

文章编号: 2095-4980(2022)09-0973-05

基于瑞利判据的分幅相机空间调制传递函数

陈欢^a, 白雁力^a, 钟思^{*b}

(桂林电子科技大学 a. 电子工程与自动化学院; b. 教学实践部, 广西 桂林 541004)

摘要: 根据脉冲展宽分幅相机原理和瑞利判据思想, 通过建立研究模型、模拟磁场分布、追踪电子轨迹和成像分布直方图统计及其高斯拟合, 采用瑞利判据计算脉冲展宽分幅相机轴上空间分辨力和成像调制度。研究结果显示, 基于瑞利判据通过相邻物点成像分布计算脉冲展宽分幅相机空间调制传递函数是可行的, 当阴极轴上相邻物点分别发射 10 000 个电子时, 两物点完全分辨的成像调制度为 98.573 2%, 空间分辨力为 194.523 7 μm ; 恰能分辨的调制度为 19.16%, 空间分辨力为 73.22 μm ; 不能分辨的成像调制度为 0.14%, 空间分辨力为 4.57 μm 。研究结论为二维超快诊断设备空间调制传递函数的计算提供了一种直观的解决方法。

关键词: 超快诊断设备; 脉冲展宽分幅相机; 瑞利判据; 空间调制传递函数

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021368

Spatial modulation transfer function of framing camera using Rayleigh criterion

CHEN Huan^a, BAI Yanli^a, ZHONG Si^{*b}

(a.School of Electronic Engineering and Automation; b.Teaching Practice Department, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: The working principle of pulse-dilation framing camera and Rayleigh criterion are introduced. The spatial resolution and modulation on-axis of pulse-dilation framing camera are calculated by using Rayleigh criterion through building model, simulating magnetic field, tracking electron trajectory and fitting histogram of imaging distribution. The research results show that, when the 10 000 electrons are emitted from adjacent object points on the photocathode, the imaging modulation of two fully distinguishable adjacent object points is 98.5732%, the spatial resolution is 194.523 7 μm ; the modulation of just distinguishable is 19.16%, the spatial resolution is 73.22 μm ; the modulation of undistinguishable is 0.14%, the spatial resolution is 4.7 μm . This work can provide a visualized solution for calculating spatial modulation transfer function of 2D ultrafast diagnosis device.

Keywords: ultrafast diagnosis device; pulse-dilation framing camera; Rayleigh criterion; spatial modulation transfer function

分幅相机是一种具有高时空分辨性能的超快诊断设备, 在激光打靶实验中, 用于获取高温高密度等离子体的二维时空演化过程^[1-5], 其类型主要包括微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)式和脉冲展宽式两种, 前者采用近贴聚焦成像, 由 MCP 和荧光屏构成^[6-7], 空间分辨力约为 50 μm , 时间分辨力受制于光电子时间弥散以及在 MCP 内的渡越时间弥散, 局限于 35~100 ps^[8]; 后者采用磁聚焦成像, 由加速区、漂移区和 MCP 分幅相机组成, 时间分辨力可优于 10 ps^[9-11], 空间分辨力受光电子漂移影响, 相对较差^[12-14]。随着激光打靶实验对 100 ps 聚变燃烧阶段等离子体时空特性的诊断需求, 具有 10 ps 时间分辨的脉冲展宽分幅相机逐渐成为超快诊断领域的研究热点^[15-19]。

脉冲展宽分幅相机能成倍提升时间分辨性能, 源于物理结构和工作原理的改变。在工作时, 加速区中阴极

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2022-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11865007); 广西自然科学基金面上资助项目(2022GXNSFAA035561)

*通信作者: 钟思 email: zhongsikm@qq.com

产生的光电子束受时变电场的作用,当光电子束通过漂移区的传输后,其轴向(时间宽度)上被展宽,最后采用选通脉冲对展宽后的光电子束信号进行测量,以此成倍提升相机时间分辨性能^[20]。虽然通过脉冲展宽技术能提升时间分辨性能,但光电子信号在长距离漂移过程中产生的空间弥散也非常大,导致其空间分辨性能急剧下降。对于脉冲展宽分幅相机的空间分辨性能研究,常采用成像电子光学系统中的空间均方根半径(Root Mean Square, RMS)实现^[21],该方法从阴极轴心发射若干个电子,通过计算其成像分布的均方根半径,建立空间分辨力与调制度之间的联系,最终评价系统空间分辨性能。均方根半径在一维条纹相机计算最佳像面中应用较为广泛,虽然二维成像分幅相机也可以借鉴,但考虑到两种相机的成像原理不同,因此研究更适用于脉冲展宽分幅相机空间分辨性能的计算方法,具有一定的理论研究意义。

为探讨适合脉冲展宽分幅相机的空间分辨率计算方法,本文从成像系统分辨性能是衡量辨别相邻两物点能力思想出发,基于瑞利判据(Rayleigh Criterion)理论^[22],研究脉冲展宽分幅相机空间分辨力与成像调制度的关系。

1 研究模型和方法

CST Studio Suite(简称 CST)是一种高性能的 3D 电磁场分析软件,可用于设计、分析和优化电磁组件和系统,该软件中的 Particle Tracking 模块可实现电磁场中光电子成像和电子轨迹追踪功能。采用 CST 软件构建的脉冲展宽分幅相机空间分辨力研究模型如图 1 所示,主要由阴极(photocathode)、阳极(anode)、漂移区(drift area)、成像面(imaging surface)和磁透镜(magnetic lens)组成,阴极电压设定为 -3 kV ,阳极接地,阴阳极间距为 2 mm ,漂移区长度为 500 mm ,磁透镜由屏蔽铁壳和线圈组成,其内径为 160 mm ,漏磁缝隙为 4 mm 。当阴极轴上物点到成像面实现 $1:1$ 成像时,模型沿漂移区的轴上磁场分布如图 1(c)所示,最大轴上磁场强度约为 0.0037 T 。模拟时阴极产生的光电子初始参量满足以下分布:初能服从 $0\sim 0.6\text{ eV}$ 上的 $\beta(1,4)$ 分布,发射仰角服从 $0\sim 90^\circ$ 上的余弦分布,方位角服从 $0\sim 180^\circ$ 上的均匀分布,初始位置服从均匀分布。

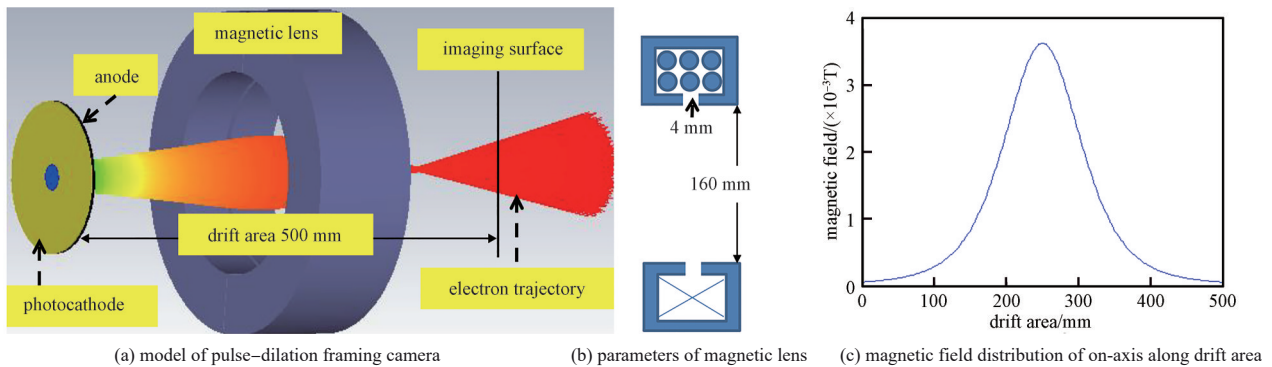


Fig.1 Model built by using CST Studio Suite

图 1 采用 CST 建立的研究模型

瑞利判据是指当一个艾里斑(Airy disk)的边缘与另一个艾里斑的中心正好重合时,对应的两个物点刚好能被人眼或光学仪器所分辨。在脉冲展宽分幅相机中,由于发射的光电子初始参量差异以及成像磁场影响,当阴极物面上的一点发射若干个电子,通过长距离漂移到达成像面时,其成像将不再是理想成像点,而是与电子光学系统的物点成像一样,呈现为一个艾里斑。基于瑞利判据理论模拟阴极轴上空间分辨力及其调制度如图 2 所示,其中图 2(a)为以阴极轴心为中心两个相邻物点分别发射 $10\ 000$ 个光电子的成像分布,两成像分布的直方图统计及其归一化高斯拟合如图 2(b)所示。根据曲线特点,两物点成像分布的高斯拟合曲线满足瑞利判据理论,即一个物点成像分布的艾里斑边缘(g点)与另一个物点成像艾里斑的中心(p点)正好重合。将两个物点成像分布进行集合、直方图统计和归一化高斯拟合后的结果如图 2(c)所示,根据瑞利判据理论,两成像分布高斯曲线的波峰间距可表示为成像系统空间分辨力,即 $73.22\ \mu\text{m}$ 。此时成像的最大强度 I_{max} 为 1 (归一化高斯曲线中的最大值),相邻物点成像分布间的最小强度 I_{min} 为 0.6784 ,根据式(1)^[23],可计算获得此时的成像调制度 M 为 19.16% 。

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

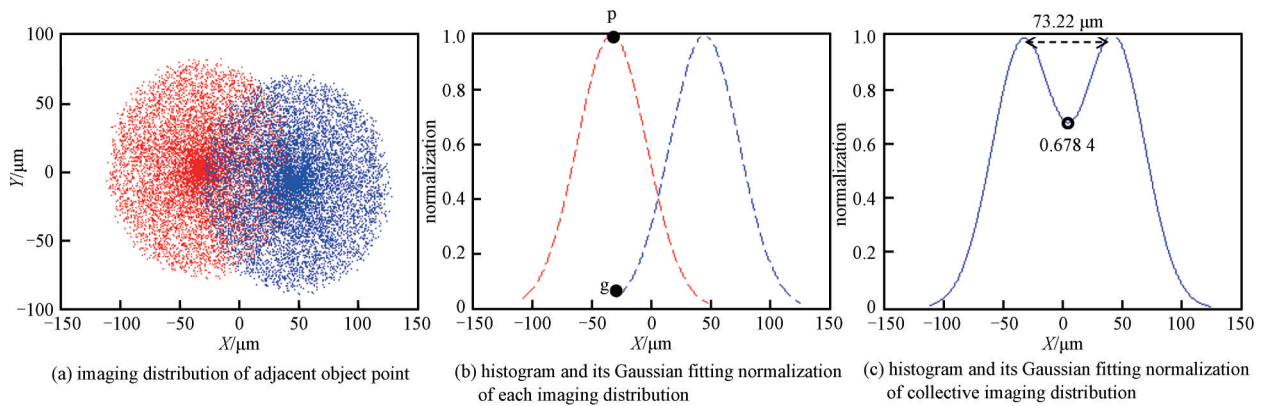


Fig.2 Spatial resolution and modulation calculated using Rayleigh Criterion
图2 基于瑞利判据的空间分辨力与调制度计算

2 研究结果

基于瑞利判据理论，采用 CST 研究脉冲展宽分幅相机空间调制传递函数的采样过程如图 3 所示，随着轴上两相邻物点间距缩短，成像分布逐渐从分离到重合。对应的直方图统计及其归一化高斯拟合结果如图 4 所示，图 4(a)~图 4(e)的空间分辨力(波峰间距)分别为 175.07 μm , 158.65 μm , 115.73 μm , 73.22 μm 和 47.11 μm ，根据式(1)，对应的成像调制度分别为 95.92%, 88.51%, 52.53%, 19.16% 和 8.08%；两相邻物点无法分辨的成像分布如图 4(f)所示，其统计直方图为单波峰高斯曲线。按照成像调制度从 0% 到 100% 的成像过程，通过 12 个采样点建立的空间调制传递函数曲线如图 5 所示，在采样数据中，当空间分辨力为 194.52 μm 时，调制度为 98.57%；当空间分辨力为 4.57 μm 时，调制度为 0.15%(无法分辨)。

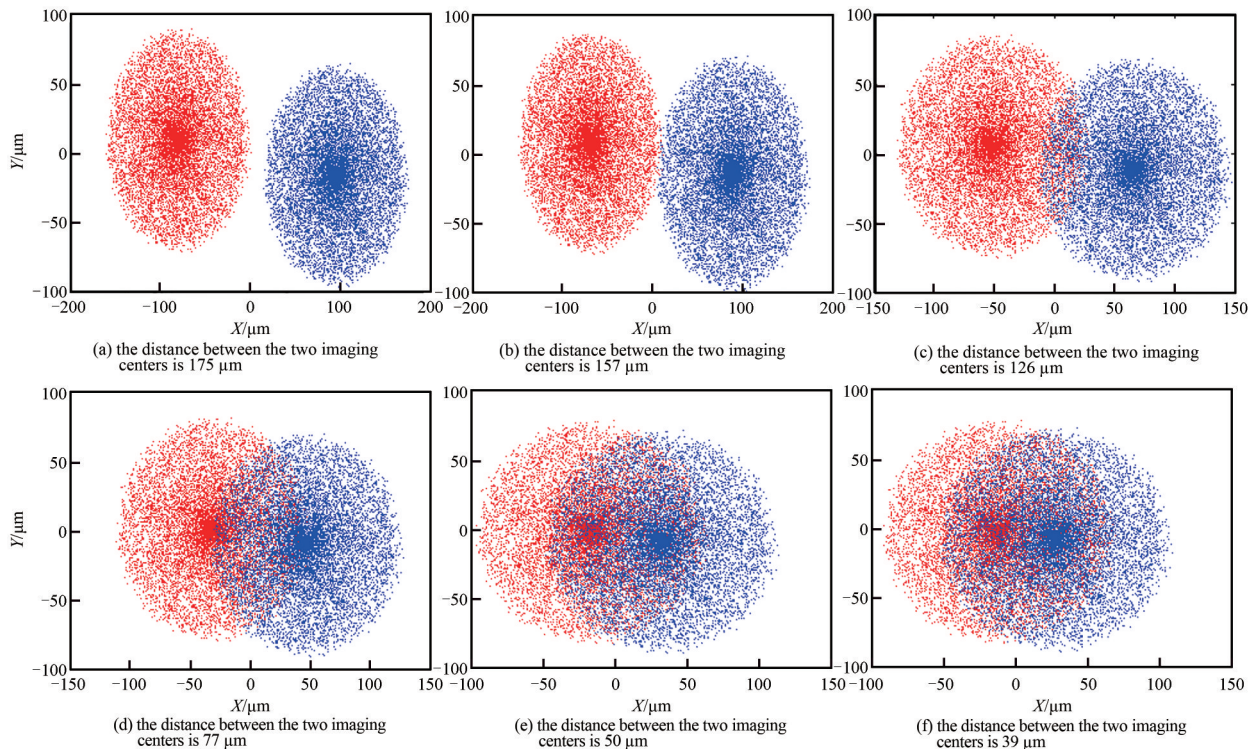


Fig.3 Sampling process from distinguishable to undistinguishable of adjacent object point
图3 相邻物点从可分辨到不可分辨的采样过程

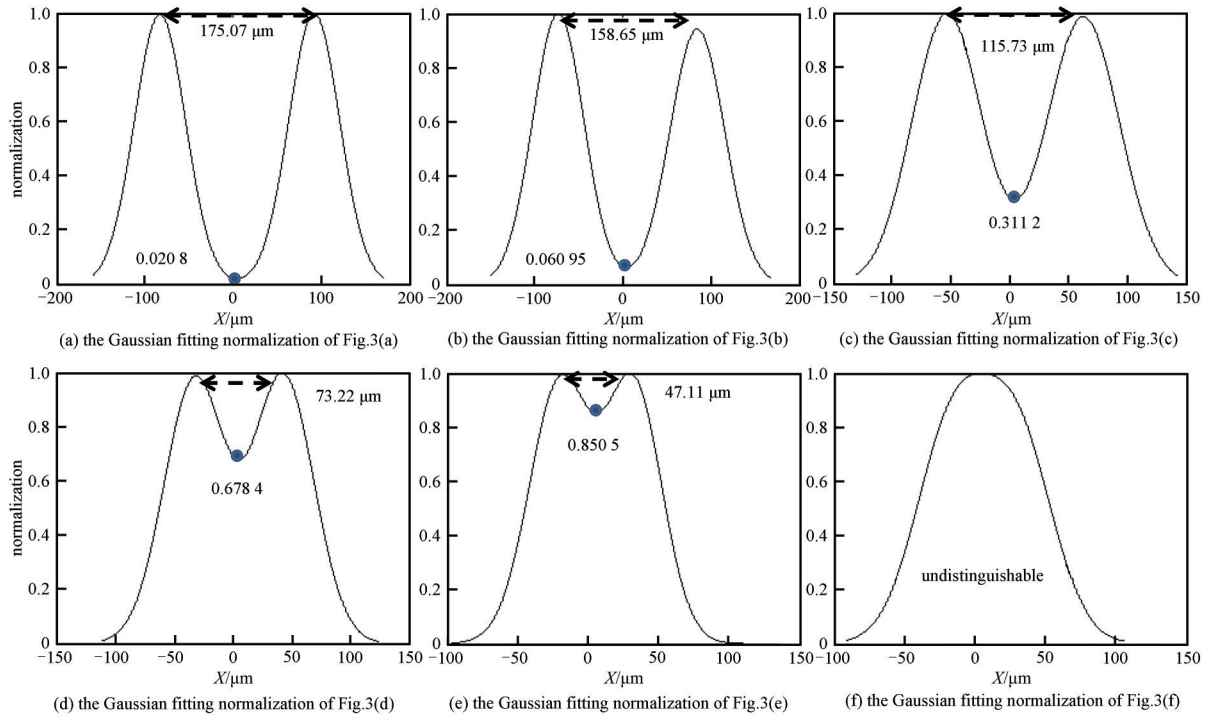


Fig.4 Histogram and its Gaussian fitting normalization of imaging distribution in the sampling process

图4 采样过程中成像分布直方图统计及其归一化高斯拟合

3 结论

本文介绍了脉冲展宽分幅相机的工作原理,采用CST软件构建了相机空间分辨研究模型,基于瑞利判据原理,探讨了脉冲展宽分幅相机的空间调制传递函数的计算。研究结果显示,瑞利判据基于相邻物点分辨的思想适用于脉冲展宽分幅相机空间分辨力和成像调制度的计算。当阴极轴上相邻两物点分别发射10 000个电子时,完全分辨相邻物点的成像调制度为98.573 2%,空间分辨力为194.523 7 μm ;恰能分辨相邻物点的成像调制度为19.16%,空间分辨力为73.22 μm ;完全不能分辨相邻物点的成像调制度为0.14%,空间分辨力为4.57 μm 。研究结果为二维超快诊断设备空间调制传递函数的实现提供了一种直观的计算方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王峰,江少恩.神光装置实验和诊断技术进展专题[J].中国科学:物理学·力学·天文学,2018,48(6):1-2. (WANG Feng, JIANG Shaoen. Progress of experimental and diagnostic technique based on Shenguang series laser facility[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018,48(6):1-2.) doi:10.1360/SSPMA2018-00095.
- [3] 曹柱荣,袁铮,陈韬,等.神光装置上X射线时空诊断技术概况与展望[J].中国科学:物理学·力学·天文学,2018,48(6):59-69. (CAO Zhurong, YUAN Zheng, CHEN Tao, et al. Progress and plans of X-ray temporal and spatial diagnosis technology of Shenguang facilities[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018,48(6):59-69.) doi:10.1360/SSPMA2017-00366.
- [4] 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.

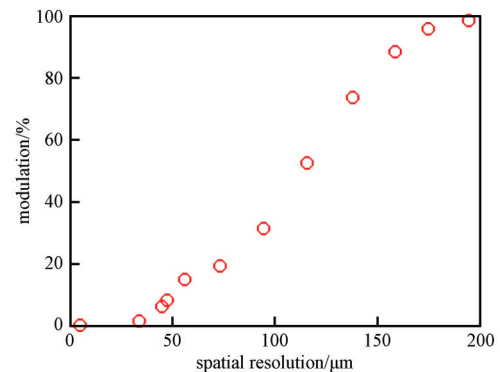


Fig.5 The changing process of spatial resolution from 98.57% to 0.15% of modulation (12 sampling points)

图5 调制度从98.57%到0.15%的空间分辨力变化过程 (12个采样点)

- [5] 曹柱荣,王强强,邓博,等. 激光聚变极端环境下X光高速摄影技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020,32(11):49-61. (CAO Zhurong,WANG Qiangqiang,DENG Bo,et al. Progress of X-ray high-speed photography technology used in laser driven inertial confinement fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020,32(11):49-61.) doi:10.11884/HPLPB202032.200099.
- [6] BENEDETTI L R,BELL P M,BRADLEY D K,et al. Crosstalk in X-ray framing cameras:effect on voltage,gain,and timing(invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 2012,83(10):10E135. doi:10.1063/1.4740524.
- [7] CAI H,FU W,WANG D,et al. Three-strip microchannel plate gated X-ray framing camera[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2018(285):355-361. doi:10.1016/j.sna.2018.11.028.
- [8] BRADLEY D K,BELL P M,LANDEN O L,et al. Development and characterization of a pair of 30~40 ps X-ray framing cameras[J]. Review of Scientific Instruments, 1998,66(1):716-718. doi:10.1063/1.1146268.
- [9] HILSABECK T J,HARES J D,KILKENNY J D,et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. Review of Scientific Instruments, 2010,81(10):10E317. doi:10.1063/1.3479111.
- [10] CAI H,ZHAO X,LIU J,et al. Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. APL Photonics, 2016,1(1):016101. doi:10.1063/1.4945350.
- [11] FU W Y,CAI H Z,WANG D,et al. Time resolved X-ray image of laser plasma interactions using a dilation framing camera[J]. Optik, 2019(186):374-378. doi:10.1016/j.ijleo.2019.04.093.
- [12] 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.
- [13] BAI Y L,LONG J H,CAI H Z,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. doi:10.1117/1.OE.54.12.124103.
- [14] BAI Y L,YAO R B,GAO H Y,et al. Achieving a large detector sensitive area of short magnetic focusing pulse-dilation framing tube using a combination lens[J]. Optik, 2019(178):1097-1101. doi:10.1016/j.ijleo.2018.10.078.
- [15] HARES J D,DYMOKE-BRADSHAW A K L,HILSABECK T J,et al. A demonstration of ultra-high time resolution with a pulse-dilation photo-multiplier[J]. Journal of Physics Conference Series, 2016,717(1):012093. doi:10.1088/1742-6596/717/1/012093.
- [16] LIAO Y,LEI Y,CAI H,et al. Electron beam Moire fringes imaging by image converter tube with a magnetic lens[J]. Journal of Applied Physics, 2016,119(21):213102-1-7. doi:10.1063/1.4952750.
- [17] LEI Y,LIAO Y,LONG J,et al. Observation of electron beam Moire fringes in an image conversion tube[J]. Ultramicroscopy, 2016(170):19-23. doi:10.1016/j.ultramic.2016.07.013.
- [18] BAI Y L,YAO R B,GAO H Y,et al. Measurement of dilation pulse using pulse-dilation framing camera[J]. Optics Express, 2020, 28(10):15407-15415. doi:10.1364/OE.391779.
- [19] 付文勇,蔡厚智,王东,等. 脉冲展宽X射线光电二极管的研究[J]. 光学学报, 2020,40(10):197-201. (FU Wenyong,CAI Houzhi,WANG Dong,et al. Study on pulse-dilation X-ray diodes[J]. Acta Optica Sinica, 2020,40(10):197-201.) doi:10.3788/AOS 202040.1032001.
- [20] 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]. Review of Scientific Instruments, 2016,87(11):11E311. doi:10.1063/1.4959917.
- [21] 张良忠,金伟其,周立伟. 成像系统均方根半径及调制传递函数的计算[J]. 电子学报, 2000,28(8):5-8. (ZHANG Liangzhong, JIN Weiqi,ZHOU Liwei. Computation on Root Mean Square radius and modulation transfer function in imaging systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2000,28(8):5-8.) doi:10.3321/j.issn:0372-2112.2000.08.002.
- [22] 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. doi:10.1007/s11141-005-0082-x.
- [23] CSORBA I P. Modulation transfer function of image tube lenses[J]. Applied Optics, 1977,16(10):2647-2650. doi:10.1364/AO.16.002647.

作者简介:

陈欢(1996-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为超快诊断技术和高功率脉冲技术. email: ch2495431229@foxmail.com.

白雁力(1979-),男,博士,研究员,硕士生导师,主要研究方向为超快诊断技术和高功率脉冲技术.

钟思(1982-),女,硕士,工程师,主要研究方向为分幅相机模拟.