

磁场对脉冲展宽分幅相机空间电荷效应的影响

白雁力, 宋明诚, 朱望纯*

桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

摘要 基于磁聚焦成像的脉冲展宽分幅相机是具有超快时间分辨的诊断设备,空间电荷效应是制约其时空性能向更高量级提升的主要因素。为研究脉冲展宽分幅相机中的空间电荷效应,基于电子脉冲电势分布和电场力方程建立研究模型,将电子脉冲动态特性融入模型分析。研究结果显示,由成像磁场引起的电子脉冲动态半径对空间电荷效应时空弥散影响显著,当轴上磁场强度为 4.585×10^{-3} T时,随着离轴位置增加至15 mm,磁场强度提高到 4.763×10^{-3} T;由于离轴电子脉冲散焦使动态半径较大,因此在降低电子密度的同时,使空间电荷效应的时空弥散由2.94 ps减小至483 fs,空间弥散由668 μm 减小至22 μm ;当轴上磁场强度由 4.585×10^{-3} T降低至 3.359×10^{-3} T时,与最优空间分辨性能相似,空间电荷效应时空弥散在磁场 $3.4 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}$ T区域内达到最小,此时离轴15 mm内的时空弥散范围为256~392 fs,空间弥散范围为3.1~15.4 μm 。研究结论为分析磁场对脉冲展宽分幅相机空间电荷效应的影响提供一定的理论参考。

关键词 超快光学; 超快诊断技术; 脉冲展宽分幅相机; 空间电荷效应; 成像磁场; 时空弥散

中图分类号 TN143

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231815

1 引言

在惯性约束聚变实验中,MCP(微通道板)分幅相机是应用于探测等离子体时空演化过程的重要二维超快诊断设备,因其受限于MCP通道中电子渡越时间及弥散的影响,其时间分辨率局限于60~100 ps^[1-3]。为提高其时间分辨率,研究者将脉冲展宽和磁聚焦技术融入MCP分幅相机,研制出脉冲展宽分幅相机^[4-6]。由于其具有优于10 ps的超快时间分辨率,因此更容易满足内爆聚变阶段对更短持续时间状态的探测要求,所以涉及脉冲展宽分幅相机的相关技术和方法逐渐成为超快诊断领域的研究热点。

脉冲展宽分幅相机是一种采用磁聚焦技术成像的长漂移区二维超快诊断设备,可通过增加电子束的时间展宽倍率来实现其时间分辨率的提高^[7-10]。由于其结构与条纹相机相似,因此空间电荷效应对其时空性能的提升具有一定的制约性^[11-12]。在超快诊断设备的空间电荷效应研究中,通常采用流体力学法^[13]和平均场法^[14],前者基于电子脉冲的静态时间宽度,仅对时间弥散进行分析;后者则能基于静态和动态的时间宽度,实现时空弥散的计算。然而,在脉冲展宽分幅相机中,由于受展宽脉冲和磁聚焦的影响,传输过程中的电子脉冲时间宽度和半径都具

有动态变化特性,因此如何构建满足电子脉冲动态参量的空间电荷效应模型,特别是分析由磁场引起的电子脉冲动态半径对时空弥散的影响,以及系统地研究脉冲展宽分幅相机中的空间电荷效应,具有重要的理论意义。

为分析磁场对空间电荷效应时空弥散的影响,首先,建立采用磁聚焦成像的脉冲展宽分幅相机模型,分析传输过程中的电子脉冲动态特性;然后,基于电子脉冲的二维电势分布,通过对电场力方程的求解来建立空间电荷效应时空弥散研究模型;接着,通过分析脉冲展宽分幅相机的最优空间分辨性能来标定不同的磁场分布;最后,在磁场不同的情况下,通过追踪电子运动轨迹来统计不同离轴位置电子脉冲的动态半径,并将其用于空间电荷效应时空弥散的研究。

2 脉冲展宽分幅相机中电子脉冲动态特性

脉冲展宽分幅相机的结构如图1所示,主要包括加速区、磁透镜、漂移区、MCP分幅相机等几部分,其中加速区包括光电阴极(PC)和阳极(Anode),MCP分幅相机包括MCP和荧光屏(FS)。相机工作时,光电阴极首先将入射信号转换为光电子脉冲信号,由于光

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2023-12-18; 录用日期: 2023-12-25; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(11865007)、广西自然科学基金(2022GXNSFAA035561)、广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金(YQ22101)、广西图像图形与智能处理重点实验室(桂林电子科技大学)开放基金(GIIP2210)

通信作者: *zhwch@guet.edu.cn

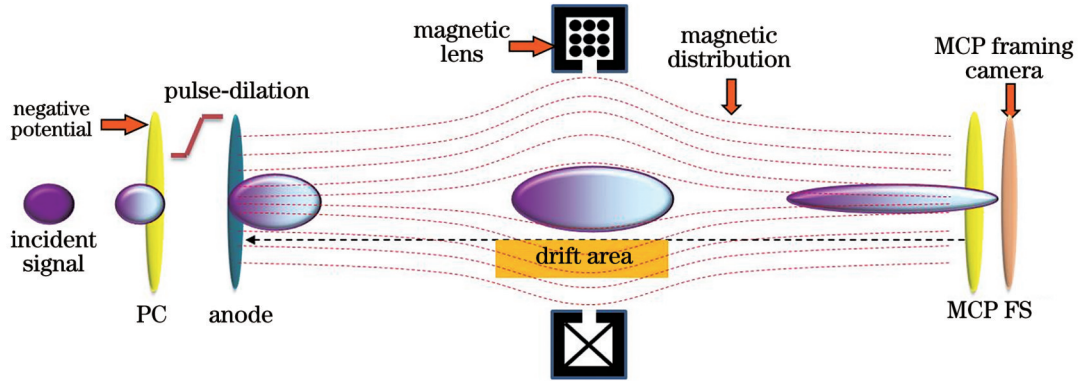


图1 脉冲展宽分幅相机结构
Fig.1 Structure of pulse-dilation framing camera

电阴极加载负电压且加速区加载展宽脉冲,因此信号前沿比后沿具有更大的加速能量;然后,在加速能量差的影响下,光电子脉冲信号经过漂移区传输至MCP,其前后沿的时间宽度被展宽;最后,利用MCP分幅相机测量展宽后的光电子脉冲信号,从而成倍提高时间分辨率^[15]。此外,相机成像是通过磁透镜来实现的,但由于磁透镜有屏蔽铁壳和漏磁缝隙,且产生轴对称不均匀磁场,因此在漂移区中的光电子脉冲将进行绕轴和聚焦运动,以至于形成具有一定旋转角度的像,同时也使传输过程的电子脉冲半径动态变化。

根据脉冲展宽分幅相机的工作原理和成像特点,设置以下参数:光电阴极、MCP、荧光屏的电压分别为

-4.0、-0.7、3.4 kV,磁透镜的孔径、缝隙、线圈匝数和激励电流分别为160 mm、15 mm、1200和0.368 A,光电子脉冲的时间宽度、半径和电子数分别为130 fs、200 μm 和10000,漂移区长度为0.5 mm,展宽脉冲斜率为10 V/ps。采用文献[15]和[16]的脉冲展宽计算方法和空间分辨率磁场调节方法,在半径为1 mm的圆形区域实现1:1成像。漂移区轴上随传输距离而变化的磁场分布、电子脉冲半径、时间宽度和电子密度结果如图2所示,其中磁场分布具有轴对称不均匀性,轴上最大磁场强度为 4.583×10^{-3} T;在磁透镜影响下,电子脉冲半径首先由初始的200 μm 左右被散焦至最大的633 μm ,然后又被聚焦至最小的56 μm ,最后

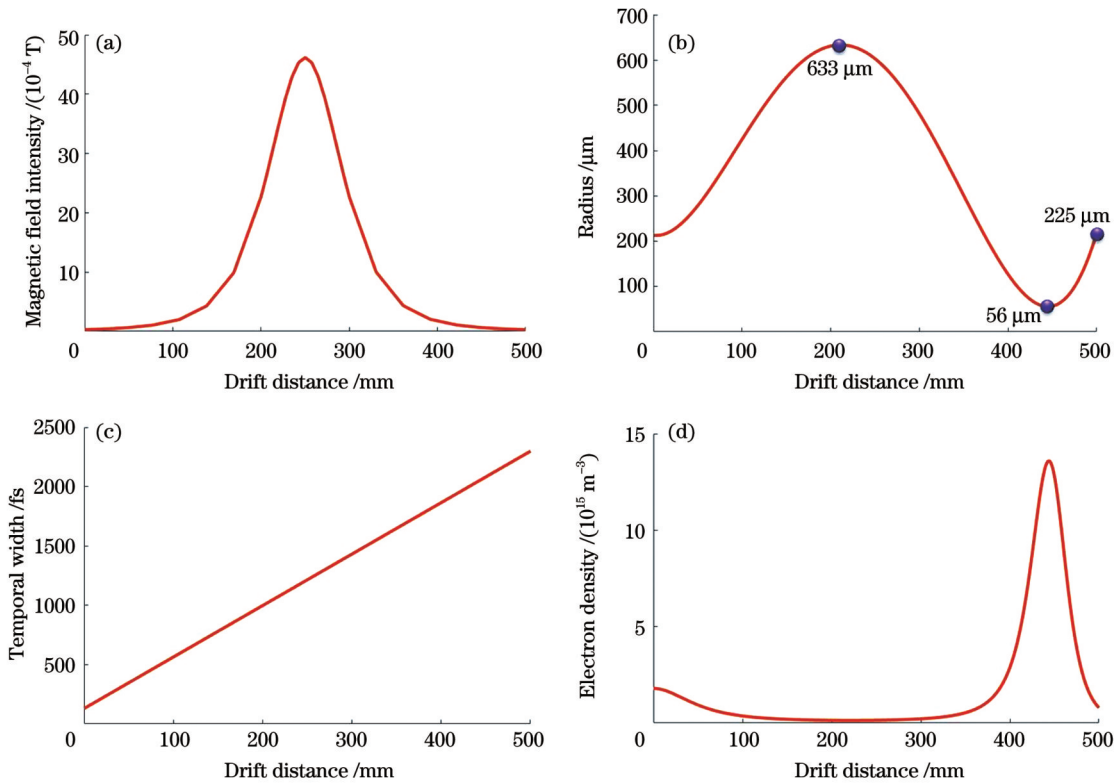


图2 脉冲展宽分幅相机中的电子脉冲动态特性。(a)轴上磁场分布;(b)动态半径;(c)动态时间宽度;(d)动态电子密度
Fig. 2 Dynamic characteristics of electronic pulse in pulse-dilation framing camera. (a) Magnetic field distribution on axis; (b) dynamic radius; (c) dynamic temporal width; (d) dynamic electron density

在漂移区末端的成像半径为 225 μm ; 而时间宽度则由 130 fs 线性展宽至 2.3 ps; 随着时间宽度和半径的变化, 根据脉冲粒子守恒原理^[13], 电子脉冲密度则从初始的 1.80×10^{15} 个/ m^3 下降至最小的 1.41×10^{14} 个/ m^3 , 然后增加到最大的 1.36×10^{16} 个/ m^3 , 最后在漂移区末端降低至 7.88×10^{14} 个/ m^3 。

3 空间电荷效应研究方法和不同磁场的标定方法

3.1 基于动态时间宽度和半径的空间电荷效应研究方法

在脉冲展宽分幅相机中, 由于阴极光电效应产生的电子脉冲空间尺度约为几十微米, 因此在电子脉冲半径为几百微米的情况 (即 r 远大于 l) 下, 电子脉冲的电势分布满足文献^[17]中提出的描述, 计算过程为

$$V(z, r) = \frac{Ne}{2\epsilon_0\pi r^2} (\sqrt{z^2 + r^2} + z), \quad (1)$$

式中: N 为电子数; e 为电荷量; ϵ_0 为真空介电常数; z 和 r 分别为与脉冲中心位置之间的轴向和径向距离。基于电场力原理, 电子脉冲内部的轴向和径向电场力可描述为

$$F_z = -e \frac{dV}{dz} = m \frac{dv_z}{dt} = \frac{m}{2} \frac{dz}{dt} = \frac{Ne}{2\epsilon_0\pi r^2} \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} + 1 \right), \quad (2)$$

$$F_r = -e \frac{dV}{dr} = m \frac{dv_r}{dt} = \frac{m}{2} \frac{dr}{dt} = \frac{Ne}{2\epsilon_0\pi r^3} \left(z \cdot \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} - r^2 - 2z^2 \right), \quad (3)$$

式中: m 为电子质量; t 为电子传输时间; v_z 为轴向速度; v_r 为径向速度。而根据脉冲展宽分幅相机中的电子脉冲运动特性, 令 $z=l/2$ 和 $r=R$, 在漂移过程中, 电场力对电子脉冲的动态轴向 Δt_{sec} 和径向 ΔR 展宽可描述为

$$\Delta t_{\text{sec}} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{Ne^2}{2m\epsilon_0\pi R_i^2} \left(\frac{l_i}{\sqrt{l_i^2 + 4R_i^2}} + 1 \right) \times \Delta t_i^2 \right] / \bar{v}_{\text{ep}}, \quad (4)$$

$$\Delta R = \sum_{i=1}^n \frac{Ne^2 (8l_i \sqrt{4l_i^2 + R_i^2} - R_i^2 - 2l_i^2)}{2m\epsilon_0\pi R_i^3 \sqrt{4l_i^2 + R_i^2}} \times \Delta t_i^2, \quad (5)$$

式中: l_i 和 R_i 分别为漂移时间 t_i 处的电子脉冲动态轴向宽度和半径; n 为漂移区的分段数, 此处取值为 500; \bar{v}_{ep} 为电子脉冲的平均速率。

3.2 基于空间分辨性能分析过程的不同磁场标定方法

在磁聚焦脉冲展宽分幅相机中, 磁场和成像倍

率是决定成像质量和空间分辨率的主要因素, 而最优空间分辨性能则需要成像倍率保持固定的情况下, 通过不断优化磁场强度来实现。为稳定成像倍率, 需要构建成像区域与磁场之间的关系, 实现不同磁场强度的合理标定。首先, 采用区域成像的方式, 通过调节磁场强度使一定区域 (半径为 1~20 mm) 实现 1:1 成像; 然后, 在不同磁场强度下, 通过追踪不同离轴位置电子运动轨迹以获取其成像分布, 再采用文献^[18]的瑞利判据方法来计算空间分辨率; 最后, 根据空间分辨率的范围、最大值与最小值的差值, 以及相对标准差 (RSD; D_{RSD}) 对不同磁场下的空间分辨性能进行分析, 获取最优空间分辨性能的成像磁场范围。在脉冲展宽分幅相机中, 空间分辨率的最小值不仅是最优参考值, 而且其波动程度也被认为是评价空间均匀性的准则之一。为评估空间分辨均匀度, 计算空间分辨率与其最小值的 RSD, 具体表达式为

$$D_{\text{RSD}} = \left\{ \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\min})^2}}{(n-1) / x_{\min}} \right\} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: x_i 和 x_{\min} 分别为离轴位置的空间分辨率和空间分辨率最小值。式 (6) 描述两种空间分辨率之间的偏差程度, 即离轴范围内的空间分辨均匀度。

磁场标定和空间分辨性能分析结果如图 3 所示, 随着阴极 1:1 成像区域的半径从 1 mm 扩大至 20 mm, 轴上磁场强度由 4.585×10^{-3} T 下降到 3.359×10^{-3} T, 由于离轴 15 mm 以外的电子仅在部分磁场范围内成像, 且空间分辨率相较于区域内的其他位置衰减过大, 因此, 根据整体成像最佳原则, 最优空间分辨性能的研究只考虑离轴 15 mm 内的区域。在空间分辨率曲线中, 离轴 15 mm 的空间分辨率随着磁场强度的降低而逐渐增加, 而其他离轴位置的变化则呈现凹形变化, 其中在离轴 0 mm 和 3 mm 的最优空间分辨率磁场范围为 $4.2 \times 10^{-3} \sim 4.3 \times 10^{-3}$ T, 离轴 6、9、12 mm 的范围分别为 $4.1 \times 10^{-3} \sim 4.2 \times 10^{-3}$ 、 $3.9 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ 、 $3.5 \times 10^{-3} \sim 3.6 \times 10^{-3}$ T。整体空间分辨性能的评价指标如图 3(c) 所示, 随着磁场强度变化, 空间分辨率最大值和最小值的范围分别为 165~543 μm 和 18~101 μm , 两者差值范围为 88~481 μm , 而针对空间分辨率最小值的 RSD 范围为 67%~1163%。综合空间分辨率范围、最大值与最小值的差值, 以及 RSD 结果, 离轴 15 mm 内最优空间分辨性能的轴上磁场强度范围为 $3.4 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}$ T, 此时空间分辨率范围为 77~185 μm , 最大与最小值之差的范围为 87~92 μm , RSD 范围为 73%~93%。研究结果表明, 通过动态调节成像磁场强度来分析脉冲展宽分幅相机最优空间分辨性能的过程, 不仅是探寻探测区域内空间分辨率最小变化范围的过程, 而且还是研究整体空间分辨率最小偏离程度的过程。

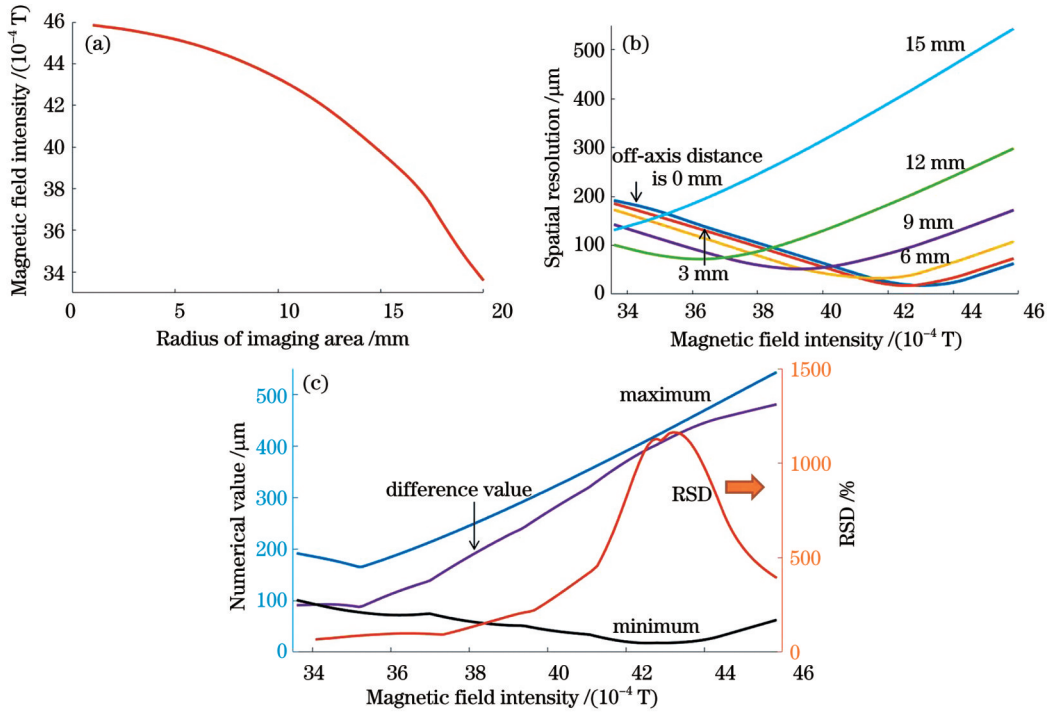


图 3 磁场标定和空间分辨性能分析。(a)轴上磁场强度变化过程;(b)随磁场强度变化的离轴空间分辨率;(c)性能评价指标
Fig. 3 Calibration of magnetic field and analysis of spatial resolution performance. (a) Changing process of magnetic field intensity of on axis; (b) off-axis spatial resolution with variation of magnetic field intensity; (c) performance evaluation index

4 磁场对空间电荷效应的影响

4.1 离轴磁场对空间电荷效应时空弥散的影响

在半径为 1 mm 阴极区域实现 1:1 成像,不同离

轴位置的最大磁场强度如图 4(a)所示。当离轴位置从轴上增加到 15 mm 时,磁场强度由轴上的 4.585×10^{-3} T 增强至 4.763×10^{-3} T,对应发射的电子脉冲动态半径如图 4(b)所示。由于受到离轴磁场强度的影

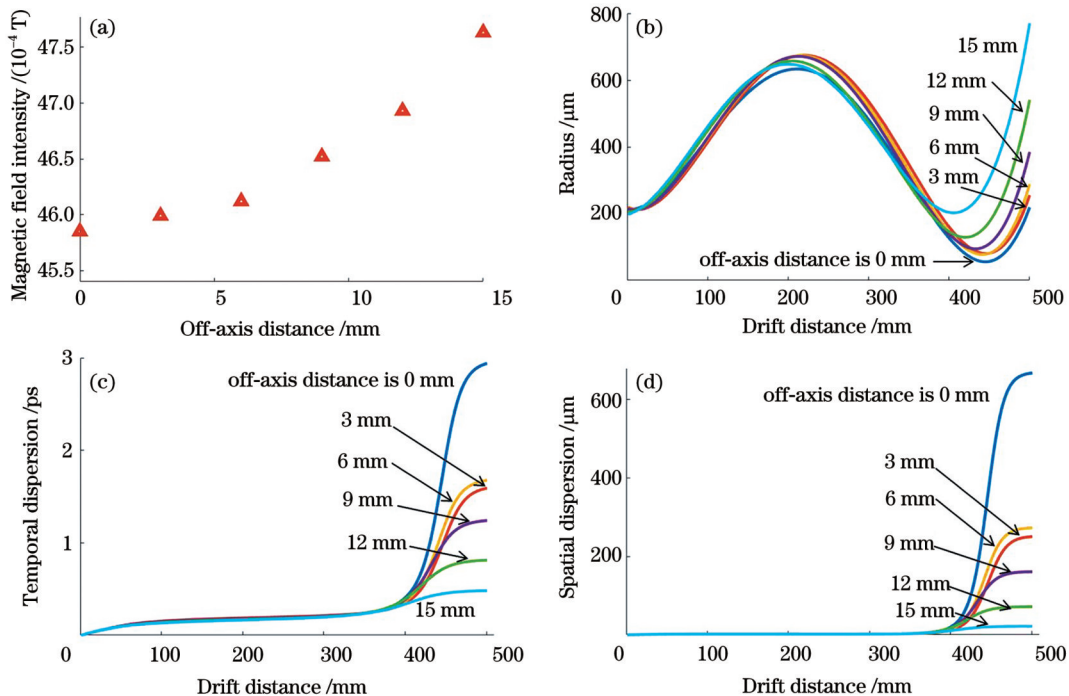


图 4 不同离轴位置的空间电荷效应时空弥散。(a)最大磁场强度;(b)电子脉冲动态半径对比;(c)时间弥散对比;(d)空间弥散对比
Fig. 4 Spatio-temporal dispersion of space charge effect with different off-axis positions. (a) Comparison of maximum magnetic field intensity; (b) comparison of dynamic radius of electronic pulse; (c) comparison of temporal dispersion; (d) comparison of spatial dispersion

响,离轴距离大的电子脉冲散焦较严重,因此平均半径比轴上的大。在该过程中,电子脉冲半径变化的最大值范围为 633~784 μm ,最小值范围为 56~198 μm ,通过漂移区时半径变化范围为 225~784 μm 。采用式(4)和式(5),计算得到不同离轴位置的空间电荷效应时间和空间弥散,如图 4(c)、(d)所示。在电子脉冲漂移过程中,半径的动态变化对空间电荷效应时空弥散产生显著的影响,其中时间弥散由轴上的 2.94 ps 变化至离轴 15 mm 的 483 fs,空间弥散则由 668 μm 变化至 22 μm 。

4.2 轴上磁场对空间电荷效应时空弥散的影响

基于图 3(a),在 10 个采样磁场强度不同的情况下,轴上和离轴 15 mm 发射半径为 200 μm 的电子脉冲,传输过程中的半径动态变化分别如图 5(a)、(b)所示,轴上磁场强度从 4.585×10^{-3} T 下降至 3.359×10^{-3} T,电子脉冲聚焦性降低,半径波动变化趋势逐渐平缓。轴上电子脉冲半径的最大值从 633 μm 增加至 705 μm ,最小值从 56 μm 增加至 206 μm ,通过漂移

区后半径从 205 μm 增加 406 μm ;离轴 15 mm 电子脉冲半径的最大值从 784 μm 减小至 694 μm ,最小值从 122 μm 增加至 209 μm ,通过漂移区后半径从 784 μm 减小至 367 μm 。随磁场强度变化的空间电荷效应时空弥散如图 5(c)、(d)所示,由于磁场强度和离轴位置对电子脉冲聚焦性和半径波动变化的影响不同,电子脉冲平均半径较大所对应的空间电荷效应时空弥散相对较小。随着磁场强度减小,轴上电子脉冲的时间弥散从 2.94 ps 减小至 257 fs,空间弥散从 668 μm 减小至 3.1 μm ;而离轴 15 mm 的电子脉冲的时间弥散从 483 fs 减小至 319 fs,空间弥散从 21.9 μm 减小至 6.9 μm 。分析结果显示,空间电荷效应的最小时空弥散和最优空间分辨性能的磁场范围基本一致,当轴上磁场强度范围为 3.4×10^{-3} ~ 3.5×10^{-3} T 时,由于电子脉冲半径动态波动相对较小且平均半径较大,因此空间电荷效应的时空弥散较小,在该磁场范围内轴上至离轴 15 mm 的时间弥散为 256~392 fs,空间弥散为 3.1~15.4 μm 。

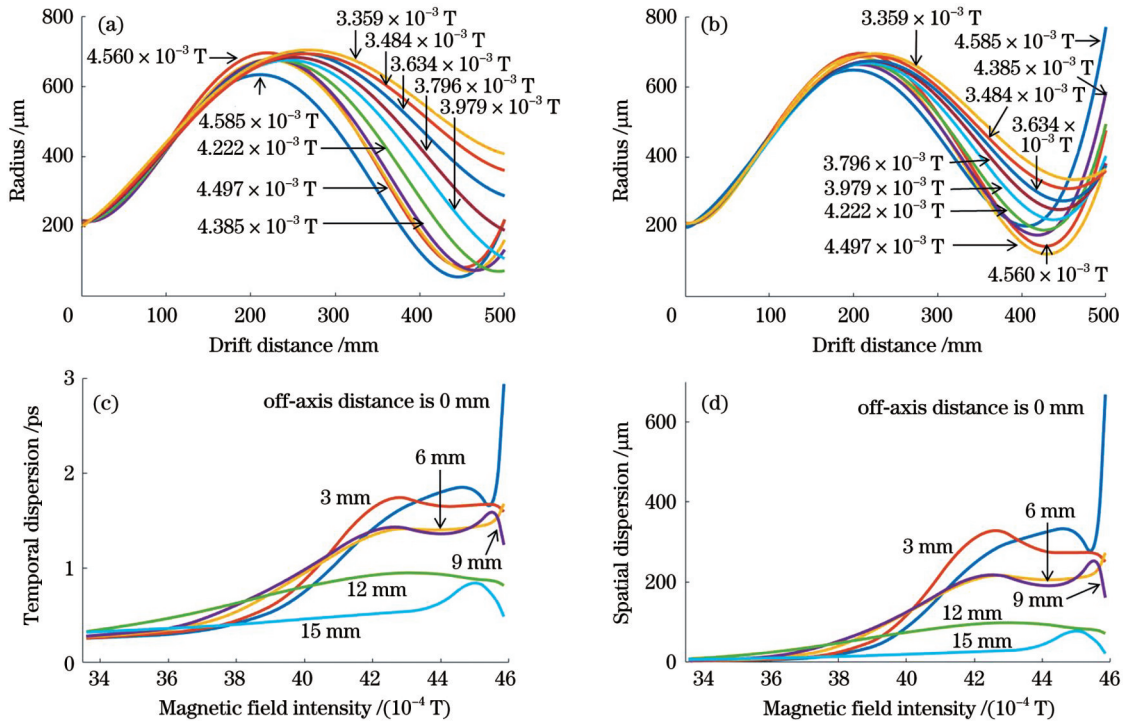


图 5 不同磁场强度下的空间电荷效应分析。(a)轴上电子脉冲的动态半径;(b)离轴 15 mm 电子脉冲的动态半径;(c)时间弥散;(d)空间弥散

Fig. 5 Analysis of space charge effect in different magnetic field intensities. (a) Dynamic radius of electronic pulse of on axis; (b) dynamic radius of 15 mm off-axis electronic pulse; (c) temporal dispersion; (d) spatial dispersion

5 结 论

介绍脉冲展宽分幅相机的工作原理和成像特点,分析传输过程中的电子脉冲动态特性,建立空间电荷效应时空弥散研究模型,通过最优空间分辨性能的分析过程对不同成像磁场实现标定,探讨轴上和离轴磁场对空间电荷效应的影响。研究结果显示,在脉冲展

宽分幅相机中,由于展宽脉冲和磁聚焦成像系统的影响,电子脉冲在传输过程中的时间宽度、半径和电子密度都是动态变化的,而由磁场引起的电子脉冲散焦和半径波动会导致电子密度急剧下降,同时也对空间电荷效应的时空弥散产生显著的影响。当成像区域半径为 1 mm 时,离轴位置从轴上增加至 15 mm 时,磁场强度由 4.585×10^{-3} T 增加至 4.763×10^{-3} T,由于离轴

位置电子脉冲散焦和动态半径远大于轴上,因此在减小电子密度的同时,使空间电荷效应的时间弥散由 2.94 ps 减小至 483 fs,空间弥散则由 668 μm 减小至 22 μm ;当成像区域半径逐渐扩大至 20 mm 时,轴上磁场强度由 4.585×10^{-3} T 减小至 3.359×10^{-3} T,而空间电荷效应时空弥散在 $3.4 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}$ T 区域内达到最优,此时轴上至离轴 15 mm 的时间弥散范围为 256~392 fs,空间弥散范围为 3.1~15.4 μm 。研究者一方面通过分析脉冲展宽分幅相机的最优空间分辨性能来确定不同磁场的合理标定方法;另一方面也为分析磁场与空间电荷效应之间的关系提供理论依据。在今后的研究中,将从不同类型的磁聚焦成像系统和长漂移区等方面出发,来研究空间电荷效应时空弥散,为实现更高时间分辨率的脉冲展宽分幅相机提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] Benedetti L R, Holder J P, Perkins M, et al. Advances in X-ray framing cameras at the National Ignition Facility to improve quantitative precision in X-ray imaging[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2): 023511.
- [2] Nagel S R, Benedetti L R, Bradley D K, et al. Comparison of implosion core metrics: a 10 ps dilation X-ray imager vs a 100 ps gated microchannel plate[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E311.
- [3] Zylstra A B, Hurricane O A, Callahan D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. *Nature*, 2022, 601: 542-548.
- [4] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenney 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.
- [5] 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.
- [6] Trosseille C, Nagel S R, Hilsabeck T J. Electron pulse-dilation diagnostic instruments[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(2): 021102.
- [7] 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.
- [8] Bai Y L, Yao R B, Gao H Y, et al. Measurement of dilation pulses using a pulse-dilation framing camera[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15407-15415.
- [9] Bai Y L, Yao R B, Gao H Y, et al. Measurement and analysis of temporal performance using different gradients of dilation pulse in the framing camera[J]. *Optik*, 2020, 221: 165360.
- [10] Cai H Z, Luo Q Y, Lin K X, et al. Development of an ultrafast detector and demonstration of its oscillographic application[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 33(6): 72.
- [11] MacPhee A G, Dymoke-Bradshaw A K L, Hares J D, et al. Improving the off-axis spatial resolution and dynamic range of the NIF X-ray streak cameras (invited) [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E202.
- [12] Jiang Y L, Dong Q L. Electron beam modeling and analyses of the electric field distribution and space charge effect[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(5): 054103.
- [13] Qian B L, Elsayed-Ali H E. Electron pulse broadening due to space charge effects in a photoelectron gun for electron diffraction and streak camera systems[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(1): 462-468.
- [14] Siwick B J, Dwyer J R, Jordan R E, et al. Ultrafast electron optics: propagation dynamics of femtosecond electron packets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(3): 1643-1648.
- [15] 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): 0532001.
Wu S Q, Bai Y L, Gao H Y, et al. Improvement of temporal uniformity of pulse-dilation framing camera using pulse superposition technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 0532001.
- [16] 陈欢, 白雁力, 钟思. 脉冲展宽分幅变像管的最优成像磁场研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(18): 1811007.
Chen H, Bai Y L, Zhong S. Optimal imaging magnetic field of pulse-dilation framing image converter tube[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(18): 1811007.
- [17] Qian B L, Elsayed-Ali H E. Comment on "Ultrafast electron optics: propagation dynamics of femtosecond electron packets" [J. Appl. Phys. 92, 1643 (2002)] [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(1): 803-806.
- [18] 陈欢, 白雁力, 钟思. 基于瑞利判据的分幅相机空间调制传递函数[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2022, 20(9): 973-977.
Chen H, Bai Y L, Zhong S. Spatial modulation transfer function of framing camera using Rayleigh criterion[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2022, 20(9): 973-977.

Influence of Magnetic Field on Space Charge Effect in Pulse-Dilation Framing Camera

Bai Yanli, Song Mingcheng, Zhu Wangchun*

School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract

Objective In the inertial confinement fusion (ICF) experiment, the microchannel plate (MCP) framing camera is an important two-dimensional ultrafast diagnostic device that is used to acquire the duration and dynamic image of plasma at

the stage of implosion compression. However, due to limitations of the electronic transmission time and its dispersion in the channel of the MCP, the temporal resolution is restricted to 60–100 ps for a long time. In order to further improve temporal resolution, a pulse-dilation framing camera (PDFC) is developed, which couples the MCP framing camera with the temporal dilation technique of the electron beam. With an ultrafast temporal resolution of better than 10 ps, it is easier to meet the detection requirements of the shorter duration states in the ICF. Therefore, the relevant ways and techniques of the PDFC are gradually focused on the field of ultrafast diagnosis. The PDFC is a new kind of framing camera with a long drift region using the imaging of magnetic focusing technique. Due to its similar structure to the streak camera, the improvement of its spatio-temporal performance to a higher order is restricted by the space charge effect (SCE). Moreover, the temporal width and radius of the electronic pulses (EPs) are dynamically changed by the dilating pulse and magnetic focusing in the PDFC. Therefore, building the model of the SCE that meets the dynamic parameters of the EPs and analyzing the influence of the dynamic radius caused by magnetic focusing on the spatio-temporal dispersions will be an important theoretical significance for systemically studying the SCE of the PDFC.

Methods In the research, to analyze the influence of magnetic field on the spatio-temporal dispersions of the SCE, first of all, the model of the PDFC using magnetic focusing is built, and the dynamic characteristics of EPs during transmission are analyzed by the working principle of the PDFC. Then, the spatio-temporal dispersion model of the SCE is deduced by solving the equation of the electric field force based on the two-dimensional potential distribution of the EPs. To build a relationship between magnetic field and imaging area, while ensuring consistent imaging magnification, the different imaging magnetic fields are reasonably calibrated through the analysis procedure of optimal spatial performance of the PDFC based on the method of regional imaging. Finally, the dynamic temporal width and radius of the EPs are applied to the model of the SCE in different magnetic fields, and the spatio-temporal dispersions of different off-axis positions are analyzed.

Results and Discussions The innovative and significant research results are mainly summarized in three aspects. First, the dynamic variation of the electronic density during transmission is analyzed in the PDFC, on which the dynamic temporal width and radius of the EPs are based [Fig. 2 (d)]. Second, under consistent imaging magnification, the optimal spatial performance of the PDFC is analyzed, and different imaging magnetic fields are reasonably calibrated by regional imaging (Fig. 3). Third, the dynamic temporal width and radius of the EPs are applied to the model of the SCE. When the radius of the imaging region is 1 mm, as the off-axis position increases from 0 mm to 15 mm, the magnetic field intensity is enlarged from 4.585×10^{-3} T to 4.763×10^{-3} T. The defocusing and dynamic radius of EPs of the off-axis are much larger than those of the on-axis. Therefore, as the electronic density of the EPs reduces, the temporal dispersion of the SCE is reduced from 2.94 ps to 483 fs, and the spatial dispersion is reduced from 668 μm to 22 μm (Fig. 4). When the radius of imaging region is gradually enlarged to 20 mm, the magnetic field intensity of the on-axis is reduced from 4.585×10^{-3} T to 3.359×10^{-3} T, and the spatio-temporal dispersions of the SCE are optimum value in the range of 3.4×10^{-3} – 3.5×10^{-3} T. The range of temporal dispersions of different positions is 256–392 fs, and spatial dispersions is 3.1–15.4 μm (Fig. 5).

Conclusions In the PDFC, the temporal width, radius, and electronic density of the EPs during the transmission process are dynamically changed by the effect of the dilating pulse and the imaging system of magnetic focusing. Moreover, the spatio-temporal dispersions of the SCE are significantly affected by the defocusing of the EPs and the fluctuation of radius caused by a magnetic field. According to the research methods and results, on the one hand, the different magnetic field is reasonably calibrated through the analysis of the optimal spatial performance of the PDFC; on the other hand, it also provides a theoretical basis for analyzing the relationship between the magnetic field and the SCE. In the next stage, to provide a theoretical basis for achieving faster temporal resolution of the PDFC, the spatio-temporal dispersions of the SCE are systematically studied from different types of magnetic focusing imaging systems and the long drift regions.

Key words ultrafast optics; ultrafast diagnosis technique; pulse-dilation framing camera; space charge effect; imaging magnetic field; spatio-temporal dispersion