

双阴极 X 射线条纹相机变像管*

李晋 杨品 杨志文 张兴 刘慎业 董建军
杨正华 任宽 李颖洁 张璐 胡昕†

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2022 年 6 月 17 日收到; 2022 年 7 月 17 日收到修改稿)

为解决基于 X 光条纹相机技术的时间分辨光谱诊断系统存在测谱范围窄、谱分辨较差的问题, 采用双通道电四极透镜在空间方向聚焦电子和平板电极在时间方向压缩电子的方法, 研制出一种双通道条纹相机扫描变像管, 这种变像管可同时对两条阴极发射电子束进行聚焦扫描偏转, 能大幅度提升变像管有效阴极长度, 从而提升时间分辨光谱诊断系统的测谱范围和谱分辨. 实测结果表明, 研制的变像管有效阴极长度达到 44 mm, 空间分辨优于 15 lp/mm, 偏转灵敏度优于 40 mm/kV. 进一步优化变像管结构和采用高灵敏度图像记录系统以去除像增强器, 可将变像管有效阴极提升到 50 mm, 空间分辨提升到 25 lp/mm.

关键词: X 射线条纹相机, 变像管, 时间分辨光谱测量, 双阴极

PACS: 32.30.Rj, 42.79.Pw, 52.70.La, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.71.20221194

1 引言

基于 X 光条纹相机^[1–11]技术的时间分辨光谱测量系统^[12–19]是诊断待测 X 射线能谱随时间变化过程的核心诊断设备, 在高温辐射物理与辐射流体力学实验、极端条件高压物理实验、内爆物理实验等诸多激光聚变物理实验研究和高能密度物理实验研究中都是不可或缺的诊断设备^[12,14,16–23]. 时间分辨光谱测量系统采用晶体、光栅或反射镜等作为分光元件将靶点出射的不同波长 X 光分光到条纹相机阴极的不同位置, X 光条纹相机作为记录设备, 沿着阴极狭缝方向记录 X 射线的谱信息, 而在垂直于阴极狭缝方向记录信号的时间信息. 显然, X 光条纹相机的有效阴极长度和空间分辨对时间分辨光谱测量系统的测谱范围和谱分辨具有重要影响. 受制于当前 X 光条纹相机的有效阴极长度和空间分辨, 通常使用的时间分辨光谱测量系统

存在测谱范围窄、谱分辨较差的缺点.

X 射线条纹相机是通过扫描变像管将 X 射线转换为电子, 然后将电子聚焦偏转到荧光屏的不同位置而获得时间分辨. 因此变像管是 X 射线条纹相机的核心组成部分, 对相机性能具有重要影响, 特别是变像管的有效阴极长度决定了相机的视场大小. 文献^[2, 5, 8]报道的实用型 X 光条纹相机变像管阴极长度为 30 mm, 但受像差影响, 变像管中心与边缘的空间分辨差别较大, 实际可使用的阴极长度较短. 美国 LLNL 实验室的 MacPhee 等^[10]通过矫像差技术提升了变像管边缘的空间分辨, 使得变像管的阴极长度达到 30 mm 时, 阴极各位置的空间分辨都可以维持在 15 lp/mm 左右, 这较大程度提升了变像管性能. 但未来在更大激光装置上开展的惯性约束聚变物理实验中, 需要测量的靶尺寸以及谱范围、谱分辨都有更高的要求, 需要更长的阴极以获得更多的分辨单元. 传统结构的单阴极 X 射线条纹相机阴极尺寸受变像管限制, 很难做

* 中国工程物理研究院院长基金 (批准号: YZJLX2018011, YZJLX2019011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huxin88@sina.com

到 40 mm 以上. 因此, 本文创新发展了一种双阴极 X 射线扫描变像管, 其有效阴极长度达到了 44 mm, 阴极各位置空间分辨优于 15 lp/mm, 为当前阴极长度最长的 X 射线条纹相机扫描变像管.

2 双阴极变像管结构设计及制作

为提升变像管有效阴极长度, 创新采用平板电极加两组电四极透镜变像管结构, 使得变像管能够同时对两条阴极电子束进行扫描偏转, 设计的变像管电子光学系统结构如图 1 所示, 结构类似于法国 Photonis 公司推出的双板变像管^[1], 其包含阴极、时间方向预聚焦电极组、电四极透镜电极组、时间方向主聚焦电极组、扫描偏转板以及荧光屏, 但与文献 [1] 中的双板变像管结构不同的是, 本文的变像管具有两条狭缝阴极, 当 X 射线入射时, 可以同时发射出两条电子束, 并且该变像管的电四极透镜电极组由 8 个弧形电极组成两组电四极透镜, 如图 2 所示. 变像管阴极发射出的两条电子束, 在时间方向上先由时间方向预聚焦电极组加速并进行预聚焦, 后由时间方向主聚焦电极组进行压缩; 在空间方向上, 两条电子束分别由两组电四极透镜进行独立聚焦. 电子束经过聚焦电极后, 由偏转板扫描偏转到荧光屏的不同位置而获得时间分辨. 这种新颖结构的设计, 能使变像管能够同时对两条电子束同时进行聚焦, 可增大变像管阴极的可用长度. 两条电子束在时间方向上共用平板聚焦电极使得变像管的结构紧凑, 而在空间方向上的电四极透镜电极结构小巧, 不会使变像管体积增大太多.

设计的变像管阴极电压为 -12 kV, 阴栅距离为 5 mm, 阴栅场强为 2.4 kV/mm; 阴极分为两段, 间距约为 13 mm, 每段阴极长度大于 20 mm, 阴极距离荧光屏 300 mm, 沿着阴极方向最长尺寸为 90 mm. 图 3 给出了双阴极变像管的阴极发射面和成像面的电子分布, 根据电子分布情况可以得出变像管的放大倍数和有效阴极长度. 从图 3 可看出, 阴极发射面的单条阴极电子分布长度为 25 mm, 成像后单条阴极电子长度为 39 mm, 故变像管的放大率约为 1.56 倍, 采用 80 mm 口径荧光屏能满足 50 mm 长度阴极成像需求. 同时可以看出两条电子束在像面上中心存在一定间隔, 能保证两条电子束不会相互窜扰. 设计过程中值得注意的是, 两组电极透镜之间可能由于距离较近, 电场会存在相

互干扰导致电场畸变. 通过对模型进行优化计算, 当两组电四极透镜距离为 6 mm 时, 两电四极透镜间不存在相互干扰, 可保证成像质量.

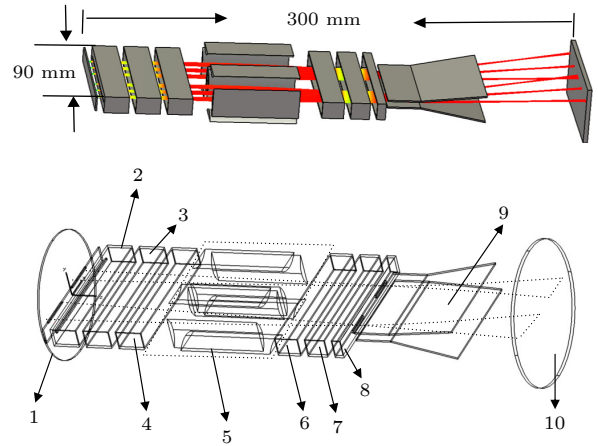


图 1 双阴极变像管结构 1-光阴极, 2-平板电极 I, 3-平板电极 II, 4-平板电极 III, 5-电四极透镜聚焦组, 6-平板电极 IV, 7-平板电极 V, 8-平板电极 VI, 9-偏转板, 10-荧光屏
Fig. 1. Structure of dual-cathode streak tube: 1-photocathode, 2-plate electrode I, 3-plate electrode II, 4-plate electrode III, 5-quadrupole lens, 6-plate electrode IV, 7-plate electrode V, 8-plate electrode VI, 9-deflector, 10-screen.

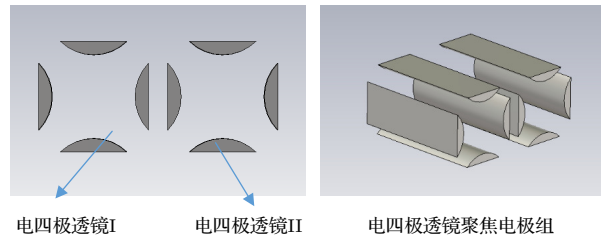


图 2 电四极透镜结构

Fig. 2. Structure of quadrupole lens.

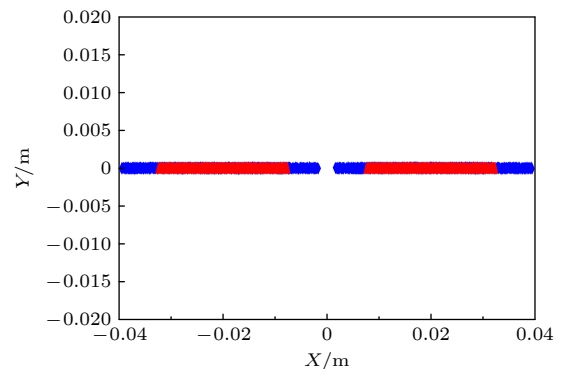


图 3 阴极成像效果 (蓝色为阴极发射面电子分布, 红色为像面电子分布)

Fig. 3. Cathode imaging results (Blue is electron distribution on cathode emission plane, red is electron distribution on image plane).

完成变像管电子光学系统的设计后, 对变像管进行封装设计, 采用高强度铝合金骨架对各电极进行支撑, 同时采用精密陶瓷定位块保证电极的装配精度和电极间的绝缘, 变像管内部电极的电压加载由后端转接法兰上面的气密高压连接器输入, 设计的变像管和实际制作的结构如图4所示.

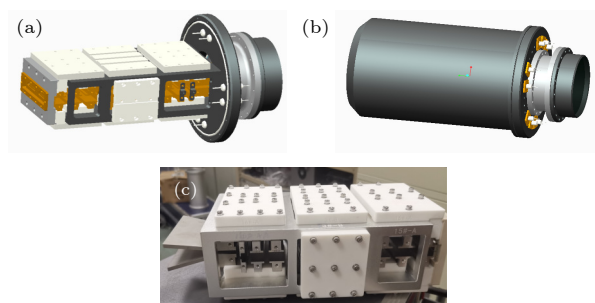


图4 变像管结构 (a) 内部设计结构; (b) 外部结构; (c) 内部实际制作结构

Fig. 4. Structure of the streak tube: (a) Internal design structure; (b) external structure; (c) actual production structure.

3 双阴极变像管性能测试

对双阴极变像管的空间分辨、有效阴极长度、偏转灵敏度等性能进行测试, 测试排布如图5所示. 由于双阴极变像管的荧光屏较大, 达到了 80 mm, 而当前能够获得的像增强器尺寸仅为 40 mm, 图像记录系统有效记录尺寸为 37 mm, 因此采用大面阵缩比光锥对荧光屏图像进行缩像后, 再耦合 40 mm 高空间分辨像增强器对图像进行增强, 最后在像增强器后端耦合高性能科学级 CCD 相机对图像进行记录存储. 对变像管的性能进行测试时, 阴极采用分划阴极, 每组分划阴极图案包含 5, 10, 15, 20, 25 和 30 lp/mm 6 种分辨单元.

图6为采用光锥对图像缩像后, 再耦合像增强器对图像进行正确增强, 由 CCD 相机记录得到的图像, 图像中心空间分辨皆达到了 15 lp/mm, 边缘为 10 lp/mm. 为进一步研究变像管的性能, 还采

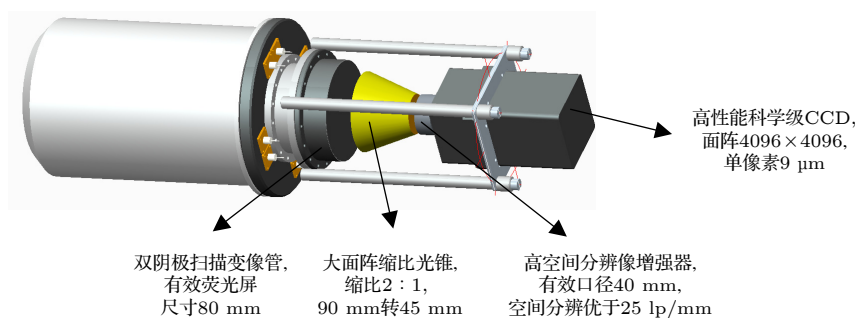


图5 变像管性能测试器件排布图

Fig. 5. Layout of test devices for streak tube performance.

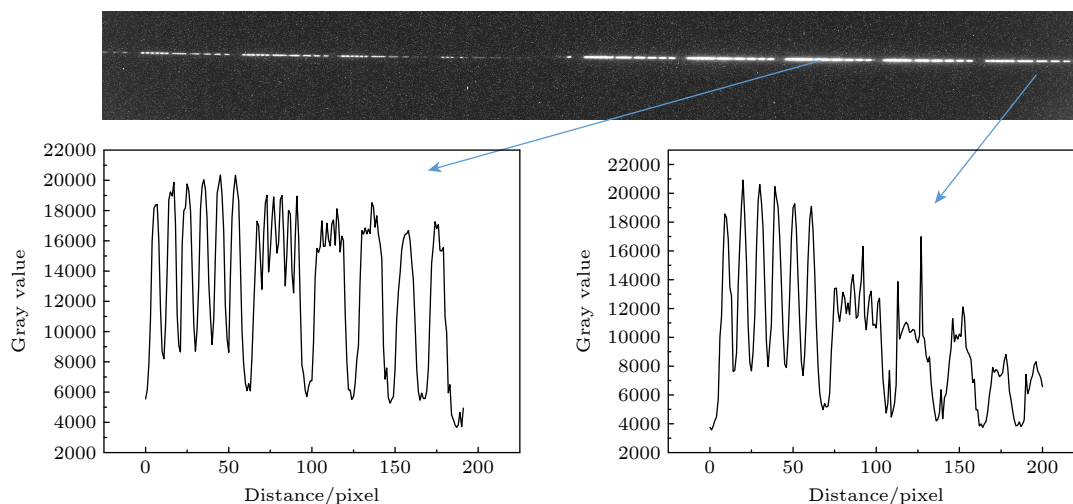


图6 耦合像增强器时的空间分辨率测试图像

Fig. 6. Spatial resolution test image coupled with image intensifier.

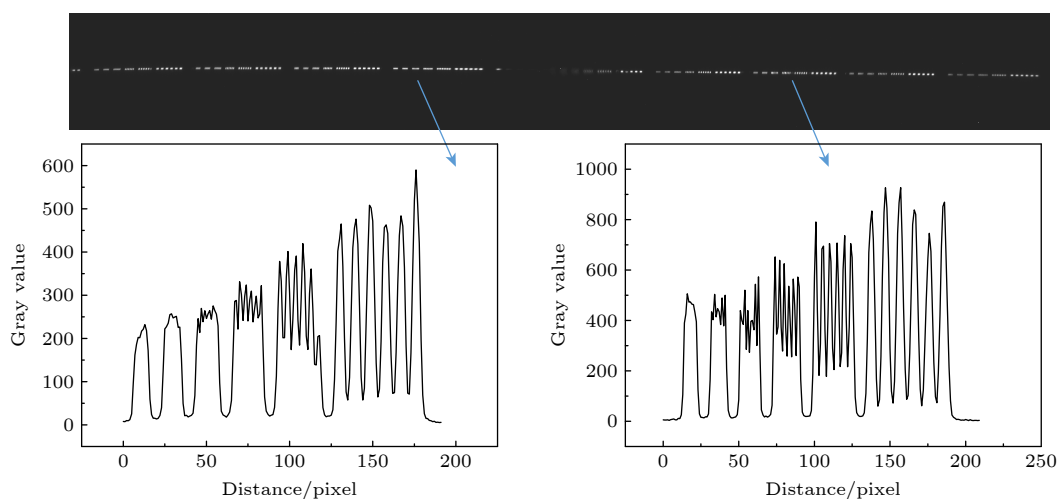


图 7 无像增强器时的空间分辨率测试图像

Fig. 7. Spatial resolution test image without image intensifier.

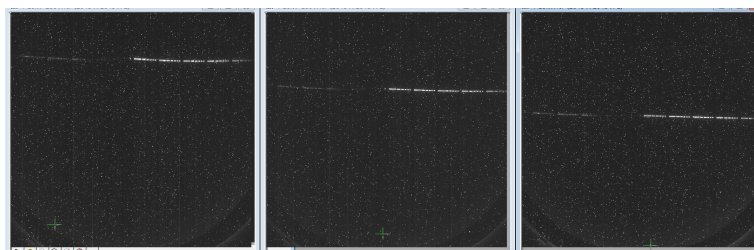


图 8 偏转灵敏度测试图像

Fig. 8. Deflection sensitivity test image.

用去除光锥, 直接耦合像增强器的方式对空间分辨进行了测试, 测试结果见图 7. 此时, 中心空间分辨达到 25 lp/mm, 边缘空间分辨达到 20 lp/mm. 由此可见, 像增强器对空间分辨造成了较大的影响, 采用更高灵敏度的图像记录系统以去除像增强器的使用, 可提升变像管空间分辨, 同时保证变像管的灵敏度.

从图 6 和图 7 中还可得出阴极有效长度, 图像上共约有 10 组分辨单元, 实际制作的分划阴极每组分辨单元占用的长度为 4.4 mm, 因此得出有效阴极长度约为 44 mm, 实际测试与设计的 50 mm 有一定差别, 这是由于实际结构中荧光屏到阴极的距离比设计长约 10 mm, 这导致变像管放大倍数更大, 设计值为 1.57, 而实际值约为 1.7 倍. 通过缩短实际结构中荧光屏到阴极的距离, 可以将有效阴极长度提升到 50 mm, 但这会缩小变像管放大倍数, 可能会对空间分辨造成一定影响.

偏转灵敏度是评估变像管扫描快慢的重要指标, 对条纹相机时间分辨存在较大影响. 对双阴极变像管的偏转灵敏度进行测试, 测试时在偏转板上

加载一定偏压, 实现对电子束的静态偏转, 根据偏转距离和加载的偏转电压计算出偏转灵敏度. 偏转灵敏度测试图像如图 8 所示, 其中最右边为偏转板接地时的静态像, 中间为上偏转板加 +100 V、下偏转板加 -100 V 时的偏转像, 左边为上偏转板加 +200 V、下偏转板加 -200 V 时的偏转像, 依据偏转距离计算出偏转灵敏度为 40 mm/kV (阴极电压为 -10 kV). 研究表明, 当偏转电压增大到一定程度后, 电子将被偏转板边缘拦截, 变像管实际有效扫描范围约为 40 mm. 假设全屏测量时间窗口为 2 ns, 则扫速为 50 ps/mm, 结合变像管的阴栅场强和静态像宽初步推算其时间分辨优于 10 ps.

4 结 论

采用双通道电四极透镜, 在空间方向聚焦电子和平板电极, 在时间方向压缩电子的方法, 发展了一种双通道条纹相机扫描变像管, 初步测试结果表明, 变像管有效阴极长度为 44 mm, 偏转灵敏度达

到 40 mm/kV. 在采用像增强器对图像进行增强时, 空间分辨中心位置优于 15 lp/mm, 边缘优于 10 lp/mm. 去除像增强器后, 变像管空间分辨中心位置提升到 25 lp/mm, 边缘提升到 20 lp/mm. 像增强器对变像管空间分辨存在较大影响, 去除像增强器可提升变像管空间分辨, 但整体灵敏度将会受到影响. 采用高灵敏度图像记录系统, 直接耦合变像管荧光屏实现图像的记录存储应是获得高空间分辨同时维持整体灵敏度的折中方法. 进一步优化变像管阴极到荧光屏的距离, 可将变像管有效阴极长度提升到 50 mm 以上.

参考文献

- [1] Schirmann D, Mens A, Sauneuf R, et al. 1992 *SPIE* **1757** 139128
- [2] Kimbrough J R, Bell P M, Christianson G B, Lee F D, Kalantar D H, Perry T S, Sewall N R, Wootton A J 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 748
- [3] Pitre V, Magnan S, Kieffer J C, Dorchies F, Salin F, Goulmy C, Rebuffie J C 2004 *SPIE* **5194** 503581
- [4] Feng J, Shin H J, Nasiatka J R, Wan W, Young A T, Huang G, Comin A, Byrd J, Padmore H A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 134102
- [5] Lihong N, Qinlao Y, Hanben N, Hua L, Junlan Z 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 023103
- [6] Hu X, Liu S Y, Ding Y K, Yang Q L, Tian J S, He X A 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 2871 (in Chinese) [胡昕, 刘慎业, 丁永坤, 杨勤劳, 田进寿, 何小安 2009 *光学学报* **29** 2871]
- [7] Opachich Y P, Kalantar D H, MacPhee A G, et al. 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 125105
- [8] Li J, Hu X, Yang P, Yang Z W, Chen T, Liu S Y 2013 *High Power Laser Part. Beams* **25** 2616 (in Chinese) [李晋, 胡昕, 杨品, 杨志文, 陈韬, 刘慎业 2013 *强激光与粒子束* **25** 2616]
- [9] Zhu M, Tian J S, Wen W L, Wang J F, Cao X B, Lu Y, Xu X Y, Sai X F, Liu H L, Wang X, Li W H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 098501 (in Chinese) [朱敏, 田进寿, 温文龙, 王俊峰, 曹希斌, 卢裕, 徐向晏, 赛小锋, 刘虎林, 王兴, 李伟华 2015 *物理学报* **64** 098501]
- [10] MacPhee A G, Dymoke-Bradshaw A K L, Hares J D, Hassett J, et al. 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11E202
- [11] Li J, Yang Z W, Hu X, Zhang X, Wang F 2021 *Infrared Laser Eng.* **50** 20210402 (in Chinese) [李晋, 杨志文, 胡昕, 张兴, 王峰 2021 *红外与激光工程* **50** 20210402]
- [12] Eagleton R T, James S F 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3969
- [13] Hu X, Jiang S E, Cui Y L, Huang Y X, Ding Y K, Liu Z L, Yi R Q, Li C G, Zhang J H, Zhang H Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1447 (in Chinese) [胡昕, 江少恩, 崔延莉, 黄翼翔, 丁永坤, 刘忠礼, 易荣清, 李朝光, 张景和, 张华全 2007 *物理学报* **56** 1447]
- [14] Cone K V, Dunn J, Schneider M B, Baldis H A, Brown G V, Emig J, James D L, May M J, Park J, Shepherd R, Widmann K 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10E318
- [15] Millecchia M, Regan S P, Bahr R E, Romanofsky M, Sorce C 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10E107
- [16] Nilson P M, Ehrne F, Mileham C, et al. 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11D504
- [17] Stillman C R, Nilson P M, Ivancic S T, Mileham C, Begishev I A, Junquist R K, Nelson D J, Froula D H 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11E302
- [18] Benstead J, Moore A S, Ahmed M F, et al. 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 055110
- [19] Hill K W, Bitter M, Delgado-Aparicio L, et al. 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11E344
- [20] Olson R E, Rochau G A, Landen O L, Leeper R J 2011 *Phys. Plasmas* **18** 032706
- [21] Chen B L, Yang Z H, Wei M X, et al. 2014 *Phys. Plasmas* **21** 122705
- [22] Stillman C R, Nilson P M, Ivancic S T, Golovkin I E, Mileham C, Begishev I A, Froula D H 2017 *Phys. Rev. E* **95** 063204
- [23] Pikuz S A, Shelkovenko T A, Chandler K M, Mitchell M D, Hammer D A, Skobelev I Y, Shlyaptseva A S, Hansen S B 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **10** 3666

X-ray streak camera tube with two photocathodes^{*}

Li Jin Yang Pin Yang Zhi-Wen Zhang Xing Liu Shen-Ye
 Dong Jian-Jun Yang Zheng-Hua Ren Kuan
 Li Ying-Jie Zhang Lu Hu Xin[†]

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 17 June 2022; revised manuscript received 17 July 2022)

Abstract

The time-resolved X-ray spectroscopy measurement system based on X-ray streak camera technology is indispensable diagnostic equipment in the study of laser inertial fusion research and high-energy-density physics. However, limited by the effective photocathode length of the X-ray streak tube, the time-resolved spectral measurement system usually used has the shortcomings of narrow spectrum range and poor spectral resolution.

In order to overcome the shortcomings, a novel dual-channel streak tube is developed, which consists of a photocathode, a prefocusing electrode group in temporal direction, an electric quadrupole lens electrode group, a main focusing electrode group in temporal direction, a deflector plate, and a phosphor screen. The photocathode has two slits. When X-rays are incident, two electron beams can be emitted simultaneously. The electric quadrupole lens electrode group is composed of 8 arc electrodes. Two electric quadrupole lenses are formed by the 8 arc electrodes in the spatial direction. Two electron beams emitted from the cathode of the streak tube are first accelerated and prefocused by the prefocusing electrode group in the time direction, and then compressed by the main focusing electrode group in the time direction. In the spatial direction, two electron beams are focused by the two electric quadrupole lenses independently. This novel streak tube structure can focus two electron beams at the same time, thereby increasing the effective photocathode length and maintaining the compact structure of streak tube without increasing the aberration.

The cathode voltage of the designed streak tube is -12 kV, the distance from cathode to grid is 5 mm, and the cathode-grid field strength is 2.4 kV/mm. The cathode is divided into two sections, the spacing between sections is about 13 mm, the length of each section is more than 20 mm, the magnification of the image converter tube is about 1.56 times, the distance between the cathode and the phosphor screen is 300 mm, and the longest size along the cathode direction is 90 mm. The test results of the performance of the streak tube show that the actual effective cathode length of the developed tube reaches 44 mm, the spatial resolution is better than 15 lp/mm, and the deflection sensitivity is better than 40 mm/kV. The effective cathode and spatial resolution of the tube can be increased to 50 mm and 25 lp/mm by further optimizing the structure of the tube and removing the image intensifier with a high sensitivity image recording system, respectively.

Keywords: X-ray streak camera, streak tube, time-resolved spectrum diagnosis, two cathodes

PACS: 32.30.Rj, 42.79.Pw, 52.70.La, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.71.20221194

^{*} Project supported by the Presidential Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. YZJLX2018011, YZJLX2019011).

[†] Corresponding author. E-mail: huxin88@sina.com



双阴极X射线条纹相机变像管

李晋 杨品 杨志文 张兴 刘慎业 董建军 杨正华 任宽 李颖洁 张璐 胡昕

X-ray streak camera tube with two photocathodes

Li Jin Yang Pin Yang Zhi-Wen Zhang Xing Liu Shen-Ye Dong Jian-Jun Yang Zheng-Hua Ren Kuan Li Ying-Jie Zhang Lu Hu Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 233201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221194

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221194>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型条纹管数值模拟及实验研究

Numerical calculation and experimental study on the small-size streak tube

物理学报. 2018, 67(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180643>

一种高偏转灵敏度同步扫描条纹管

A synchroscan streak tube with high deflection sensitivity

物理学报. 2021, 70(21): 218502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210814>

一种用于Z箍缩实验的软X射线成像系统

Soft x-ray imaging system used for Z-pinch experiments

物理学报. 2021, 70(4): 045203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200957>

毫秒时间分辨同步辐射X射线衍射和高压快速加载装置及应用

Millisecond time-resolved synchrotron radiation X-ray diffraction and high-pressure rapid compression device and its application

物理学报. 2022, 71(10): 100702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212360>

CsI光阴极在10100 keV X射线能区的响应灵敏度计算

Calculation of CsI photocathode spectral response in 10–100 keV X-ray energy region

物理学报. 2018, 67(8): 085203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180029>

抑制傅里叶变换法恢复的X射线相衬像中的伪影

Suppression of artifacts in X-ray phase-contrast images retrieved by Fourier transform

物理学报. 2021, 70(10): 104101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201781>