2024年8月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2024)08-0918-06

磁聚焦分幅变像管空间分辨特性

罗秋燕¹,林楷宣¹,陈嘉杰¹,王佳恒¹,邓 萱¹,刘俊凯¹,杨恺知¹,黄峻堃², 王 东¹,刘进元¹,牛丽红¹,蔡厚智^{*1}

(1.深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060; 2.北方夜视科技有限公司, 云南 昆明 650106)

摘 要:针对磁聚焦分幅变像管短磁透镜个数与微通道板(MCP)面曲率、成像范围、旋转角度之间的关系,采用蒙特卡罗方法、有限差分法和有限元法,分别对单磁透镜、双磁透镜和三磁透镜3种磁聚焦分幅变像管的空间分辨特性进行理论和实验研究。仿真结果表明,磁聚焦分幅变像管的短磁透镜个数越多,成像面曲率越小,像面越接近平面;随着短磁透镜个数的增加,成像范围也逐渐增大;同时,在MCP面落点位置处电子的旋转角度随着短磁透镜个数的增加而减小。 采用3个磁透镜时,在阴极面直径36 mm内,磁聚焦分幅变像管空间分辨力为10 lp/mm。

Spatial resolution characteristics of magnetic focusing framing tube

LUO Qiuyan¹, LIN Kaixuan¹, CHEN Jiajie¹, WANG Jiaheng¹, DENG Xuan¹, LIU Junkai¹, YANG Kaizhi¹, HUANG Junkun², WANG Dong¹, LIU Jinyuan¹, NIU Lihong¹, CAI Houzhi^{*1}

(1.College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060, China; 2.North Night Vision Technology Co., Ltd, Kunming Yunnan 650106, China)

Abstract: Theoretical and experimental research of the spatial resolution characteristics of magnetic focusing framing tubes with single magnetic lens, double magnetic lenses and triple magnetic lenses are simulated and studied by Monte Carlo method, finite difference method and finite element method. The relationship among the number of short magnetic lenses and the surface curvature of Micro-Channel Plate(MCP), imaging range and rotation angle is studied. The results show that the more the number of short magnetic lenses, the smaller the curvature of the imaging surface, the flatter the image surface. The imaging range increases with the increase of the number of short magnetic lenses; the electron rotation angle at the MCP point decreases with the increase of the number of short magnetic lenses. With triple magnetic lenses, the spatial resolution of the framing tube is 10 lp/mm within the diameter of 36 mm.

Keywords: inertial confinement fusion; framing tube; magnetic lens; spatial resolution; pulse dilation

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)内爆将产生空间尺寸约50 μm、持续时间约100 ps的X射线发射"热点"^[1],对于自发射的X射线定量和高空间分辨力的测量是研究这一过程的关键^[2],为准确地表征内爆性能,需要优于5 μm空间分辨力和20 ps时间分辨力的超快诊断系统来记录这一过程^[3-4]。X射线分幅相机是一种重要的超快诊断设备,广泛用于ICF实验中^[5-8]。

2010年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)首先利用电子束展宽 技术与微通道板(MCP)选通技术相结合,研制出空间分辨力优于300 µm,时间分辨力为5 ps的脉冲展宽分幅相 机^[9-10]。2017年,深圳大学超快诊断团队采用高压脉冲技术对电子束进行展宽,获得了时间分辨力为4 ps的展宽

*通信作者: 蔡厚智 email:hzcai@szu.edu.cn

收稿日期: 2022-10-17; 修回日期: 2023-02-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11775147);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2019A1515011474;2019A1515110130);深圳市 科技计划基金资助项目(JCYJ20210324095007020;JCYJ20200109105201936;JCYJ20190808115605501)

X射线分幅相机样机^[11-12]。但采用脉冲展宽技术提高时间分辨力,会降低相机空间分辨力。短磁聚焦透镜常用于高分辨电子显微镜,本文采用短磁透镜聚焦成像方式,将电子束团从光电阴极(Photo Cathode, PC)成像至MCP,提高相机空间分辨力^[13]。

空间分辨力为分幅相机重要的技术指标之一,因此对影响相机空间分辨力的相关因素进行研究非常必要。 本文采用蒙特卡罗方法、有限差分法和有限元法,建立单磁透镜、双磁透镜、三磁透镜3种磁聚焦分幅变像管的 理论模型,对它们的空间分辨特性进行理论研究,并与实验结果进行对比。

1 工作原理

磁聚焦分幅变像管的结构原理如图1所示,在PC 与阳极栅网之间加入一个时变电场,产生的加速电势 使不同时刻生成的光电子速度不同,从而产生一个与 光电子生成时间相关的轴向速度色散。这个轴向的速 度色散导致光电子在漂移区传播过程中逐渐被展宽, 时间宽度被放大。随后,光电子通过MCP选通、倍增, 轰击荧光屏形成可见光图像信息被电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD)记录。光电子在漂移区 内的轴向速度色散将会导致其成像质量下降,因此, 通常需要在漂移区内增加磁透镜形成一个磁场对光电 子团进行成像,从而有效提高相机的成像质量^[14]。

目前常用的磁透镜可分为开启式磁透镜、屏蔽式磁



Fig.1 Schematic diagram of magnetic focusing framing tubes structure 图1 磁聚焦分幅变像管结构图

透镜和带极靴式磁透镜3种,本文采用带极靴式短磁透镜。通过在短磁透镜加入铁壳和特殊形状的极靴,可使透镜的场分布更集中,磁场更强,所形成的磁场作用区的宽度比焦距小很多,物与像都在场外;且在整个磁场范围内,静电电位相等。在相同的安匝数下,带极靴式短磁透镜的磁场最集中,并具有最强的峰值磁场^[15]。

短磁透镜的轴上磁感应强度分布,可近似为:

$$\boldsymbol{B}(z) = \boldsymbol{B}_0 \operatorname{sech}^2\left(\frac{2.63z}{2R}\right)$$
(1)

式中: R为磁线圈半径; z为轴向距离; B₀为透镜中心处(z=0)的磁场最大值。

根据高斯公式,可得到短磁透镜的焦距为:

$$f = 65 \times \frac{RU}{\left(NI\right)^2} \tag{2}$$

式中:N为线圈匝数;I为激励电流;U为光电阴极与阳极栅网之间的加速电压。

采用蒙特卡罗方法、有限差分法和有限元法,建立单磁透镜、双磁透镜和三磁透镜3种磁聚焦分幅变像管的 理论模型。模拟时,设置PC电压为-3 kV,阳极栅网接地,MCP电压为-700 V,阴极与栅极之间的距离为1 mm, 漂移区位于阳极栅网与MCP之间,长度为500 mm。以阴极中心为坐标原点,水平方向为x轴,垂直方向为y轴, 轴线方向为z轴。

2 空间分辨特性模拟结果

利用 Matlab 软件对单磁透镜、双磁透镜、三磁透镜3 种不同磁透镜个数的磁聚焦分幅变像管进行模拟,其中 短磁聚焦透镜的参数均设置为:轴向宽度100 mm,内直径160 mm,外直径256 mm,内侧有4 mm的狭缝,线圈 匝数为1 320。

模拟单磁透镜分幅变像管时,短磁透镜的中心位置与PC之间的距离为265 mm,短磁透镜电流 *I*=0.270 A。 当电子在阴极面的发射位置分别为(0,0)、(1,0)、(2,0)、(3,0)时,从光电阴极到 MCP之间的三维电子轨迹如图2 所 示,由图2 可得到电子在任一时刻的位置及其运动状态。

采用双磁透镜进行电子束成像,短磁透镜的中心位置与PC之间的距离分别为135 mm、405 mm,短磁透镜电流分别为*I*₁=0.270 A,*I*₂=0.255 A,模拟时设置电子在阴极面的发射位置分别为(0,0)、(1,0)、(2,0)、(3,0)。

采用三磁透镜进行电子束成像,短磁透镜的中心位置与PC之间的距离分别为135 mm、280 mm、435 mm,

短磁透镜电流分别为 I_1 =0.260 A, I_2 =0.200 A, I_3 =0.250 A, 同样设置电子在阴极面的发射位置分别为(0,0)、(1,0)、(2,0)、(3,0)。



Fig.2 3D trajectory diagram of single magnetic lens imaging electron 图 2 单磁透镜成像电子三维轨迹图

在1:1 成像条件下,获得3种磁透镜结构分幅变像管轴线上的磁场强度与位置的关系如图3所示。采用单磁 透镜时,磁场强度分布曲线近似为高斯分布,在磁透镜中心处磁场强度最大;采用双磁透镜时,磁场强度分布 曲线出现2个峰值;采用三磁透镜进行成像时,磁场强度分布曲线出现3个峰值。



在磁聚焦分幅变像管中,对短磁透镜成像影响最大的两种像差是球差和场曲。球差主要影响沿轴方向的空间分辨力,场曲主要影响离轴方向的空间分辨力。一般来说,球差的大小只与孔径光阑的大小有关,而场曲随着离轴距离的增加而增大^[16]。分别采用单磁透镜、双磁透镜和三磁透镜成像,电子发射位置分别为(0,0)、(1,0),(2,0)、(3,0)、(-1,0)、(-2,0)、(-3,0)时,电子落点位置的*z*坐标如图4所示。电子发射点距离轴心越远,成像位置的*z*坐标越小,场曲越大。由于场曲正比于物点离轴高度的二次方,因此在具有大物面的器件应用中,通常场曲的影响是较大的^[17],一般可以利用弯曲的物面来消除场曲,但这样会引起光学成像误差。由图4也可获得,当采用短磁透镜聚焦成像时,随着磁透镜个数的增加,像平面的场曲逐渐减小。

不同磁透镜个数的成像范围与空间分辨力之间的关系如图 5 所示,采用三磁透镜成像,10 lp/mm 对应的成像 面直径为 28 mm;15 lp/mm 对应的成像面直径为 24 mm;20 lp/mm 对应的成像面直径为 22 mm;25 lp/mm 成像面 直径为 16 mm;30 lp/mm 成像面直径为 8 mm。成像面直径随着空间分辨力的提高而减小。此外,在漂移区内的 磁透镜个数越多,同一空间分辨力要求下其成像范围越大。

不同短磁透镜个数与MCP 落点位置处电子旋转角度之间的关系如图 6 所示,短磁透镜个数越多,MCP 落点 位置处电子的旋转角度越小。



图5 成像范围与空间分辨力关系

3 实验结果

磁聚焦分幅变像管实物图如图7所示,相机由光电阴极、 栅网、磁透镜、MCP、荧光屏、光锥、CCD和高压脉冲发生 器等组成。

为方便得到变像管空间分辨力,在光电阴极上刻有周期 性变化的分划板,分划板中每小格都为3 mm×3 mm,每小格 对应的线对数如图8所示。阴极图像上能够最高清晰分辨的 线对数即为磁聚焦分幅变像管对应的静态空间分辨力。

实验中设置 PC 电压为-3 kV, MCP 电压为-700 V。在成 像倍率为 1:1 条件下,采用单磁透镜进行电子束成像时,短

磁透镜位于漂移区中心,短磁透镜电流 I=0.279 A。实验结果如图9所示,在距离中心第3小格的位置处图像比较 模糊,在离轴6 mm内能分辨10 lp/mm。

采用双磁透镜对电子束进行成像,短磁透镜分别紧贴漂移区两侧,短磁透镜电流分别为*I*₁=0.297 A, *I*₂= 0.294 A,实验结果如图 10 所示,图像在距离中心位置第三格处可以分辨,即离轴 9 mm内能分辨 10 lp/mm。



Fig.8 Resolution plate diagram of photocathode 图 8 光电阴极分辨力板示意图



Fig.6 Relationship between the number of magnetic lenses and the angle of electron rotation at the position of MCP 图 6 磁透镜个数与MCP落点位置处电子旋转角度关系



Fig.7 Picture of magnetic focusing framing tubes 图7 磁聚焦分幅变像管实物图



 Fig.9 Experimental results of static spatial resolution of single magnetic lens
 图 9 单磁透镜静态空间分辨力实验结果

采用三磁透镜对电子束进行成像,第1个磁透镜和第3个磁透镜紧贴漂移区两端,第2个磁透镜位于第1个 磁透镜和第3个磁透镜的中间位置,短磁透镜电流分别为*I*₁=0.256 A,*I*₂=0.252 A,*I*₃=0.241 A,实验结果如图11 所示,图像在距离中心位置处第6小格可以看清,即离轴18 mm内能分辨10 lp/mm。

图 12 为不同短磁透镜个数与空间分辨力为 10 lp/mm 时所对应的成像面直径之间的关系,随着短磁透镜个数的增加,其对应的成像范围也随之增大,实验结果和理论结果相符。当采用 3 个短磁透镜聚焦成像时,其空间分辨力为 10 lp/mm 的成像面直径可以达到 36 mm。



Fig.10 Experimental results of static spatialre solution of double magnetic lenses 图 10 双磁透镜静态空间分辨力实验结果



 Fig.11 Experimental results of static spatial resolution of triple magnetic lenses
 图 11 三磁透镜静态空间分辨力实验结果

4 结论

本文建立了单磁透镜、双磁透镜、三磁透镜3种不同磁聚 焦透镜个数的磁聚焦分幅变像管理论模型,并对其在成像倍率 为1:1情况下的空间分辨力进行了理论模拟。模拟结果表明, 随着短磁聚焦透镜个数的增加,MCP 面处的曲率逐渐减小; MCP 落点位置处电子的旋转角度减小;成像范围逐渐增大。分 别采用单磁透镜、双磁透镜、三磁透镜成像时,能够分辨出 10 lp/mm 的成像面直径依次为10 mm、18 mm、28 mm。对磁 聚焦分幅变像管空间分辨力进行了实验测量,分别采用单磁透 镜、双磁透镜、三磁透镜时,能够分辨10 lp/mm 的成像面直径 依次为12 mm、18 mm、36 mm。实验结果与模拟结果相符。



lenses and the imaging range at 10 lp/mm 图 12 磁透镜个数与10 lp/mm时成像范围关系

参考文献:

- [1] LI Yaran, DONG Jianjun, XIE Qing, et al. Development of a polarview Kirkpatrick-Baez X-ray microscope for implosion asymmetry studies[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8348-8360. doi: 10.1364/OE.27.008348.
- [2] REN Kuan, WU Junfeng, DONG Jianjun, et al. Quantitative observation of monochromatic X-rays emitted from implosion hotspot in high spatial resolution in inertial confinement fusion[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 14492. doi: 10.1038/s41598-021-93482-4.
- [3] ENGELHORN K, HILSABECK T J, KILKENNY J, et al. Sub-nanosecond single Line-Of-Sight(SLOS) X-ray imagers(invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 2018(89):10G123. doi:10.1063/1.5039648.
- [4] 王峰,理玉龙,关赞洋,等. 压缩感知技术在激光惯性约束聚变研究中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2022,34(3):123-131.
 (WANG Feng,LI Yulong,GUAN Zanyang, et al. Application of compressed sensing technology in laser inertial confinement fusion[J].
 High Power Laser and Particle Beams, 2022,34(3):123-131.) doi:10.11884/HPLPB202234.210250.
- [5] 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): 32-48. (TIAN Jinshou. Introduction to development of streak and framing cameras[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 32-48.) doi: 10.11884/ HPLPB202032.200119.
- [6] LI Shijian, WANG Qiangqiang, YAO Xuri, et al. Two-dimensional time-and space-resolved diagnostic method for an integrated implosion process[J]. Optics Express, 2021,29(21):33424-33433. doi:10.1364/OE.439133.
- [7] WANG Feng, JIANG Shaoen, DING Yongkun, et al. Recent diagnostic developments at the 100 kJ-level laser facility in China[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2020,5(3):035201. doi:10.1063/1.5129726.
- [8] 江孝国,王远,李洪,等.高性能三分幅相机的研制及应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):995-999. (JIANG Xiaoguo, WANG Yuan, LI Hong, et al. Development and application study for the 3-framing camera with high performance[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):995-999.) doi:10.11805/TKYDA201506.0995.

- [9] 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. doi:10.1063/1.4732849.
- [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. doi:10.1063/1.4890396.
- [11] CAI Houzhi,ZHAO Xin,LIU Jinyuan, et al. Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. APL Photonics, 2016,1(1):016101. doi:10.1063/1.4945350.
- [12] CAI Houzhi, FU Wenyong, BAI Yanli, et al. Simulation of a dilation X-ray framing camera[J]. Journal of Electronic Imaging, 2017,26(4):043003. doi:10.1117/1.JEI.26.4.043003.
- [13] WANG Qiangqiang, CAO Zhurong, CHEN Tao, et al. Numerical study and improvement of the dynamic performance of dilation X-ray imager[J]. Review of Scientific Instruments, 2021,92(12):123305. doi:10.1063/5.0061685.
- [14] 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: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2011,645(1):55-59. doi:10.1016/j.nima.2010.12.232.
- [15] 刘蓉,田进寿,王强强,等. 磁透镜内径比对条纹变像管性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2014,34(10):1066-1070. (LIU Rong, TIAN Jinshou, WANG Qiangqiang, et al. Influence of magnetic solenoid lens on characteristics of streak image tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014,34(10):1066-1070.) doi:10.13922/j.cnki.cjovst.2014.10.11.
- [16] 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):235-241. (LEI Yunfei,LIU Jinyuan,CAI Houzhi,et al. Study on field curvature characteristics of Pulse-Dilation framing tube[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21):235-241.) doi:10.3788/AOS202141.2132001.
- [17] 徐大伦.变相管高速摄影:高速摄影之四[M].北京:科学出版社, 1990:222-227. (XU Dalun. High speed photography with phase change tube:high speed photography IV[M]. Beijing:Science Press, 1990:222-227.)

作者简介:

罗秋燕(1998-),女,在读博士研究生,主要研究方向为超快诊断技术.email:2070456107@email.szu.edu.cn.

林楷宣(1997-),男,硕士,主要研究方向为脉冲发 生器设计.

陈嘉杰(1997-),男,硕士,主要研究方向为脉冲发 生器设计.

王佳恒(1998-),男,硕士,主要研究方向为超快传 感器件理论.

邓 萱(2000-),女,硕士,主要研究方向为超快传 感器件理论.

刘俊凯(1998-),男,硕士,主要研究方向为脉冲发 生器件. 杨恺知(1998-),男,硕士,主要研究方向为脉冲发 生器件.

黄峻堃(1991-),男,博士,工程师,主要研究方向 为超快传感器件理论.

王东(1988-),男,博士,副研究员,主要研究方向为超快传感器件理论.

刘进元(1963-),男,博士,研究员,博士生导师, 主要研究方向为超快探测与成像技术.

牛丽红(1963-),女,博士,研究员,博士生导师, 主要研究方向为光电成像技术、变像管高速摄影技术.

蔡厚智(1983-),男,博士,研究员,博士生导师, 主要研究方向为超快探测与成像技术.