

磁聚焦成像电子束时间展宽分幅相机的时空特性

蔡厚智¹, 付文勇¹, 雷云飞¹, 廖昱博¹, 刘进元¹, 龙井华^{2*}

¹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;

²深圳大学物理与能源学院, 广东 深圳 518060

摘要 研制了一款新型磁聚焦成像电子束时间展宽分幅相机,研究了其空间分辨率与磁聚焦透镜数目及电流间的关系,实验结果表明:采用三个磁聚焦透镜且电流适合时,相机的空间分辨率最高;离轴越远,空间分辨率越低。研究了相机的空间分辨率与电压间的关系,发现空间分辨率随着阴栅极间电压的增大而提高。该新型分幅相机成像面为一个曲面,整个阴极面不能同时清晰成像。采用电子束时间展宽技术后,该新型分幅相机的时间分辨率提高至 11 ps;当成像倍率为 2:1时,相机的静态空间分辨率为 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

关键词 探测器;分幅相机;时间展宽;空间分辨率;惯性约束聚变(ICF)

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070401

Temporal and Spatial Performances of Framing Camera Based on Magnetic Focusing Imaging and Electron Pulse Time Dilation

Cai Houzhi¹, Fu Wenyong¹, Lei Yunfei¹, Liao Yubo¹, Liu Jinyuan¹, Long Jinghua²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²College of Physics and Energy, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract A novel framing camera based on multiple magnetic focusing imaging and electron pulse time dilation is developed. The relationship between the spatial resolution and the number of the magnetic focusing lenses as well as that between the spatial resolution and the current is investigated. The experimental results show that the spatial resolution is the best when three magnetic focusing lenses and the suitable current are chosen. The larger the off-axis distance is, the worse the spatial resolution is. The relationship between spatial resolution and bias voltage is investigated and it is found that the spatial resolution improves with the increase of the bias voltage between the photo-cathode and the mesh. The image plane of this novel framing camera is a curved surface and the whole cathode surface cannot be simultaneously imaged. The temporal resolution is improved to 11 ps when the time dilation technology is introduced and the static spatial resolution is $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ when the image ratio is 2:1.

Key words detectors; framing camera; time dilation; spatial resolution; inertial confinement fusion (ICF)

OCIS codes 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120; 250.0040

1 引言

惯性约束聚变(ICF)是将氘氚转化为清洁、安全核能的途径之一,也是获取热核武器理论及实验数据的重要途径之一^[1-3]。在 ICF 实验中,由于聚变燃烧阶段

持续时间约为 100 ps,需要使用时间分辨率小于 30 ps 的分幅相机来测量等离子体的时空演化过程。目前常用的门控微通道板(MCP)X 射线分幅相机是一种具有二维空间分辨和一维时间分辨的超快诊断设备^[4-7],其时间分辨率为 60~100 ps,无法满足 ICF 聚变燃烧阶段

收稿日期: 2017-12-26; 收到修改稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(11775147)、深圳市科技计划项目(JCYJ20170302153912966, JCYJ20160608173121055)、深圳大学新引进教师科研启动项目(2017015)

作者简介: 蔡厚智(1983-),男,博士,副研究员,主要从事超快诊断技术方面的研究。E-mail: caihzlvzf@163.com

* 通信联系人。E-mail: jhlong@szu.edu.cn

实验测量的要求^[8-10]。通过减小 MCP 的厚度可以降低渡越时间弥散,提高时间分辨率。Bell 等^[11]采用 0.2 mm 厚的 MCP,获得了时间分辨率约为 35 ps 的门控 MCP 分幅相机。但薄 MCP 相机比较脆弱,且增益低、信噪比差。Hilsabeck 等^[12]提出采用电子束时间放大技术来提高时间分辨率,成功地获得了时间分辨率为 5 ps 的 X 射线分幅相机。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^[13-16]。然而,从光电阴极(PC)到 MCP 有一段长度为 50 cm 的漂移区,电子束团在漂移区运动时将会在空间发散,从而影响相机的空间分辨率,需采用螺线管长磁聚焦透镜产生均匀磁场,将微带阴极上的光电子在 MCP 上缩小成像,成像倍率为 3:1,获得相机的空间分辨率为 510 μm ^[15]。

本文采用三个内径长为 16 cm,外径长为 25.6 cm,轴线方向长为 10 cm 的短磁聚焦透镜^[17],获得了轴对称的具有高斯分布的非均匀磁场,磁场将微带阴极上的光电子在 MCP 上缩小成像,成像倍率为 2:1。相比文献^[15]中的相机,所设计的相机在体积和重量上较小,更便于送入 ICF 靶室内部对等离子体进行诊断。采用光纤束法一次测量就能获得相机的时间分辨率,避免了触发晃动带来的测量误差。对所设计相机的时间和空间分辨率特性进行了实验研究。

2 相机结构

图 1 所示为采用磁聚焦成像的电子束时间展宽分幅相机的结构示意图和实物图,其主要组成部分为:电子束时间展宽器(包括阻抗渐变线、微带阴极、阳极栅网)、大口径磁聚焦透镜、MCP 变像管(包括阻抗渐变线、MCP 微带线、MCP、荧光屏)、电荷耦合元件(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)。在相机中,微带阴极和 MCP 分离,两者之间有一长度为 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,阴极和栅网间存在随时间变化的电场。该电场对由阴极产生的光电子进行加速,并使得先产生的光电子获得更大的能量,故先发射的光电子将以更快的速度通过漂移区,与后发射光电子间的距离变大,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,整个系统的时间分辨率比单独的门控 MCP 分幅相机要高很多。又由于电子束需要经过 50 cm 漂移区,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,时间展宽分幅相机为宽口径电子光学成像系统,故离轴较远位置的空间分辨率较差。

相机有三条厚度为 80 nm 的金阴极,每条阴极宽度为 12 mm,相邻两条阴极间隔 10 mm。将 PC 制成微带线结构,便于传输阴极脉冲,使得阴极和栅网之间的电场随时间变化,从而放大电子束团的时间宽度。MCP 变像管具有三条宽度为 8 mm 微带线,相邻两条微带线间距 3 mm,采用的 MCP 厚度为 0.5 mm,外径为 56 mm,通道直径为 12 μm ,相邻两通道间距为 14 μm 。MCP 输出面距离荧光屏 0.5 mm。大口径磁聚焦透镜被制作成圆环形状,由 1200 匝的铜线圈及软铁构成,其内径为 160 mm,外径为 256 mm,厚度为 100 mm,内侧有一宽度为 4 mm 的圆环狭缝,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。

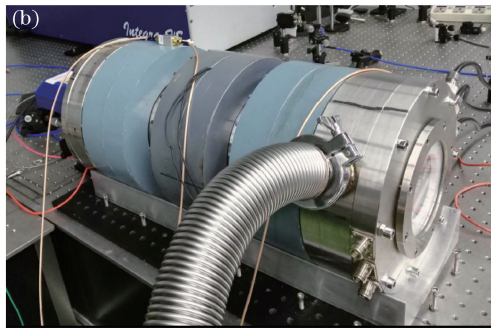
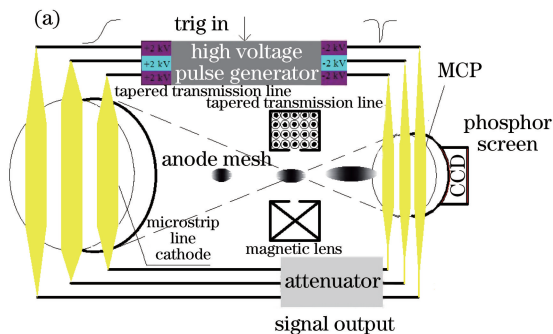


图 1 采用磁聚焦成像的电子束时间展宽分幅相机。(a)结构示意图;(b)实物图

Fig. 1 Framing camera based on magnetic focusing imaging and electron pulse time dilation.

(a) Structural diagram; (b) physical map

3 实验结果

3.1 空间分辨率测量

在电子束时间展宽分幅相机中的 PC 面板上,垂直和平行于微带的两个方向上刻有清晰的标识刻线,如图 2 所示。每条阴极包含若干组刻线,每组包含 16 个边长为 3 mm 的正方形小方块,线对数分别为 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。PC 和 MCP 均只加载直流电压,测量相机的静态空间分辨率,用紫外盘形灯照射阴极产生光电子,光电子经磁透镜成像在 MCP 上并被 MCP 倍增,倍增电子经屏压加速后轰击荧光屏形成可见光图像,用 CCD 采集荧光屏上所成的阴极图像,观测阴极图像上能够清晰分辨的线对数,此线对数即为相机的静态空间分辨率。为方便确定阴极图像上各点的位置,在阴极图像上建立直角坐标系,微带阴极方向设为 X 轴,垂直于微带阴极方向为 Y 轴,如图 3 所示。

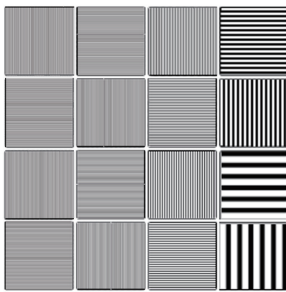


图 2 阴极面标识刻线示意图

Fig. 2 Schematic of identification lines on cathode surface

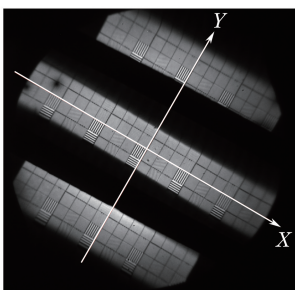


图 3 阴极图像坐标系示意图

Fig. 3 Coordinate system of cathode image

3.1.1 空间分辨率与磁透镜个数间的关系

三条 PC 均加载 -3 kV 的直流电压,当使用一个磁透镜,磁透镜电流为 0.344 A 时,静态空间分辨率图像如图 4 所示。采用两个磁透镜,当电流分别为 0.19 A 和 0.39 A 时,静态空间分辨率图像如图 5 所示。采用三个磁透镜,当电流分别为 $0.170, 0.121, 0.345 \text{ A}$ 时,静态空间分辨率图像如图 6 所示。对比

图 4~6 可知,两个磁透镜和三个磁透镜的空间分辨率图像均较清晰,一个磁透镜的空间分辨率较差(边上两条阴极的分辨率低于 $2 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$)。

分辨率达到 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的刻线的位置与其平均对比度间的关系如图 7 所示。由图 7 可知,采用三个磁透镜时,图像的空间分辨率最高,阴极面上离轴 27 mm 内的分辨率均能达到 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$;采用两个磁透镜时,图像的空间分辨率次之,阴极面上离轴 15 mm 内的分辨率达到 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$;采用一个磁透镜时,图像的空间分辨率最差,仅中心位置能分辨 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。此外,离轴越远平均对比度就越差,即离轴越远空间分辨率越差。

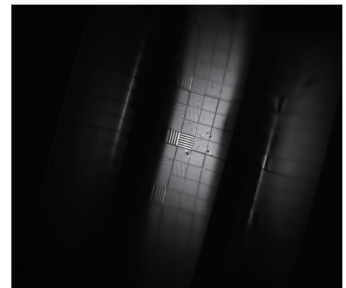


图 4 一个磁透镜下的静态空间分辨率图像

Fig. 4 Static and spatially resolved image under one magnetic lens

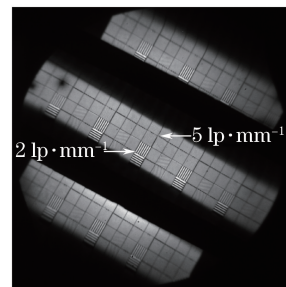


图 5 两个磁透镜下的静态空间分辨率图像

Fig. 5 Static and spatially resolved image under two magnetic lenses

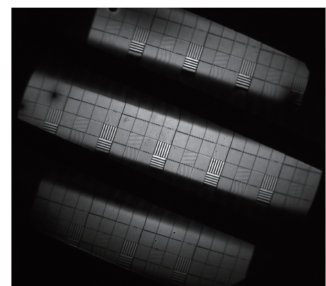


图 6 三个磁透镜下的静态空间分辨率图像

Fig. 6 Static and spatially resolved image under three magnetic lenses

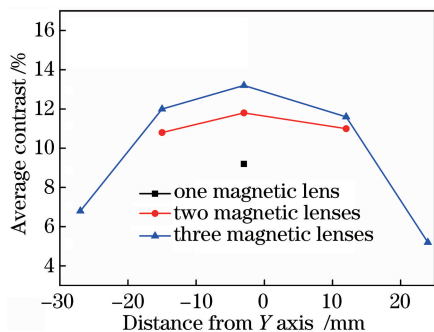


图7 平均对比度与离轴位置间的关系

Fig. 7 Average contrast versus off-axis position

对静态空间分辨率与磁透镜个数间的关系进行了理论模拟,阴极产生的光电子的初始位置设为均匀分布,发射时间设为高斯分布,发射仰角设为余弦分布,方位角设为均匀分布,初始能量一般服从贝塔分布 $\beta(k, l)$ ^[18],即

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

式中 $N(\xi)$ 为入射 $(k+l)$ 个光子产生 k 个光电子的概率, ξ 为产生光电子的概率, k 为产生光电子的光子数, l 为没产生光电子的光子数。这里采用 $\beta(1, 4)$ 分布。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,电场力将作用于电子。此外,电子本身与其他电子相互作用产生的库仑力也将作用于电子。在 T 时刻,第 m 个电子受到的库仑力为

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

式中 e 为电子的电荷量, K 为库仑常数, \mathbf{r} 为电子的位置矢量。

阴极发射的光电子经磁聚焦透镜成像在 MCP 上,利用有限元法对磁聚焦透镜在系统中形成的磁场强度分布进行计算。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,模拟流程如下。

1) 设定网格步长,设定边界条件(包括电极位置、形状、电压等),用线性插值法或对数插值法将非电极边界封闭起来,之后用有限元差分法—超松弛高斯迭代计算系统的电位分布。2) 设定网格步长,设定边界条件(包括磁透镜位置、形状、绕线圈电流大小等),用有限元差分法计算系统的磁场分布。3) 设置 PC 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) 利用四阶 Runge-Kutta 法计算电子轨迹,采用两点拉格朗日插值法计算电子落点处的电场强度;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,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。在计算过程中,每计算一步均要检查电子是否落在电极或者边界上,是则删除该电子,否则继续计算,直至所有没被删除的电子到达 MCP。

当 PC 电压为 -3 kV,成像倍率为 $2:1$,发射位置分别为中心及离中心 $10, 20, 30, 40$ mm 时,静态空间分辨率与磁聚焦透镜个数间的关系如图 8 所示。由图 8 可知,磁透镜个数越多,空间分辨率越好;发射位置离中心越远,空间分辨率越差。此模拟结果与上述实验结果相符。

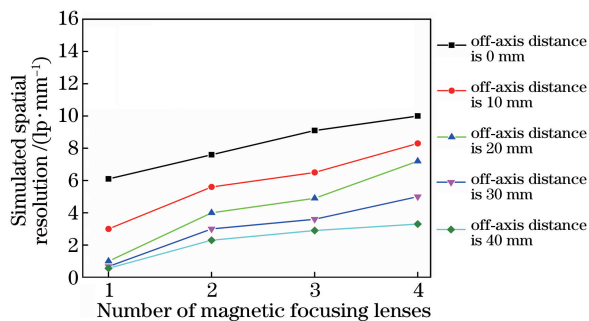


图8 空间分辨率与磁聚焦透镜个数间的关系

Fig. 8 Relationship between spatial resolution and number of magnetic focusing lenses

3.1.2 边上阴极空间分辨率的提高方法

为了提高边上两条阴极的空间分辨率,可对中间阴极和边上阴极分别加载不同的电压。采用三个磁透镜,当中间阴极电压为 -3 kV,边上两条阴极电压均为 -3.08 kV,第一个磁透镜电流 $I_1 = 0.170$ A,第二个磁透镜电流 $I_2 = 0.121$ A,第三个磁透镜电流 $I_3 = 0.343$ A 时,静态空间分辨率图像如图 9 所示。图 9 中所有位置的 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 刻线均能分辨,最远处那组 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 刻线的平均对比度为 6% 。

当三条阴极的电压均为 -3 kV,磁透镜电流 $I_1 = 0.170$ A, $I_2 = 0.121$ A, $I_3 = 0.343$ A 时,静态空间分辨率图像如图 10 所示。最远处那组 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 刻线的平均对比度为 2.5% 。由图 9,10 可知,当对阴极加载不同电压时,垂直于微带阴极方向(Y 方向)的空间分辨率被提高,但 X 方向是同一条阴极,因而此方法不能提高 X 方向的空间分辨率。

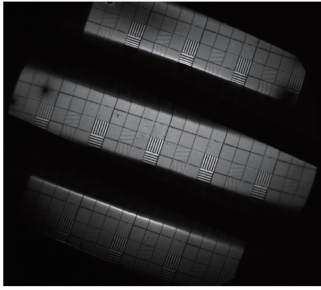


图9 不同阴极电压下的静态空间分辨率图像

Fig. 9 Static and spatially resolved image under different cathode voltages

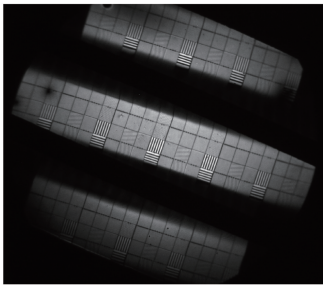


图10 相同阴极电压下的静态空间分辨率图像

Fig. 10 Static and spatially resolved image under a constant voltage

3.1.3 成像清晰位置与磁聚焦透镜电流间的关系

三条阴极电压均为 -3 kV ,采用两个磁透镜将电子束从阴极成像到MCP,成像倍率为 $2:1$,第一个磁透镜电流 $I_1=0.190\text{ A}$ 保持不变,微调第二个磁透镜电流 I_2 ,使阴极成像清晰。实验时,MCP电压为 -560 V ,荧光屏电压为 3.4 kV 。当第二个磁透镜电流 $I_2=0.390\text{ A}$ 时,中间阴极的中心位置 $2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $5\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 刻线的成像最清晰,如图11所示。当 $I_2=0.388\text{ A}$ 时,图12所示两处红圈的 $2\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $5\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 刻线的成像最清晰。当 I_2 分别为 $0.384,0.382,0.380\text{ A}$ 时,阴极图像成像最清晰位置分别如图13~15红圈位置所示。由图11~15可知,由于相机是宽口径电子光学成像系统,平面的PC经磁透镜成像后,像面不是一个平面而是一个曲面,阴极各个位置成像清晰时所对应的磁透镜电流略有差异。成像清晰位置与电流 I_2 间的关系如图16所示,当电流逐渐减小时,成像最清晰位置逐渐远离中心。

3.1.4 空间分辨率与阴极电压间的关系

采用三个磁透镜,当阴极电压分别为 $-2.0,-2.5,-3.0,-3.5\text{ kV}$ 时,空间分辨率图像中心部分分别如图17所示。 $5\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 刻线对应的平均对比度与阴栅极间电压的关系如图18所示。

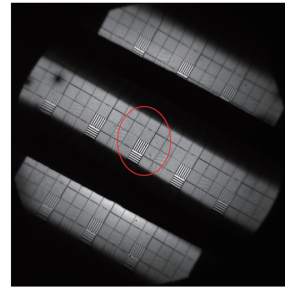
图11 $I_2=0.390\text{ A}$ 时的中心成像

Fig. 11 Center imaging at $I_2=0.390\text{ A}$

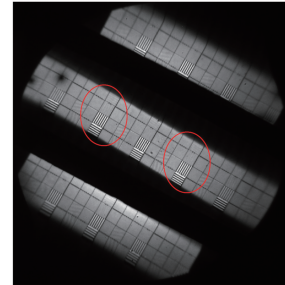
图12 $I_2=0.388\text{ A}$ 时的成像

Fig. 12 Imaging at $I_2=0.388\text{ A}$

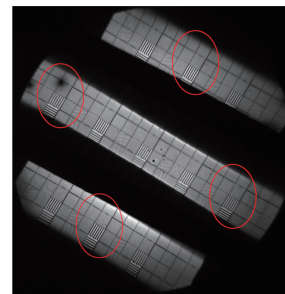
图13 $I_2=0.384\text{ A}$ 时的成像

Fig. 13 Imaging at $I_2=0.384\text{ A}$

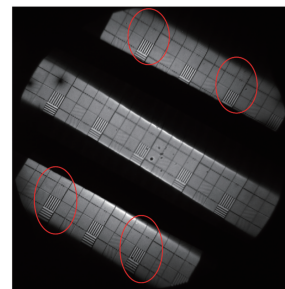
图14 $I_2=0.382\text{ A}$ 时的成像

Fig. 14 Imaging at $I_2=0.382\text{ A}$

由图18可知,平均对比度随着阴栅极间电压的增大而提高,即空间分辨率随着阴栅极间电压的增大而提高。

当阴极电压分别为 $-3,-5,-7,-9,-11\text{ kV}$ 时,理论模拟的静态空间分辨率与阴极电压间的关

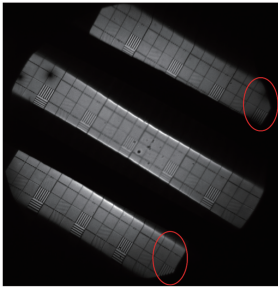


图 15 $I_2=0.380$ A 时的成像

Fig. 15 Imaging at $I_2=0.380$ A

系如图 19 所示。空间分辨率随着阴栅极间电压的增大而提高,与实验结果相符。

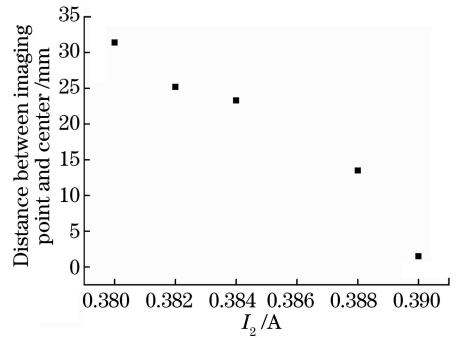


图 16 成像最清晰位置与第二个磁透镜电流强度 I_2 间的关系

Fig. 16 Relationship between the clearest imaging position and the second magnetic lens current intensity I_2

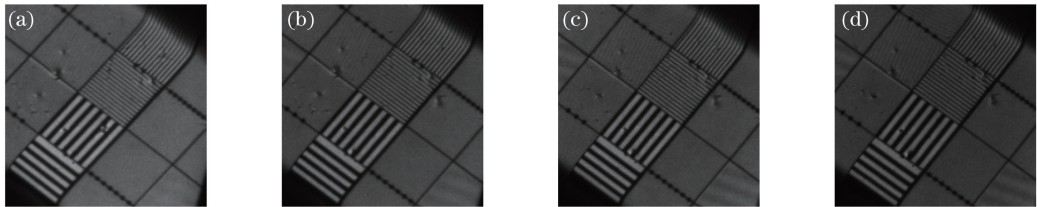


图 17 不同阴极电压下的空间分辨率图像中心部分。(a) -2.0 kV; (b) -2.5 kV; (c) -3.0 kV; (d) -3.5 kV

Fig. 17 Central part of spatially resolved images under different cathode voltages.

(a) -2.0 kV; (b) -2.5 kV; (c) -3.0 kV; (d) -3.5 kV

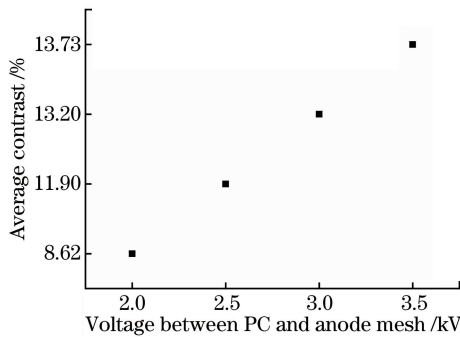


图 18 平均对比度与阴栅极间电压的关系

Fig. 18 Relationship between average contrast and voltage between PC and anode mesh

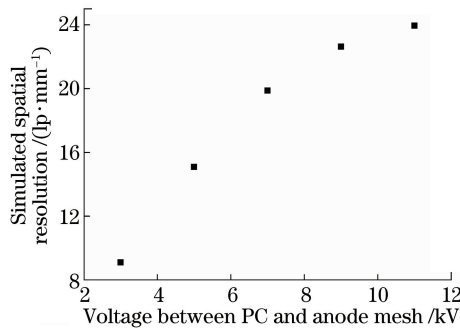


图 19 理论模拟静态空间分辨率与阴栅极间电压的关系

Fig. 19 Relationship between simulated static spatial resolution and voltage between PC and anode mesh

3.2 时间分辨率测量

时间分辨率的测量采用光纤传光束法。光纤传光束由 30 根长度依次增大的多模光纤组成,其输出面排列示意图如图 20 所示,排成三行,每行 10 根光纤,光纤长度依次增加,编号为 1 的光纤长度最短,编号每增加 1,光纤长度增加 2 mm,使得紫外光在光纤中的传输时间增加 10 ps,从而获得输出时间按 10 ps 均匀递增的 30 个光点。

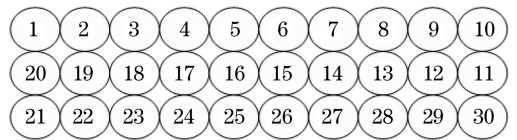


图 20 光纤传光束输出面排列示意图

Fig. 20 Schematic of output end array of fiber bunch

时间分辨率测量装置示意图如图 21 所示。先进行静态实验,将 PC 及 MCP 加载直流电压,测量光纤传光束的静态图像,获得入射光信号的静态分布。再进行动态实验,飞秒激光器输出波长为 266 nm、半峰全宽(FWHM)为 130 fs、强度为 0.1 mJ 的光信号,经延时后光信号传输至光纤传光束输入端,紫外光脉冲经光纤传光束后形成 30 个相邻时间间隔为 10 ps 的光点,这 30 个光点经透镜 L_1 、 L_2 成像至 PC 并产生光电子,若紫外光脉冲和阴极脉冲的时间同步,光电子

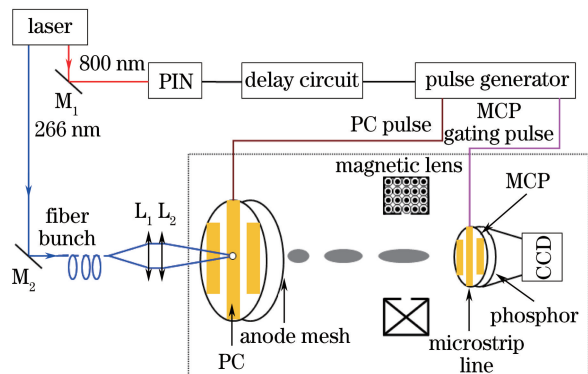


图 21 时间分辨率测量装置示意图

Fig. 21 Setup diagram of temporal resolution measurement

将被 PC 和栅网间的时变电场加速,并产生时间宽度展宽。飞秒激光器输出的另一波长为 800 nm 的光信号经延时后送入光电二极管(PIN)探测器产生触发信号,进而触发选通脉冲发生器产生选通脉冲。调节电路延时,使得展宽后的光电子与选通脉冲同步到达 MCP 微带线,光电子将被 MCP 选通并增益输出,产生可见光动态图像。用 CCD 观测采集该动态图像,获得光点像的动态分布,根据光点像静态分布归一化处理光点像动态分布,减小光信号的空间强度不均匀性对实验结果造成的影响,再由两光点间的时间间隔,将归一化后动态像的光强-空间分布转换成光强-时间分布,然后用高斯曲线对实验数据进行拟合,就获得了动态像的强度-时间分布曲线。该曲线的 FWHM 为相机的时间分辨率。

当 PC 仅加载 -3 kV 的直流电压, MCP 仅加载 -600 V 的直流电压时,光纤的静态图像如图 22 所示。当 PC 电压仅为 -3 kV 的直流电压, MCP 加载幅值为 -2 kV、FWHM 为 200 ps 的选通脉冲和 -400 V 的直流偏置电压时,光纤的动态图像如图 23 所示。将动态图像用静态图像进行归一化处理,获得的动态像强度-时间分布曲线如图 24 所示,高斯拟合曲线 FWHM 为 73 ps,即电子束时间宽度未被展宽时相机的时间分辨率为 73 ps。

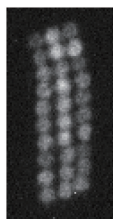


图 22 光纤静态图像

Fig. 22 Fiber static image

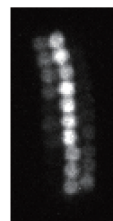


图 23 阴极未加脉冲时的光纤动态图像

Fig. 23 Fiber dynamic image when pulse is not added to cathode

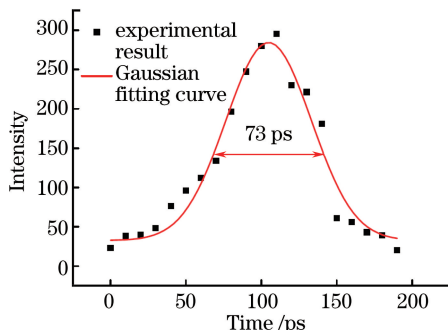


图 24 电子束时间未被展宽时的时间分辨率测量结果

Fig. 24 Measurement results of temporal resolution when electron beam time is not broadened

当 PC 加载斜率为 2 V/ps 的阴极脉冲和 -3 kV 的直流电压, MCP 加载选通脉冲和 -400 V 的直流偏置电压时,光纤的动态图像如图 25 所示。动态像的强度-时间分布曲线如图 26 所示,高斯拟合曲线的 FWHM 为 11 ps,即电子束时间宽度被展宽后系统的时间分辨率为 11 ps。

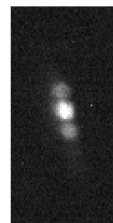


图 25 阴极加载脉冲时的光纤动态图像

Fig. 25 Fiber dynamic image when pulse is added to cathode

时间分辨率与阴极电压关系的理论模拟结果见参考文献[19]。理论模拟结果表明:当阴极电压大于 1.4 kV 时,时间分辨率随着阴极电压的减小而提高;当阴极电压小于 1.4 kV 时,阴栅极间电子的渡越时间弥散较大,限制了时间分辨率的提高,渡越时间弥散将随着阴极电压的减小而增大,使得时间分辨率随着阴极电压的减小而变差。

4 结 论

研制了一款采用多个磁聚焦透镜成像的新型电

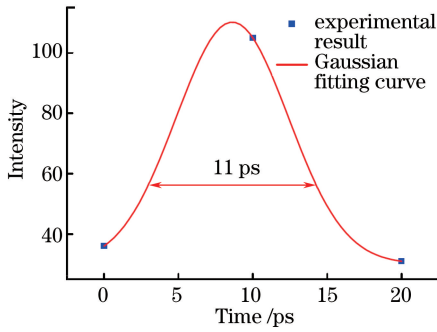


图 26 电子束时间被展宽时的时间分辨率测量结果
Fig. 26 Measurement result of temporal resolution when electron beam time is broadened

子束时间展宽分幅相机。相机的 PC 和 MCP 之间的漂移距离为 50 cm, 采用磁聚焦透镜将阴极产生的光电子成像在 MCP 上。实验结果表明: 采用三个磁透镜的相机的空间分辨率最高; 离轴越远的位置, 空间分辨率越差; 可通过对中间阴极和边上阴极分别加载不同电压的方法, 来提高边上阴极的空间分辨率。此外, 由于相机是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, 像面是一个曲面。当采用三个磁聚焦透镜, 阴极电压为 -3 kV , 成像倍率为 $2:1$ 时, 实验获得相机的静态空间分辨率为 $5\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。当阴极仅加载直流电压, 即电子束时间宽度未被展宽时, 相机的时间分辨率为 73 ps ; 采用电子束时间展宽技术后, 时间分辨率为 11 ps 。阴极电压越大, 空间分辨率越高, 时间分辨率越低, 因此需要选取合适的阴极电压以兼顾时间分辨率和空间分辨率。后续工作将研究时间分辨率与阴极脉冲斜率间的关系, 空间分辨率与磁聚焦透镜参数间的关系, 以及提高电子束时间展宽分幅相机时空分辨率的方法。

参 考 文 献

[1] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 435-448.
[2] Callahan D A, Hurricane O A, Hinke D E, *et al.* Higher velocity, high-foot implosions on the National Ignition Facility laser[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(5): 056314.
[3] 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.
[4] 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: 343-348.

- [5] Danly C R, Christensen K, Fatherley V E, *et al.* Combined neutron and X-ray imaging at the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11D703.
[6] Liao Y B, Long J H, Cai H Z, *et al.* Numerically simulated static spatial resolution of framing image converter using magnetic focusing via Matlab [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 012301.
廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 磁聚焦分幅变像管静态空间分辨率的 Matlab 模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 012301.
[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 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.
[9] Cai H Z, Long J H, Liu J Y, *et al.* Non-gain microchannel plate picosecond framing technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(s1): 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(s1): 109-112.
[10] Bose A, Woo K M, Betti R, *et al.* Core conditions for alpha heating attained in direct-drive inertial confinement fusion [J]. *Physical Review E*, 2016, 94(1): 011201.
[11] Bell P M, Killkenny J D, Hanks R, *et al.* Measurements with a 35 psec gate time microchannel plate camera [C]. *SPIE Annual International Technical Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering*, 1990: 456-464.
[12] Hilsabeck T J, Hares J D, Killkenny J D, *et al.* Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
[13] 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.
- [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]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- [16] 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.
- [17] Konvalina I, Müllerová I. Properties of the cathode lens combined with a focusing magnetic/immersion-magnetic lens[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2011, 645(1): 55-59.
- [18] Zhao X, Cai H Z, Liu J Y, *et al.* Theoretical research of time focus and time collimation system for electron bunch[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(s1): 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(s1): s117001.
- [19] 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.