

脉冲展宽分幅变像管的最优成像磁场研究

陈欢¹, 白雁力¹, 钟思^{2*}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桂林电子科技大学教学实践部, 广西 桂林 541004

摘要 磁聚焦脉冲展宽分幅变像管是时间分辨率优于 10 ps 的超快诊断设备, 其空间分辨率与成像磁场密切相关。为讨论该问题, 建立了脉冲展宽分幅变像管模型, 在不同半径发射区域成像磁场下, 采用瑞利判据对点成像分布计算空间分辨率, 并基于轴上最优和物点间差异最小原则, 分析最优成像磁场。研究表明, 在单磁透镜脉冲展宽分幅变像管中, 整体空间分辨率不随磁场增大或减小而变好, 而是存在一个特定发射区域对应的成像磁场, 使其达到最优。当透镜孔径为 160 mm、漏磁缝隙为 4 mm、轴向宽度为 100 mm、漂移区为 500 mm 和电子发射能量为 3 keV 时, 8 mm 半径区域的成像磁场为最优, 其轴上最大磁场为 37.87×10^{-4} T。在微通道板空间分辨率为 55 μm 和缩小 1 倍成像的情况下, 物面 0、5、10、15 mm 位置的空间分辨率分别为 29.86、43.08、87.07、276.88 μm , 模拟计算结果与已测数据基本吻合。研究结论为建立成像磁场和整体空间分辨率之间的联系及最优化空间分辨率的模拟计算提供了一种具有参考性的方法。

关键词 成像系统; 超快诊断技术; 脉冲展宽分幅变像管; 磁聚焦; 成像磁场; 瑞利判据

中图分类号 TN143

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1811007

Optimal Imaging Magnetic Field of Pulse-Dilation Framing Image Converter Tube

Chen Huan¹, Bai Yanli¹, Zhong Si^{2*}¹School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²Teaching Practice Department, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract The magnetically focused pulse-dilation framing image converter tube is an ultrafast diagnosis device with a temporal resolution within 10 ps and a spatial resolution that closely relates to the imaging magnetic field. In this study, a model of a pulse-dilation framing image converter tube was constructed and the spatial resolution of the point imaging distribution was calculated under the Rayleigh criterion. The imaging magnetic field was applied with emission areas of different radii, and the imaging magnetic field was optimized by finding the optimal on-axis and minimum difference between object points. In the pulse-dilation framing image converter tube with a magnetic lens, the overall spatial resolution was not improved by increasing or decreasing the magnetic field, but was optimized by the magnetic field of the specific emission area. When the lens aperture is 160 mm, the slit width is 4 mm, the axial width is 100 mm, the drift area is 500 mm, and the emission energy is 3 keV, the imaging magnetic field is optimized by setting the emission area radius to 8 mm and the maximum magnetic field along the axis to 37.87×10^{-4} Tesla. As the spatial resolution of the microchannel plate is 55 μm and the imaging is 1 : 2, the spatial resolutions are 29.86 μm , 43.08 μm , 87.07 μm , and 276.88 μm at locations of 0 mm, 5 mm, 10 mm, and 15 mm on the object plane, respectively. The simulation results are consistent with the measured data. This work provides a reference method for establishing the relationship between the imaging magnetic field and overall spatial resolution and for optimizing the calculations of the spatial resolution simulation.

Key words imaging systems; ultrafast diagnosis technology; pulse-dilation framing image converter tube; magnetic focus; imaging magnetic field; Rayleigh criterion

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-05-26; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(11865007)、广西自然科学基金面上项目(2022GXNSFAA035561)、广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金(YQ22101)

通信作者: *zhongsikm@qq.com

1 引言

惯性约束聚变(ICF)是利用大功率激光对称辐射氘氚燃料靶丸表面,使靶丸向中心内爆压缩至临界状态,从而实现可控核聚变反应的一种有效途径^[1-3]。ICF实验会产生大量的高温高密度等离子体,通过分幅变像管获取它们的时空演化过程能为靶压缩对称性和不稳定性的研究提供重要实验数据^[4]。微通道板(MCP)分幅变像管应用广泛,但受限于光电子在MCP通道内的时间弥散,其时间分辨率局限于60~100 ps^[5],很难满足聚变燃烧阶段100 ps的测量需求。脉冲展宽分幅变像管是时间分辨率优于10 ps的新一代诊断工具,在聚变燃烧阶段能获得更细致的等离子体时空演化状态,其核心组件包括阴极、阳极、漂移区、磁聚焦成像系统和MCP分幅相机。在工作中,当阴阳极间加载负电压和展宽脉冲时,可使阴极上先产生的光电子具有较大加速能量,所以在磁聚焦作用下,光电子信号经过漂移区传输并成像在MCP上后,其时间宽度已被展宽数倍。最后,采用MCP门控脉冲选通展宽后的光电子信号,可以实现分幅变像管时间分辨率的成倍提升^[6]。

在脉冲展宽分幅变像管的理论研究中,时间分辨率主要基于电子束时间展宽原理^[7-9],而空间分辨率则随成像系统而各不相同。在螺线管透镜成像系统方面:美国研究者基于匀强磁场电子运动理论,建立了空间分辨率与磁场强度之间的正比关系,将4倍电子绕轴运动半径标定为阴极空间分辨率^[10];国内研究者设计了一个5 lp/mm的发射源,在不断增加磁场的基础上,采用分辨电子成像分布的方式标定空间分辨率^[11]。在短磁透镜成像系统方面:研究者通过计算电子成像分布的均方根半径,建立空间调制传递函数,将0.1调制度对应值标定为极限空间分辨率^[12-14];而另一些研究者则直接将电子成像分布的半高宽标定为空间分辨率^[15-16]。对于螺线管透镜,由于研究者将其类比为均匀磁场,以不断增加磁场强度提升空间分辨率为原则,虽然建立了空间分辨率与成像磁场的关系,但未获得最优成像磁场。而对于短磁透镜,研究者直接采用点成像获得成像磁场和空间分辨率,忽略了轴对称磁场对不同位置物点成像的影响,且未建立整体最优空间分辨率与成像磁场之间的关系。

根据上述研究方法的特点,本文以短磁聚焦成像系统脉冲展宽分幅变像管为对象,通过区域成像获取成像磁场和瑞利判据来计算空间分辨率,建立整体最优空间分辨率和成像磁场之间的关系。首先,建立单磁透镜脉冲展宽分幅变像管模型,分析电子运动和成像特点;然后,基于区域成像理念和瑞利判据方法,在不同成像区域对应的磁场下对空间分辨率进行展开分析;最后,基于轴上空间分辨最优和物点间空间分辨率最小原则,分析单磁透镜脉冲展宽分幅变像管的最

优磁场,并将空间分辨与已获得实验结果对比,探讨研究思路的可行性。

2 磁聚焦脉冲展宽分幅变像管中的成像特点

磁聚焦脉冲展宽分幅变像管模型如图1(a)所示,由阴极、阳极、磁透镜、成像面和500 mm漂移区构成,其中磁透镜的孔径为160 mm,漏磁缝隙为4 mm,轴向宽度为100 mm^[17]。沿漂移方向的轴上磁场分布如图1(b)所示,呈现单波峰轴对称特性。典型的三维电子轨迹如图1(c)所示,在轴对称磁场作用下,阴极发射的电子在漂移过程中做向轴会聚和绕轴旋转运动^[18],由物面的P_s点发出电子,聚焦于像面上P_e点。从该电子轨迹在与轴垂直平面内的投影[图1(d)]可知,成像点位置相对于物点旋转了 θ 。根据成像特点,从阴极轴上物点发射若干个电子的成像如图1(e)所示,由于电子初始参量差异和磁透镜的影响,通过漂移区传输后,物点的成像将不再是一个理想的成像点,而呈现为一个弥散斑。成像分布弥散斑的直方图统计(sample)及其高斯拟合归一化如图1(f)所示。

3 空间分辨率计算方法

瑞利判据(Rayleigh criterion)指一个成像弥散斑边缘与另一个成像弥散斑中心正好重合时,对应的两个物点恰能分辨^[19]。基于空间分辨率是辨别两相邻物点之间距离的物理意义,采用瑞利判据计算脉冲展宽分幅变像管空间分辨率的过程如图2所示,其中图2(a)是从阴极轴心为中心的两个相邻物点分别发射10000个电子,所获得的成像弥散斑(Left_spot和Right_spot),其直方图的高斯曲线如图2(b)的G-Left_spot和G-Right_spot所示,其中G-Left_spot边缘(L_{min}点)与G-Right_spot中心(R_{max}点)正好重合。根据成像特征和瑞利判据准则,将图2(a)的Left_spot和Right_spot作为一个整体,再进行直方图统计(sample)和双峰高斯曲线归一化,最后将波峰间距38.98 μm 标定为成像系统空间分辨率。另外,通过该双峰高斯曲线,可计算获得空间分辨率对应的成像调制度,计算公式^[20]为

$$M = \left(\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: I_{\max} 为成像分布最大强度(双峰高斯曲线最大值); I_{\min} 为成像分布之间的最小强度(曲线波谷0.67)。代入相关数据,可得空间分辨率对应的成像调制度为19.6%。

4 研究过程和结果

脉冲展宽分幅变像管是二维成像设备,其成像空

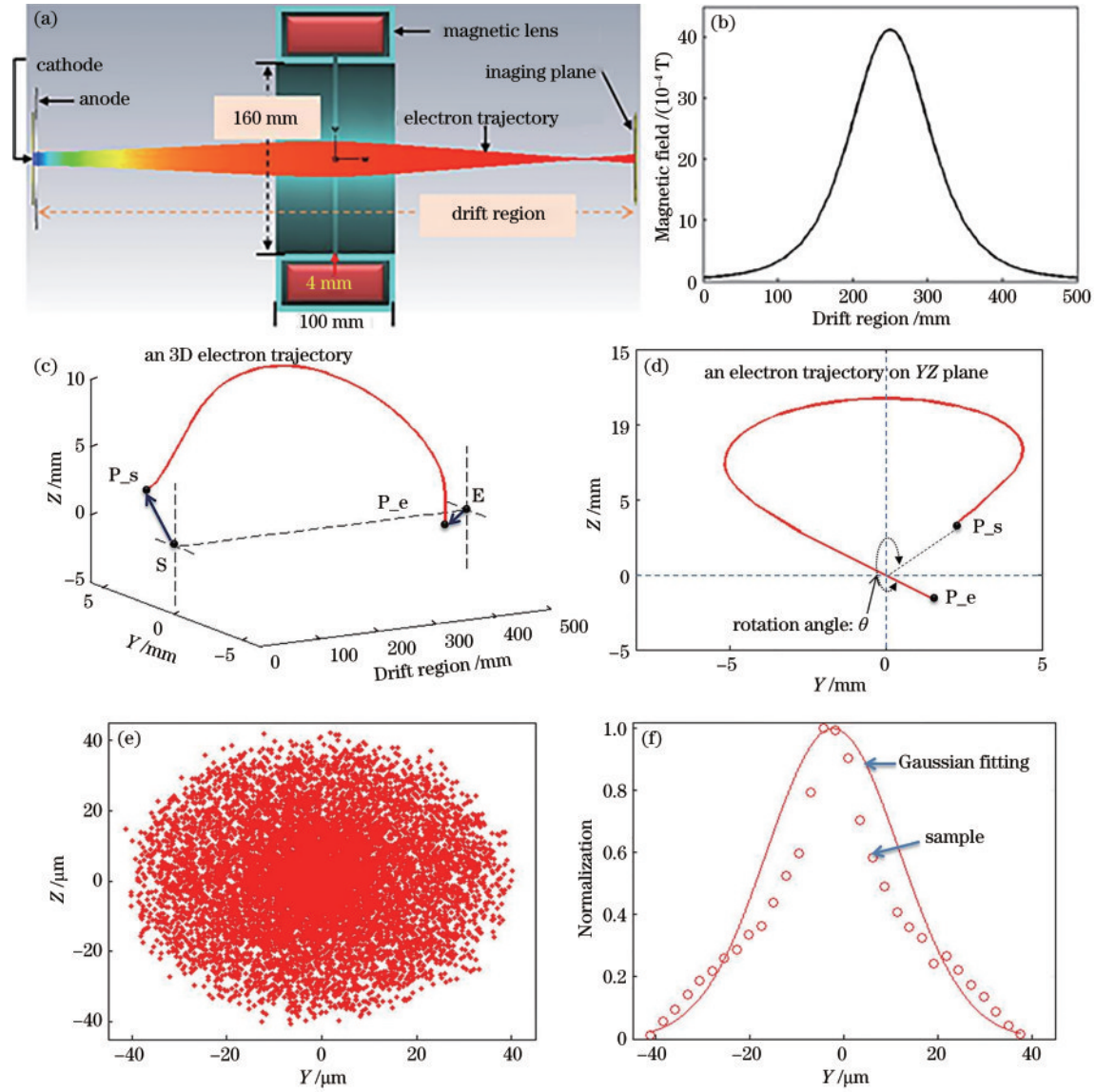


图 1 磁聚焦脉冲展宽分幅变像管模型和成像性能。(a)模型;(b)轴上磁场分布;(c)三维电子轨迹;(d)电子轨迹在YZ平面的投影;(e)轴上物点成像的弥散斑;(f)弥散斑的高斯拟合归一化

Fig. 1 Model and imaging performance of magnetic focusing pulse-dilation framing image converter tube. (a) Model; (b) magnetic field distribution of on-axis; (c) three-dimensional electron trajectory; (d) projection of electron trajectory on YZ plane; (e) diffuse spot of object point imaging of on-axis; (f) normalization of Gaussian fitting

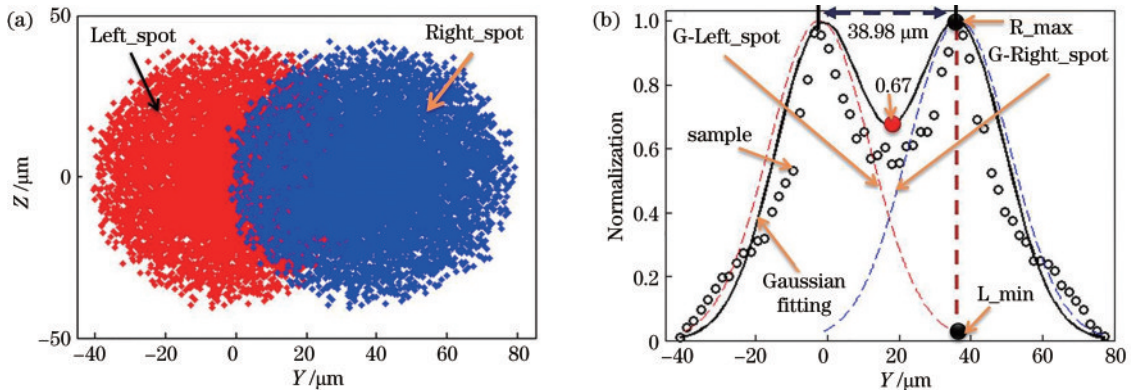


图 2 基于瑞利判据计算空间分辨率过程。(a)轴上相邻物点成像分布;(b)空间分辨率计算

Fig. 2 Calculation process of spatial resolution using Rayleigh criterion. (a) Imaging distribution of adjacent object point of on-axis; (b) calculation of spatial resolution

间分辨率整体最优的要求是获得良好的近轴空间分辨,且不同位置物点间的空间分辨差异较小。因此,基于整体空间分辨原则,采用区域成像获取成像磁场和瑞利判据计算空间分辨率,通过建立整体空间分辨率与成像磁场之间的关系,分析脉冲展宽分幅变像管的最优成像磁场。研究模型如图 1(a)所示,光电子初始参量满足以下分布^[8]:出射能量 ξ 满足 β 分布,如式(2)所示,其中 k 和 l 为 β 分布的形状参数,通常取 1 和 4;发射俯仰角 $c(\theta)$ 满足余弦分布,如式(3)所示;方位角满足 $(0, 2\pi)$ 范围内的均匀分布;发射位置服从发射半径范围内的均匀分布;发射时间 $g(t)$ 服从高斯分布,如式(4)所示。

$$\beta(\xi; k, l) = \frac{(k+l+1)!}{k! l!} \xi^k (1-\xi)^l, \quad (2)$$

$$c(\theta) = \frac{\pi^2}{2(\pi-2)} \theta \cos\left(\frac{\pi}{2}\theta\right), \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma_t^2}\right]. \quad (4)$$

当电子发射能量为 3 keV 时,在阴极上设置不同半径的发射区域获取的 1:1 的成像效果和轴上最大磁场强度分别如图 3(a)、(c)所示。随着成像区域的增大,磁场强度将逐渐减小,其中半径 1 mm 和 5 mm 区域的成像磁场强度分别为 40.40×10^{-4} T 和 39.39×10^{-4} T。在两种成像磁场下,从阴极轴上(0 mm)和离轴(5 mm, 10 mm, 15 mm)物点,分别发射 10000 个电子的成像如图 3(b)、(d)所示。在同一成像磁场下,随着物点离轴距离增加,成像分布弥散斑逐渐变大,特别是离轴超过 10 mm 之后,单磁透镜成像空间分辨率将逐渐变差,且从成像分布与轴心偏转情况上观察,整体成像还伴随着畸变的出现。而在不同成像磁场下,同一物点的成像分布会发生变化,而且物点之间的成像分布弥散程度差异也有所不同。

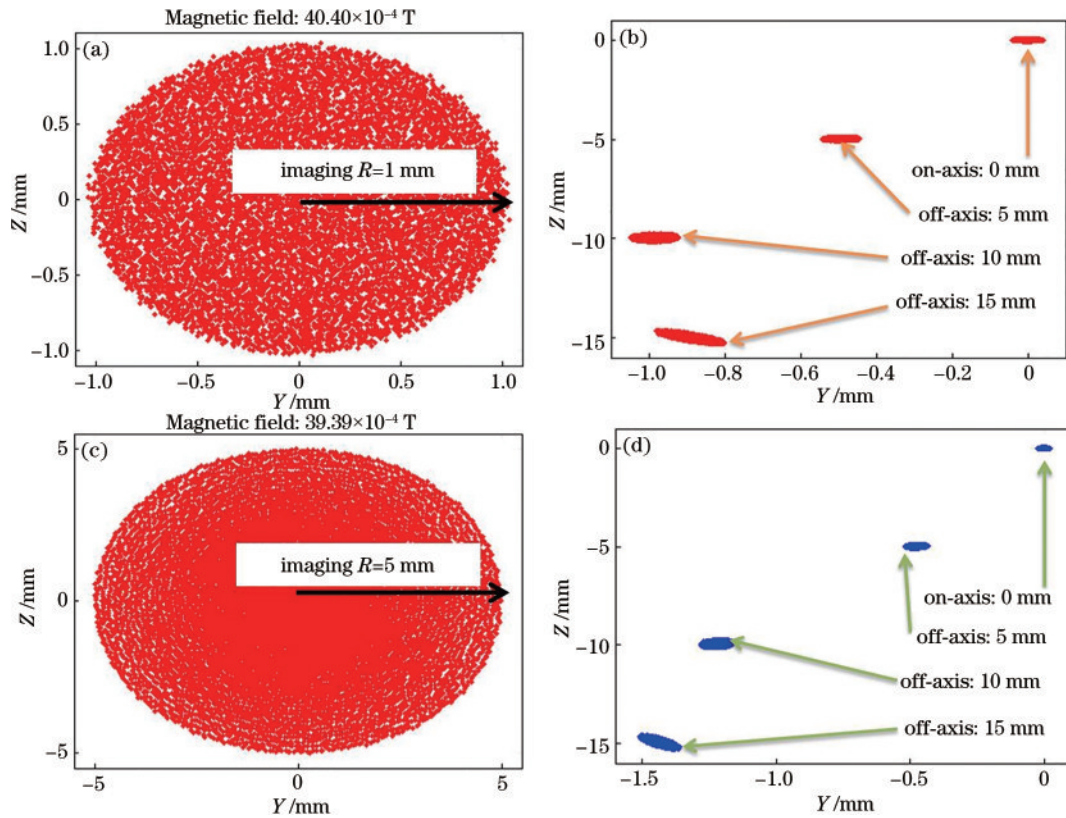


图 3 不同发射区域的成像。(a)半径 1 mm 发射区域的成像;(b)半径 1 mm 区域成像磁场下的点成像;(c)半径 5 mm 发射区域的成像;(d)半径 5 mm 区域成像磁场下的点成像

Fig. 3 Imaging of different emission areas. (a) Imaging of the emission area with 1 mm radius; (b) imaging of points under the magnetic field of area with 1 mm radius; (c) imaging of the emission area with 5 mm radius; (d) imaging of points under the magnetic field of area with 5 mm radius

通过调节成像磁场,满足发射区域半径 1~15 mm 能 1:1 成像的轴上最大磁场如图 4(a)所示。当成像区域半径为 1 mm 时,轴上最大磁场强度分别为 40.40×10^{-4} T,而将半径增加到 15 mm 时,磁场下降至 30.82×10^{-4} T。在不同成像区域的成像磁场下,通过

瑞利判据计算的阴极轴上(0 mm)和离轴(5 mm, 10 mm, 15 mm)的空间分辨率对比如图 4(b)所示。从图中可以看出,空间分辨率并非随着磁场不断增大或是减小而逐渐变好,而是存在一个最优的成像磁场使整体空间分辨率达到最优。基于轴上空间分辨最优和

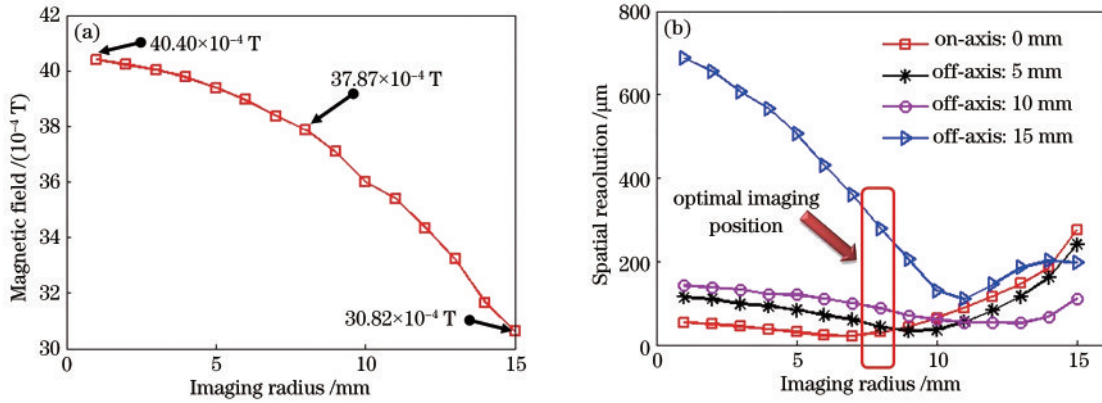


图 4 最优磁场分析。(a)不同成像区域的轴上最大磁场;(b)不同磁场下的空间分辨率对比

Fig. 4 Analysis of optimal magnetic field. (a) Maximum magnetic fields of on-axis of different imaging areas; (b) comparison of spatial resolution under different magnetic fields

物点间空间分辨差异最小的原则,当成像区域半径为 8 mm 时,轴上最大磁场强度为 37.87×10^{-4} T 的磁场为单磁透镜成像系统的最优成像磁场,此时阴极 0、5、10、15 mm 位置的空间分辨率分别为 29.86、43.08、87.07、276.88 μm ,对应的成像调制度分别为 15.11%、14.07%、17.44% 和 20.14%。根据文献 [10] 中的方法计算脉冲展宽分幅变像管的总空间分辨率:

$$\delta_{\text{instr}} = \sqrt{\delta_{\text{PC}}^2 + (D_{\text{Mag}} \times \delta_{\text{MCP}})^2}, \quad (5)$$

式中: δ_{MCP} 为 MCP 空间分辨率; δ_{PC} 为阴极空间分辨率; δ_{instr} 为脉冲展宽分幅变像管总的空间分辨率; D_{Mag} 为成像倍率的倒数。当 δ_{MCP} 为 55 μm [21] 和 D_{Mag} 为 2 (成像倍率 0.5) 时,变像管在阴极 0、5、10、15 mm 位置的空间分辨率分别为 113.98、118.14、140.29、297.93 μm ,该空间分辨率的计算结果与文献 [22、23] 采用分辨率板阴极的测试结果吻合。由此可见,采用区域成像获取成像磁场和瑞利判据计算空间分辨率,通过建立整体空间分辨率与成像磁场的关系,研究磁聚焦脉冲展宽分幅变像管的最优成像磁场是可行的。

5 结 论

介绍了磁聚焦脉冲展宽分幅变像管的工作原理和成像特点,采用 CST 粒子工作室软件构建研究模型,基于整体空间分辨原则,采用区域成像获取成像磁场和瑞利判据计算空间分辨率,通过建立整体空间分辨率与成像磁场之间的关系,分析脉冲展宽分幅变像管的最优成像磁场。研究结果显示,成像区域增大伴随成像磁场减小,而变像管空间分辨率并非随磁场持续增大或减小而逐渐变好,而是存在一个成像磁场,使整体空间分辨率达到最优。在单磁透镜脉冲展宽分幅变像管中:当透镜孔径为 160 mm、漏磁缝隙为 4 mm、轴向宽度为 100 mm、漂移区为 500 mm、电子发射能量为 3 keV 时,8 mm 半径发射区域的成像磁场为最优,其轴上最大磁场为 37.87×10^{-4} T,此时阴极 0、5、10、

15 mm 位置的空间分辨率分别为 29.86、43.08、87.07、276.88 μm ,成像调制度对分别为 15.11%、14.07%、17.44% 和 20.14%;而当 MCP 空间分辨率为 55 μm 、成像倍率为 0.5 时,单磁透镜脉冲展宽分幅变像管,在阴极 0、5、10、15 mm 位置的变像管空间分辨率分别为 113.98、118.14、140.29、297.93 μm ,模拟结果与已有实验结果基本一致。研究结论为磁聚焦脉冲展宽分幅变像管的最优成像磁场分析提供了一种参考方法。

参 考 文 献

- [1] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. Nature Physics, 2016, 12(5): 435-448.
- [2] Badziak J, Domański J. Laser-driven acceleration of ion beams for high-gain inertial confinement fusion[J]. Nuclear Fusion, 2021, 61(4): 046011.
- [3] Zylstra A B, Hurricane O A, Callahan D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. Nature, 2022, 601(7894): 542-548.
- [4] Budil K S, Perry T S, Bell P M, et al. The flexible X-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(2): 485-488.
- [5] 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.
- [6] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E317.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Bai Y L, Yao R B, Gao H Y, et al. Obtainment of

- dilating pulse using pulse-dilation framing camera[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 15407-15415.
- [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]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11E504.
- [11] 袁铮, 杨志文, 李晋, 等. 基于光电子脉冲展宽的高时间分辨率成像技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 052007.
Yuan Z, Yang Z W, Li J, et al. Ultrafast time resolution 2D imaging technology based on photoelectron pulse quasi-linearly dilation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(5): 052007.
- [12] 白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 短磁聚焦分幅变像管空间分辨率的模拟与测试[J]. 深圳大学学报(理工版), 2015, 32(2): 178-182.
Bai Y L, Long J H, Cai H Z, et al. Simulated and measured spatial resolution of framing converter using short magnetic focusing[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2015, 32(2): 178-182.
- [13] 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.
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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Liu J Y, Fu W Y, Deng P K, et al. Simulation of a pulse-dilation framing tube with sensitive diameter of 60 mm using large aperture short magnetic lens[J]. Optik, 2020, 203: 163974.
- [17] 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.
- [18] Li X D, Bai Y L. Influence of lens aperture size on spatial performance of short magnetic focusing framing camera[J]. Optik, 2020, 202: 163659.
- [19] Bochkov G N, Gavrilin A T, Gorokhov K V. Generalized Rayleigh criterion of two-point resolution[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 2005, 48(5): 394-397.
- [20] Csorba I P. Modulation transfer function of image tube lenses[J]. Applied Optics, 1977, 16(10): 2647-2650.
- [21] 白雁力, 姚荣彬, 高海英, 等. 高时间分辨分幅成像技术分析及其性能测试[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 0624002.
Bai Y L, Yao R B, Gao H Y, et al. Analysis and performance test of the high temporal resolution framing imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(6): 0624002.
- [22] 廖昱博, 刘进元, 蔡厚智, 等. 磁聚焦变像管像场弯曲的改善研究[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1004004.
Liao Y B, Liu J Y, Cai H Z, et al. Improvement of field curvature in magnetic-focusing image converter tube[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1004004.
- [23] 雷云飞, 刘进元, 蔡厚智, 等. 双透镜脉冲展宽分幅相机成像特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(18): 1832001.
Lei Y F, Liu J Y, Cai H Z, et al. Study of the imaging performance of the double lenses pulse-dilation framing camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(18): 1832001.