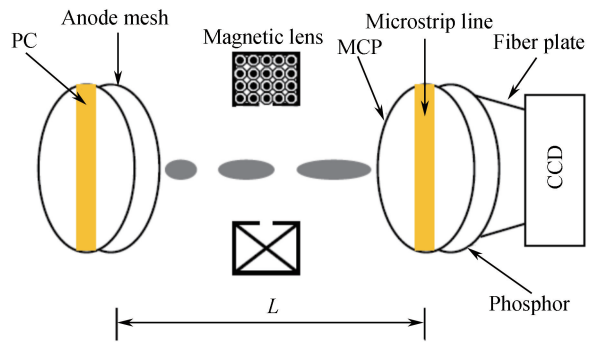


图 1 时间展宽 X 射线分幅相机的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the dilation X-ray framing camera

$$F_i(T) = K \cdot e^2 \cdot \sum_{m \neq n} \frac{\mathbf{r}_m(T) - \mathbf{r}_n(T)}{|\mathbf{r}_m(T) - \mathbf{r}_n(T)|^3} \quad (2)$$

式中, e 为电子的电荷量, K 为库仑常数。

阴极发射的光电子经磁聚焦透镜成像在 MCP, 磁聚焦透镜在系统中形成的磁场强度分布由有限元法进行计算. 利用四阶 Runge-Kutta 法对光电子的运动轨迹进行计算. 对时间展宽 X 射线分幅相机进行理论研究时, 模拟流程为: 1) 计算系统的电位分布: 设定网格步长之后, 设定边界条件(包括电极位置, 形状, 电压等), 用线性插值法或者对数插值法将非电极边界封闭起来, 之后用有限差分法—超松弛高斯迭代计算系统的电位分布; 2) 计算磁场分布: 设定网格步长之后, 设定边界条件(包括磁透镜位置, 形状, 绕线圈电流大小等), 用有限元法计算系统的磁场分布; 3) 阴极面上光电子发射: 计算完系统的电位分布、磁场分布后, 设置光电阴极上电子的初始位置分布、发射时间分布、发射角度分布及能量分布; 4) 计算系统中电子的运动轨迹: 利用四阶 Runge-Kutta 法计算电子轨迹, 计算电子落点处的电场强度时采用两点拉格朗日插值法; 计算动态电场时, 每改变一次电压, 需要重新计算电场, 然后用新的电场分布计算电子轨迹; 再根据库仑定律计算空间电荷效应引起的附加电场, 以及根据洛伦兹公式计算磁场引起的附加加速度, 最终将所有加速度项相加得出总加速度. 计算过程中, 每计算一步均要查询电子是否落在电极或者边界上, 是则删除该电子, 否的话则继续计算, 如此进行下去, 直至所有没被删除的电子到达 MCP.

模拟时, 光电阴极和 MCP 均只加载直流电压, 系统内部为静态电场, 取阴极电压 -3 kV, 栅极电压 0 V, MCP 电压 -560 V, 阴极与栅极距离 1 mm, 栅极与 MCP 距离 500 mm, 磁聚焦透镜由 1200 匝的铜线圈和软铁组成, 其外径为 256 mm, 内径为 160 mm, 厚度为 100 mm, 内侧有一宽度为 4 mm 的圆环狭缝, 磁透镜产生的磁场通过该狭缝传输至漂移区, 使得阴极产生的光电子在 MCP 上成缩小的像, 成像倍率为 $2:1$. 取阴极中心为坐标原点, 水平方向为 X 轴, 竖直方向为 Y 轴, 轴线方向为 Z 轴. 由于 MCP 变像管采用近贴聚焦方式, 其空间分辨率远高于磁聚焦透镜系统的空间分辨率, 故研究时间展宽 X 射线分幅相机空间分辨率时, MCP 变像管可以忽略. 因而本文模拟静态空间分辨特性时, 电子运动的区间为阴极至 MCP, MCP 上电子分布的半高宽为相机的空间分辨率.

2 模拟结果

2.1 静态空间分辨率计算

当漂移区只有一个磁聚焦透镜, 磁透镜放置在漂移区正中间, 电流为 0.325 A 时, 获得轴线上的磁场强度与位置的关系如图 2. 图中, 磁场强度分布曲线近似为高斯分布, 在磁透镜中心磁场强度最大, 实际测量的最大值为 3.7 mT, 理论最大值为 4.2 mT, 理论结果与实验结果比较一致.

当漂移区有三个磁透镜, 第一个磁透镜中心距离阴极 12.3 cm, 第二个磁透镜距离阴极 22.3 cm, 第三个磁透镜距离阴极 40.8 cm, 磁透镜电流分别为 $I_1=0.15$ A, $I_2=0.15$ A, $I_3=0.34$ A 时, 获得轴线上的磁场强度与位置的关系如图 3, 磁场强度有三个峰值. 当电子在阴极面的发射位置为原点时, 从光电阴极到 MCP 的电子轨迹如图 4, XZ 截面的电子轨迹如图 5, YZ 截面的电子轨迹如图 6. 由图 5、6 可得, 电子在阴极中心发

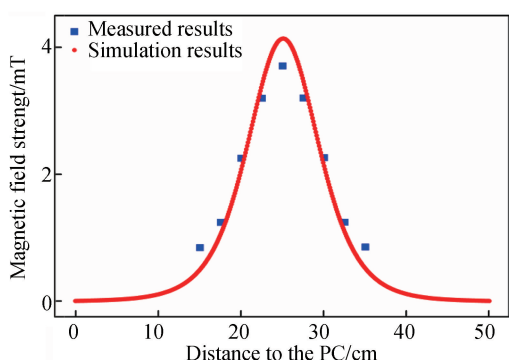


图 2 一个磁透镜时, 轴线上磁场强度与位置的关系

Fig.2 Magnetic field strength distribution on axis in the drift space while using one magnetic lens

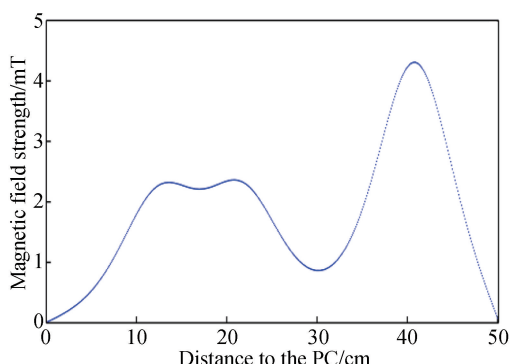


图 3 三个磁透镜时, 轴线上磁场强度与位置的关系

Fig.3 Magnetic field strength distribution on axis in the drift space while using three magnetic lenses

射时,成像点为MCP中心.MCP面电子图像如图7. MCP上电子图像在X轴方向上的电子分布如图8,半高宽为 $110\ \mu\text{m}$,则在X轴方向上系统静态空间分辨率为 $110\ \mu\text{m}$.MCP上电子图像在Y轴方向上的电子分布如图9,半高宽为 $102\ \mu\text{m}$,则在Y轴方向上系统静态空间分辨率为 $102\ \mu\text{m}$.

当电子在阴极面发射位置坐标为 $(10,0)$ 时.MCP面电子图像如图10.电子图像中心坐标为 $(-2.523, 4.379)$,与MCP中心距离为 $5.05\ \text{mm}$.由此可得,经过磁透镜后,电子图像从阴极面成缩小的像到MCP面,成像倍率为 $5.05:10$,约 $2:1$,旋转角度约 120° .

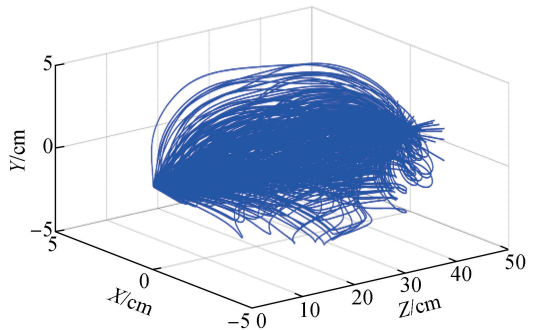


图4 三维电子运动轨迹
Fig.4 Three-dimensional electron trajectory

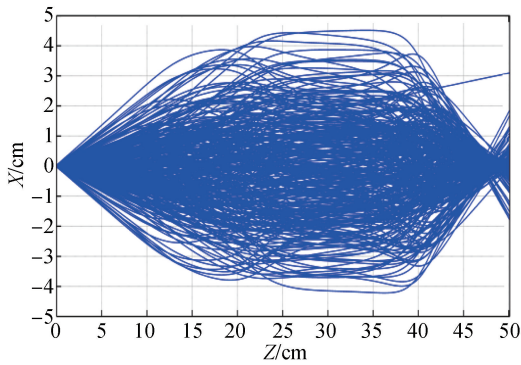


图5 原点发射时,XZ截面电子轨迹
Fig.5 XZ cross section electron trajectory, while the electrons are emitted from origin

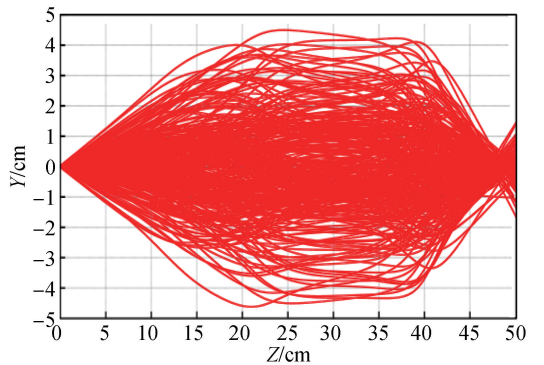


图6 原点发射时,YZ截面电子轨迹
Fig.6 YZ cross section electron trajectory, while the electrons are emitted from origin

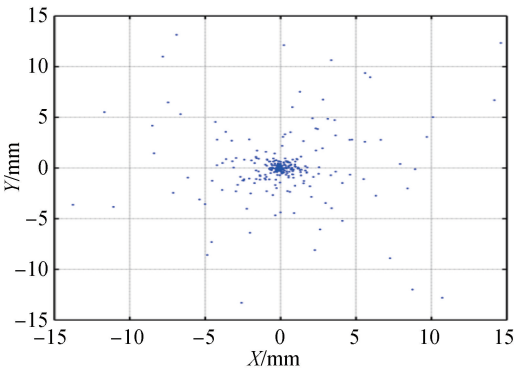


图7 原点发射时,MCP上的电子图像
Fig.7 Electronic images on MCP, while the electrons are emitted from origin

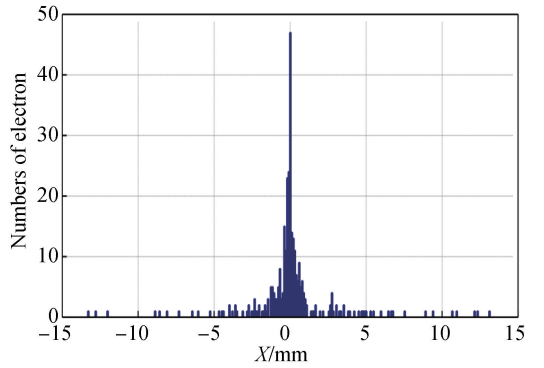


图8 X轴方向电子分布
Fig.8 X axis electron distribution

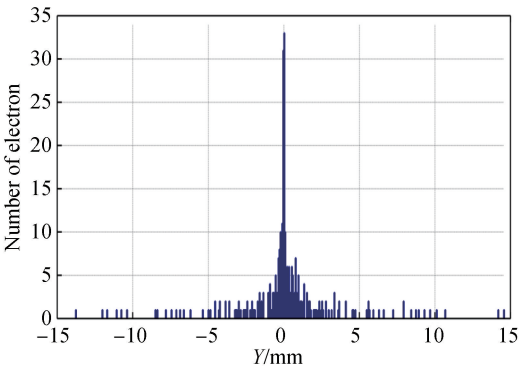


图9 Y轴方向电子分布
Fig.9 Y axis electron distribution

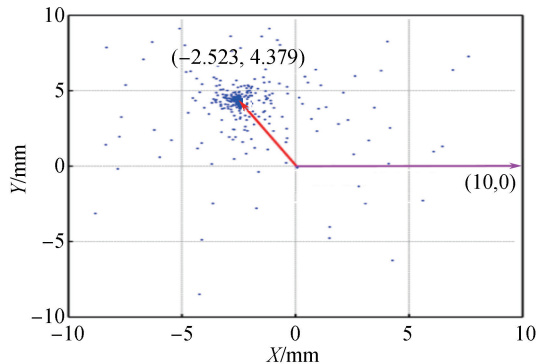


图10 发射位置坐标为 $(10,0)$ 时,MCP面电子图像
Fig.10 MCP electronic image, while the electrons are emitted from coordinate $(10,0)$

由模拟结果可得,相机采用三个磁聚焦透镜,成像倍率为 2:1 时,其静态空间分辨率约为 $110\ \mu\text{m}$ 。

2.2 成像位置与发射位置关系

采用 2.1 节三个磁透镜,当电子在阴极面的发射位置坐标分别为 $(4,0)$ 、 $(3,0)$ 、 $(2,0)$ 、 $(1,0)$ 、 $(0,0)$ 、 $(-1,0)$ 、 $(-2,0)$ 、 $(-3,0)$ 、 $(-4,0)$ 时, XZ 截面的电子轨迹如图 11。由图 11 可得,电子在阴极面中心点发射时,其成像位置为 MCP 面中心,电子在阴极面非中心点发射时,其成像位置的 Z 坐标小于 $50.1\ \text{cm}$ (MCP 的 Z 坐标)。成像位置的 XZ 坐标值如图 12,发射点距离中心越远,成像位置的 Z 坐标越小,即平面的光电阴极经磁聚焦透镜成像后,像面不是一个平面而是一个曲面,这是由于相机是一宽口径电子光学系统,系统中的场曲造成的。场曲正比于物点高度的二次方,故在物面比较大的器件中(如变像管),场曲比较大,可以将光电阴极制作成球面来减小场曲,同时利用与场曲匹配的曲面 MCP 来进一步降低场曲的影响,或者尽可能地使用阴极面的中心及其附近部分。

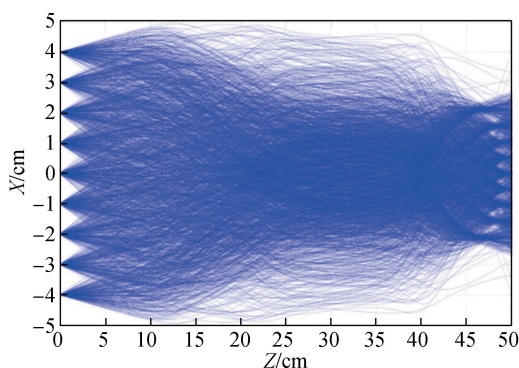


图 11 九个发射位置时, XZ 截面的电子轨迹

Fig.11 Electron trajectories of XZ cross sections, while the electrons are emitted from nine different coordinate

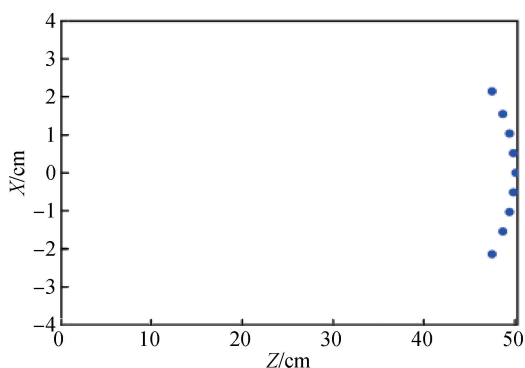


图 12 成像位置的 XZ 坐标值

Fig.12 XZ coordinate value of imaging position

2.3 空间分辨率与发射位置关系

采用 2.1 节三个磁透镜,当电子在阴极面的 9 个位置发射,发射位置坐标分别为 $(4,0)$ 、 $(3,0)$ 、 $(2,0)$ 、 $(1,0)$ 、 $(0,0)$ 、 $(-1,0)$ 、 $(-2,0)$ 、 $(-3,0)$ 、 $(-4,0)$ 时, MCP 面电子图像如图 13。由图 13 可得, MCP 面 9 个弥散斑的大小不一,发射位置离中心越远,弥散斑越大,即空间分辨率越差。静态空间分辨率与发射位置的关系如图 14。由图 14 可得,发射位置离中心越远,空间分辨率越差。

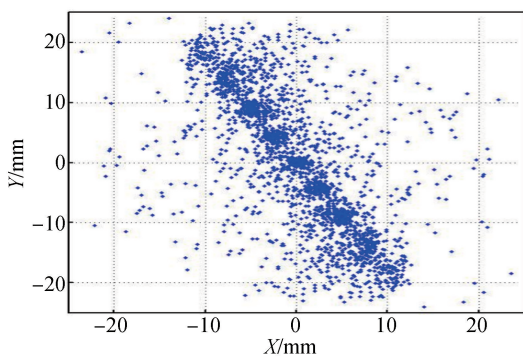


图 13 九个发射位置时, MCP 面电子图像

Fig.13 MCP electronic image, while the electrons are emitted from nine different coordinate

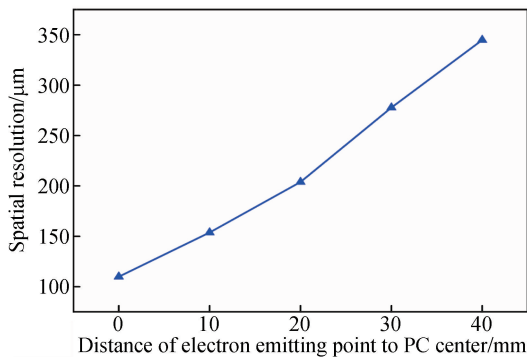


图 14 静态空间分辨率与发射位置的关系

Fig.14 Relationship between static spatial resolution and emission location

2.4 空间分辨率与阴极电压关系

采用三个磁透镜,放大倍率为 2:1,当阴极电压分别为 $-3\ \text{kV}$ 、 $-5\ \text{kV}$ 、 $-7\ \text{kV}$ 、 $-9\ \text{kV}$ 、 $-11\ \text{kV}$ 时,静态空间分辨率与阴极电压的关系如图 15。静态空间分辨率随着阴极电压的增大而提高。

2.5 空间分辨率与磁透镜数量关系

放大倍率为 2:1,发射位置分别为中心、离中心 $10\ \text{mm}$ 、离中心 $20\ \text{mm}$ 、离中心 $30\ \text{mm}$ 、离中心 $40\ \text{mm}$ 时,静态空间分辨率与磁聚焦透镜个数的关系如图 16。由图 16 可得,磁透镜个数越多,空间分辨率越好,且发

射位置离中心越远,空间分辨率越差。

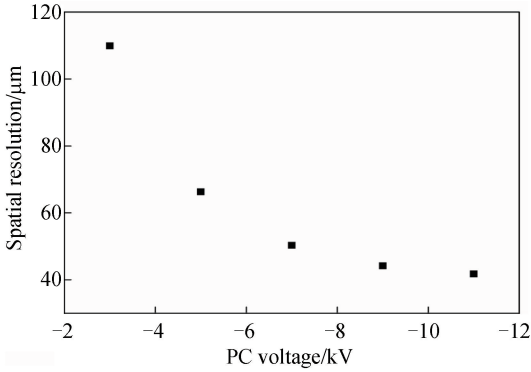


图 15 静态空间分辨率与阴极电压的关系

Fig.15 Relationship between static spatial resolution and PC voltage

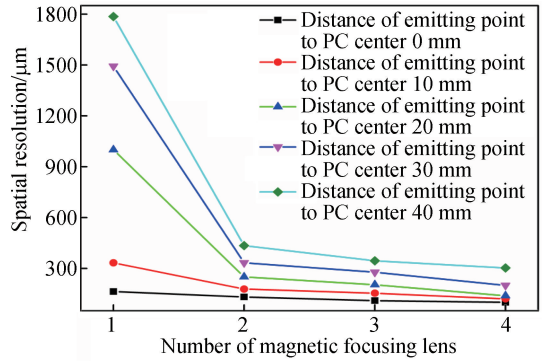


图 16 静态空间分辨率与磁聚焦透镜个数关系

Fig.16 Relationship between static spatial resolution and number of magnetic focusing lenses

4 结论

对时间展宽 X 射线分幅相机的静态空间分辨特性进行了理论模拟,当光电阴极的电压为 -3 kV ,采用三个磁透镜,成像倍率为 $2:1$ 时,相机的静态空间分辨率优于 $110\ \mu\text{m}$ 。此外,模拟结果表明电子在阴极面中心点发射时,其成像位置为 MCP 面中心,电子在阴极面非中心点发射时,其成像位置的 Z 坐标小于 $50.1\ \text{cm}$ (MCP 的 Z 坐标),发射点距离中心越远,成像位置的 Z 坐标越小,即相机是一宽口径电子光学成像系统,平面的光电阴极经磁透镜成像后,像面不是一个平面而是一个曲面,且发射位置离中心越远,空间分辨率越差。此外,磁聚焦透镜个数越多,空间分辨率越好;阴极电压越高,空间分辨率越好。

参考文献

- [1] BETTI R, HURRICANEAO. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, **12**: 435-449.
- [2] CALLAHAND A, HURRICANEAO A, HINKED E, et al. Higher velocity, high-foot implosions on the National Ignition Facility laser[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, **22**(5): 056314.
- [3] BAI Yan-li. Research on temporal and spatial resolution of pulse-dilation framing tube [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017; 1-10.
白雁力. 时间展宽分幅变像管时空性能研究[D]. 深圳:深圳大学,2017;1-10.
- [4] HURRICANEAO A, CALLAHAND A, CASEY D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, **506**: 343-348.
- [5] DANLYC R, CHRISTENSENK, FATHERLEYV E, et al. Combined neutron and x-ray imaging at the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(11): 11D703.
- [6] CAI Hou-zhi, LONG Jing-hua, LIU Jin-yuan, et al. Time focus technology for the electron bunch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0204001.
蔡厚智,龙井华,刘进元,等. 电子束时间聚焦技术[J]. 光学学报,2016,**45**(2):0204001.
- [7] Bachmann B, Hilsabeck T, Field J, et al. Resolving hot spot microstructure using x-ray penumbral imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(11): 11E201.
- [8] PICKWORTH A, AYERSJ, BELLP, et al. The national ignition facility modular kirkpatrick-baez microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(11): 11E316.
- [9] CAI Hou-zhi, LONG Jing-hua, LIU Jin-yuan, et al. Non-gain microchannel plate picosecond framing technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(S): 109-112.
蔡厚智,龙井华,刘进元,等. 无增益微通道板皮秒分幅技术研究[J]. 红外与激光工程,2015,**44**(S):109-112.
- [10] BOSEA, WOOK M, BETTIR, et al. Core conditions for alpha heating attained in direct-drive inertial confinement fusion[J]. *Physical Review E*, 2016, **94**(1): 011201.
- [11] BELLP M, KILLKENNYJD, HANKS R, et al. Measurements with a 35 psec gate time microchannel plate camera[C]. SPIE, 1990, **1346**: 456-464.
- [12] HILSABECKT J, HARES J D, KILKENNYJ D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(10): 10E317.
- [13] CAI Hou-zhi, LONG Jing-hua, LIU Jin-yuan, 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.

- [14] NAGELS R, HILSABECKT J, BELLP 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] NAGELS R, HILSABECKT J, BELLP 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.
- [16] ZHAO Xin, CAI Hou-zhi, LIU Jin-yuan, *et al.* Theoretical research of time focus and time collimation system for electron bunch[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**: s117001.
赵鑫,蔡厚智,刘进元,等. 电子束时间聚焦和时间准直系统理论研究[J]. 中国激光,2015,**42**:s117001.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.11775147), the Science and Technology Program of Shenzhen (Nos. JCYJ20170302153912966, JCYJ20160608173121055) and the Scientific Research Start-up Project for Newly Introduced Teacher of Shenzhen University (No.2017015)