

软X射线皮秒变象管扫描相机

张小秋 龚美霞 常增虎 雷志远
杨斌州 宋宗贤 宋克昌

(中科院西安光机所)

软X射线皮秒变象管扫描相机技术是一种用变象管扫描相机测量X射线脉冲而能达到皮秒时间分辨率和一维微米级空间分辨率的技术。X射线扫描相机是研究伴有X射线辐射的一切高速瞬变过程的极为重要的测量工具。例如在激光核聚变的研究中,加热压缩期间靶球发生内爆过程中高温高密度等离子体的光谱辐射主要为软X射线,对这些软X射线的研究,可以获得有关等离子体的电子温度、电子能量分布、各种不稳定性的形态及这些参量随时间变化的资料。然而,产生X射线辐射的整个过程只在皮秒数量级,而受激光脉冲照射的靶球直径仅 $100\ \mu\text{m}$,所以要研究整个现象的发展过程,就需要有皮秒级时间分辨率及微米级空间分辨率的X射线诊断技术。在核武器试验及爆轰物理研究中,不同时间分辨率的X射线条纹相机也是极为有效的测试工具。

由于X射线皮秒变象管扫描相机技术在科学技术及国防建设中的重要性,特别因为它是激光核聚变的一种极为有效的诊断技术,所以,从70年代初开始,世界上各发达国家致力于此项技术的研究,并在70年代中期即取得了有意义的结果。现在,这种相机在国际上已经商品化。实验室内得到的最高时间分辨率为 20ps 左右。目前此项技术已广泛用于激光等离子体诊断,并与X射线成像技术、光谱分辨技术相结合而取得了很多有意义的结果。

通过几年来的努力,我们初步研制成功软X射线扫描相机。现将有关技术问题叙述如下。

一、X射线扫描相机概述

X射线扫描相机由具有对软X射线敏感的阴极皮秒扫描变象管、象增强器、图象信号处理系统(如胶片或带实时处理的增强型硅靶(SIT)摄像机)及电子学控制线路所组成。如图1所示。

用于软X射线变象管光阴极的基底材料应该对X射线透明或近乎透明。但是,由于软X射线($100\sim 10000\text{eV}$)很容易被物质吸收,因此要找到一种既对软X射线透明又能承受大气压力的材料作为阴极基底是很困难的。故而我们采用了开放式变象管,即无窗的变象管,它的阴极基底无须承受大气压力,所以可以用很薄的薄膜作为阴极基底。开放式变象管腰部与法兰盘焊接在一起。由于该相机是以激光产生等离子体研究为主要

应用对象,故法兰盘与激光靶室相连形成一整体。如图2所示。

变象管内的真空度取决于靶室的真空度,通常要求靶室的真空度高于 3×10^{-5} torr,若激光打靶引起靶室真空度严重下降,则必须对变象管单独安装一套真空机组,使变象管内的真空度维持在 1×10^{-5} torr以上,否则变象管内真空度的严重下降将导致变象管内电极间的高压击穿,使变象管不能正常工作。由于该原因在阴、栅极高压区内引起微弱放电,也会在变象管荧光屏上出现虚假信号,并将干扰正常信号。

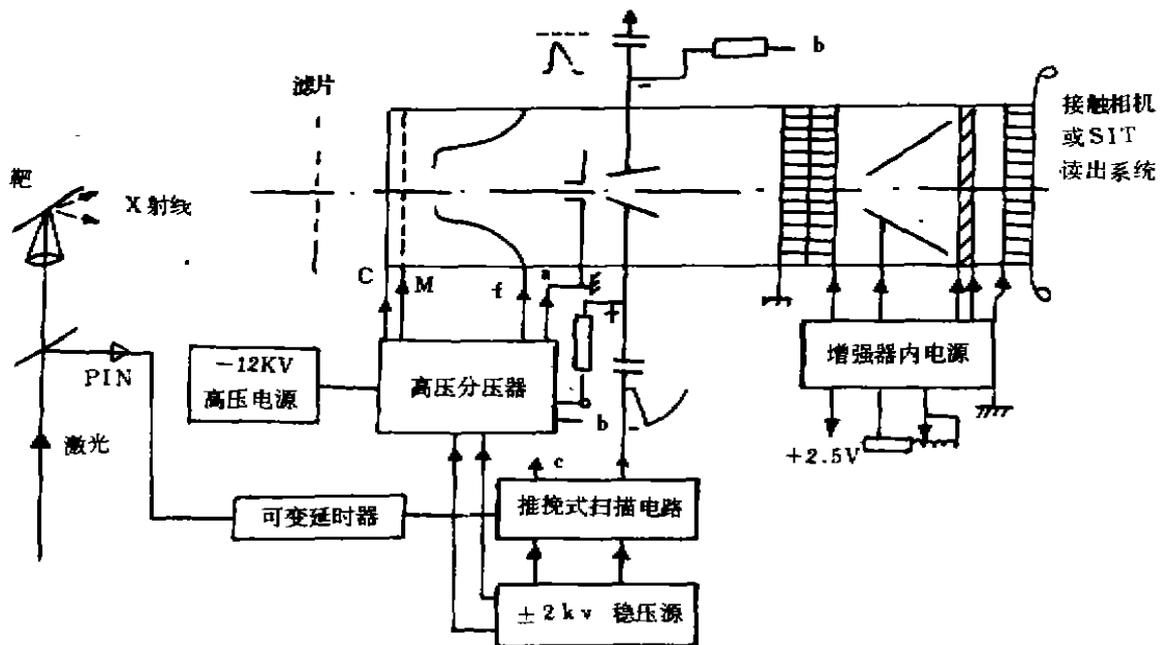


图1 软X射线皮秒扫描相机系统连接图

为了避免X射线直接射到变象管荧光屏上造成很亮的背景,变象管与靶室连接时,应使变象管轴线与靶和阴极中心连线有 $5 \sim 6^\circ$ 的夹角,或者使变象管轴线与激光束轰击金属靶面的交点间距离为 $15 \sim 20$ mm。我们取此距离为 20 mm,这样在打靶时由于X射线的直接照射荧光屏造成的背景几乎没有。

激光打靶时产生的软X射线脉冲经变象管狭缝光阴极而转换为电子脉冲,电子经加速、聚焦到达偏转区,在偏转板上所加的推挽式斜坡电压使电子偏转并轰击荧光屏,在荧光屏上得到随时间变化的条纹图象。此图象与X射线脉冲随时间变化过程相对应,它最后被图象讯号处理系统所接收。

通常变象管荧光屏上呈现的条纹象亮度是很低的,需经象增强器增强后才能拍摄到黑度合适的照片。我们把象增强器与带光纤板输出的变象管耦合在一起,并在象增强器后按装接触式相机,使象增强器输出面板与胶片直接相贴以记录条纹图象,其灵敏度比带有光学镜头的普通照相机从荧光屏上拍摄的图象高25倍。

扫描图象也可用带实时读出系统的SIT 摄像机拍摄, 在监视器上直接读出条纹象的强度分布。当象增强器与SIT 摄像机耦合时, 两者之间必须加10mm 厚的光纤板, 以防止高压击穿。

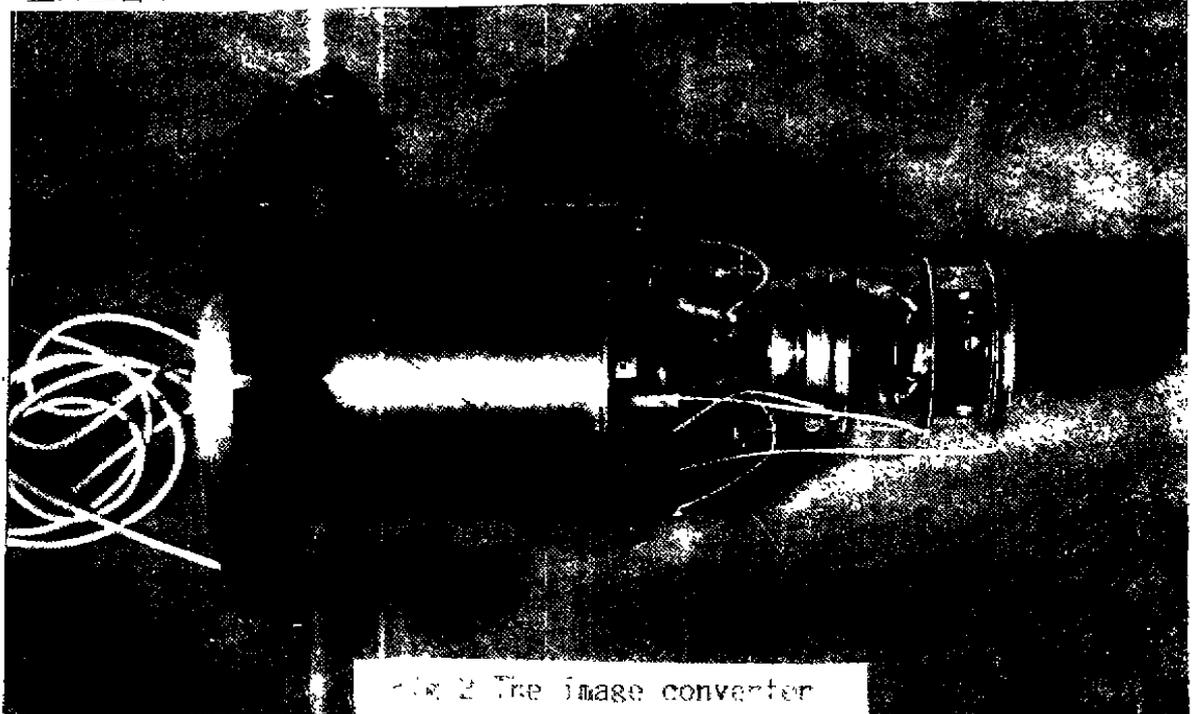


图2 变象管外形图

二、X 射线皮秒条纹变象管及象增强器

软X 射线变象管的结构如图3 所示。该变象管的电子光学系统与我所306# 可见光变象管基本相似。也是由光阴极、栅极、聚焦极、阳极、偏转板、荧光屏等部分组成。

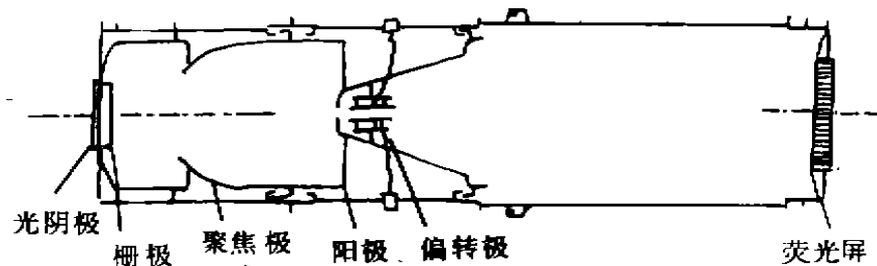


图3 X 射线皮秒扫描变象管示意图

变象管阴极和栅网都是平面型的, 采用可拆卸式结构, 以便阴极和栅网容易更换。由于阴极的灵敏度会随时间的延续而下降, 且在激光打靶过程中, 有可能发生一些损坏阴极和栅网的情况, 因而阴极和栅网的可更换性是很必要的。实际上只有开放式变象管才能满足这一要求。对于封闭式 X 射线变象管, 当阴极灵敏度降低后, 整个管子就不能

再继续使用。这也是开放式管子在用于激光打靶时表现出来的优点之一。

在X射线变象管阴极衬底的研究过程中，我们曾用聚丙烯薄膜、福摩娃(FORMVAR)薄膜和聚对二甲苯薄膜(C₈H₈)分别做过实验。它们对软X射线的透过率如图4所示。

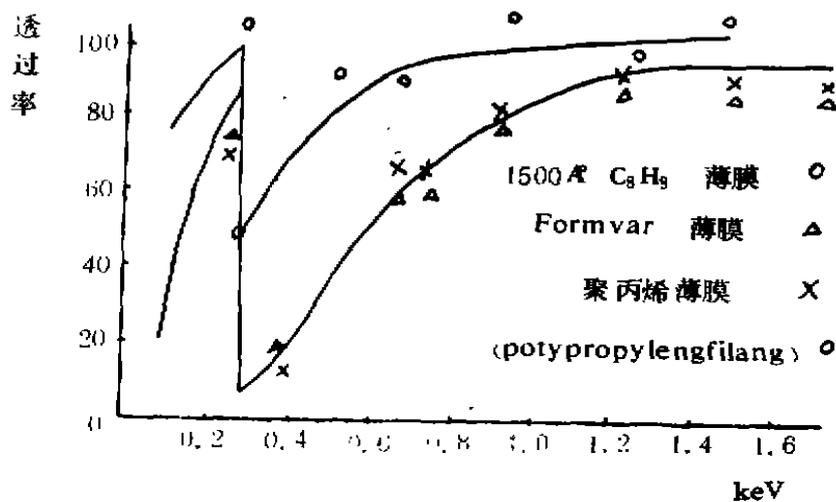


图4 衬底透过率曲线

由图4可见，用厚1500Å的C₈H₈薄膜作衬底，其透过率最好。把C₈H₈薄膜粘于中间刻有长12mm、宽100μm狭缝的金属圆盘上，并蒸镀一层厚200~300Å的金膜，即制成对X射线敏感的金阴极。若在薄膜上先蒸镀一薄层铝，再蒸镀一层厚500Å的碘化铯，即形成碘化铯阴极。金和碘化铯阴极的灵敏度与厚度关系见图5、6。

由图7、图8可见，碘化铯阴极的量子效率比金阴极的量子效率要高几十倍。但碘化铯阴极易受潮失效，使用受到限制。

图4-8所示光阴极衬底和光阴极特性是用自制的荧光X射线单色仪测定的。

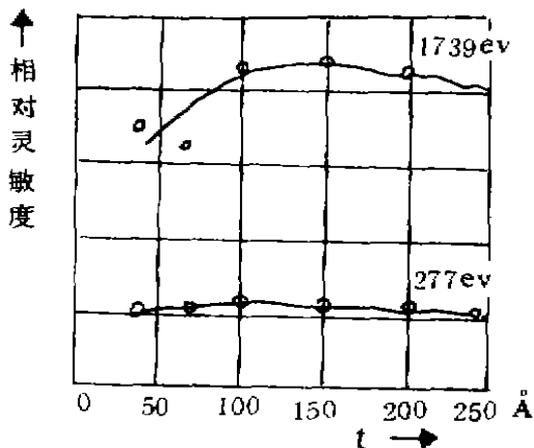


图5 金的灵敏度与厚度关系

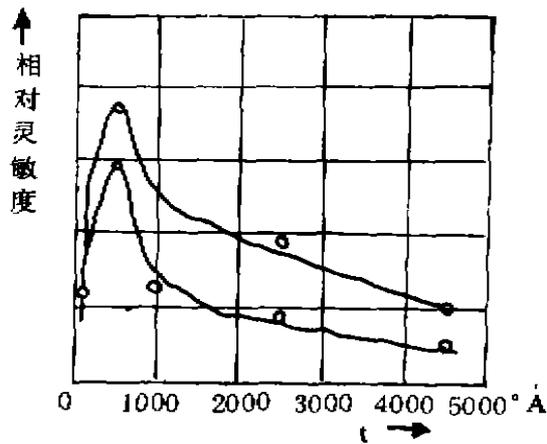


图6 碘化铯的灵敏度与厚度关系

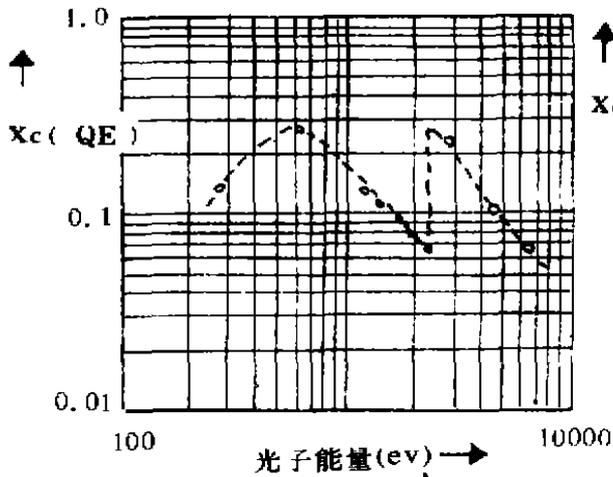


图7 200A 金的量子产额

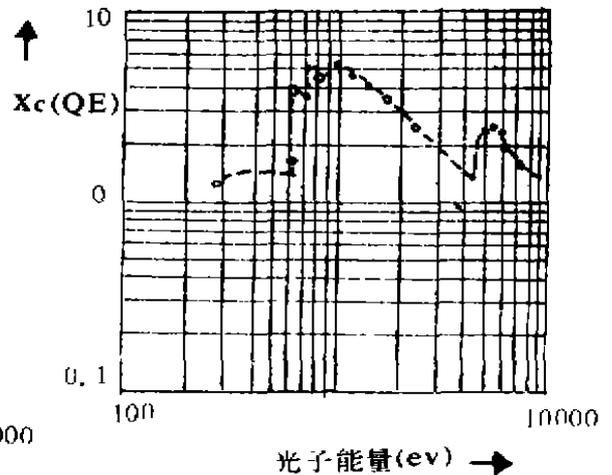


图8 500A 碘化铯的量子产额

变象管的加速栅网由50条/毫米铜镍网制成,它和阴极间场强为1200V/mm。

变象管的荧光屏为了与下一级象增强器阴极的光谱匹配,采用发黄绿光的P 20粉,并且用光纤板输出,以便与象增强器耦合。

X 射线变象管主要参数如下:

光阴极: CsH₃ 薄膜衬底蒸镀金或碘化铯。有效光阴极尺寸由狭缝尺寸所限定。

其高为12mm、宽为50、100、200 μ m 三种可更换。

荧光屏: P 20粉, 有效直径48mm。

工作电压: 光电阴极: -12kV

加速栅网: -10.5kV

聚焦极: -11.4kV

阳极: 0V

放大率: 2 : 1

偏转板电压: 0 ~ \pm 1000V 可调

偏转灵敏度: 42mm/kV

静态空间分辨率: 20 lp/mm

象增强器主要参数如下:

光电阴极: S25 有效直径40mm

荧光屏: P20 有效直径25mm

亮度增益: 5000~30000可调

放大率: 0.67 : 1

三、扫描相机的扫描线路

在可见光皮秒变象管扫描相机中,扫描线路的开关器件采用冷阴极闸流管KN-22。

这种管子在使用一段时间后，触发延迟及触发跳动都会增加，使扫描线路性能下降。另外，这种管子国内尚无实用的器件，所以我们采用雪崩晶体管作为开关器件。

雪崩管扫描线路见图9。我们采用推挽式扫描线路以减小偏转象差。该线路由12个性能相似的雪崩晶体管2N 5681串联而成，每个管子的雪崩电压为320 V左右。线路总电源电压为 $\pm 1.9\text{kV}$ ，加到偏转板上的斜坡电压的最大幅值为 $\pm 1.4\text{kV}$ 。

线路触发讯号由激光脉冲照射PIN管产生，讯号幅值通常要求大于3V，经整形放大后输入到脉冲变压器，变压器输出连接到两个雪崩管的基极。当雪崩管串的两端加上 $\pm 1.9\text{kV}$ 的高压时，雪崩管处于截止状态，触发讯号输入使T6、T7雪崩管导通，并引起了其它雪崩管过压雪崩。这样整个雪崩管串便产生瞬时导通，并经谐振回路在两个输出端分别输出斜率一定且极性相反的斜坡电压，波形如图10所示。

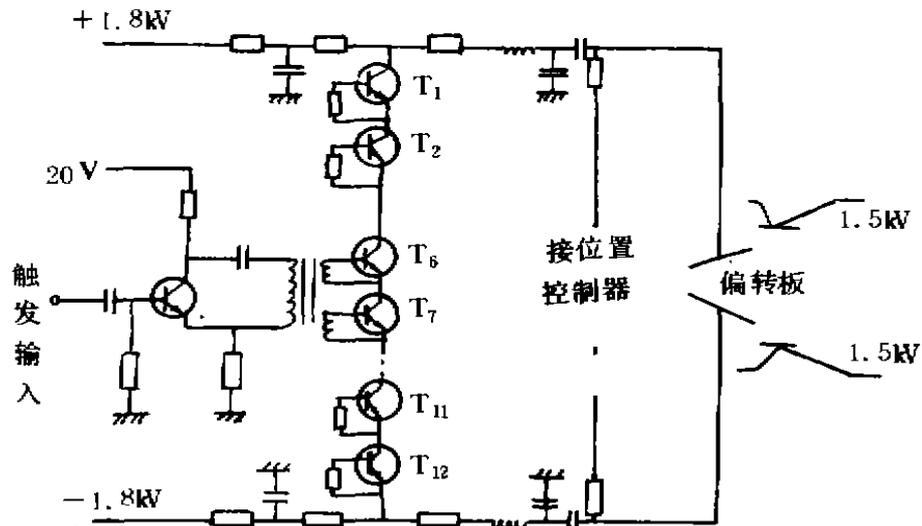


图9 雪崩管扫描电路

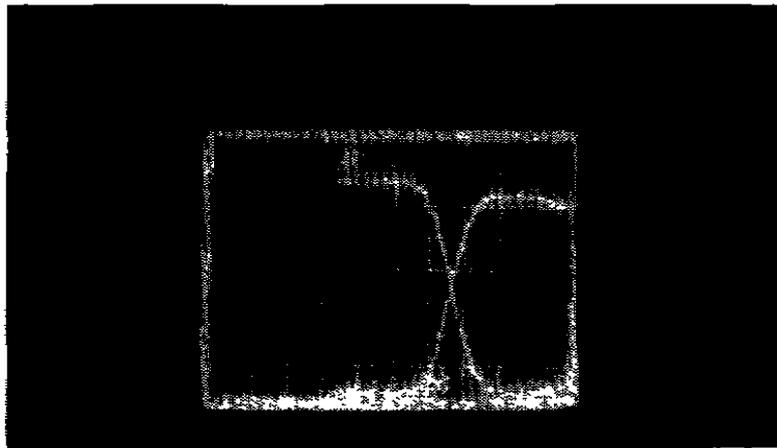


图10 推挽式扫描电压波形

线路的触发延时为9.5ns，输出斜坡电压的幅值为 $\pm 1.4kV$ ，上升时间为5ns。与变象管相连后，管子的扫描非线性为8%，扫描速度为 $4 \times 10^9 cm/s$ 。

四、X射线扫描相机动态性能

1. X射线扫描相机时间分辨率测定

X射线扫描相机时间分辨率指相机荧光屏上扫描方向两个象元长度对应的时间。它表示了相机能够分开的两个 δ 输入脉冲的最小时间间隔。它主要取决于光阴极光电响应时间和光电子在变象管内渡越时间弥散、变象管扫描方向动态分辨率及扫描速度等因素。

X射线扫描相机时间分辨率的测定方法有很多种，我们采用易被使用者接受的脉冲法，即用扫描相机测量一超短脉冲 $\Delta\tau_s$ ，若相机时间分辨率为 $\Delta\tau_c$ ，则所测得脉冲宽度 $\Delta\tau_i = \sqrt{\Delta\tau_s^2 + \Delta\tau_c^2}$ 。若光源脉冲足够短，可认为所测脉宽即为相机的时间分辨率。但用此法测量的前提是要有脉宽足够短的X射线脉冲源。众所周知，要产生脉宽很窄（几个ps）的X射线脉冲是很困难的，目前唯一有效的产生超短脉冲的方法是用激光打靶产生等离子体，用等离子体的X射线辐射作为超短脉冲X射线源。这种方法得到的X射线脉冲的宽度，取决于激光的脉宽和等离子体的特性。

由于条件限制，我们暂时还没有脉宽非常窄的激光器。因此扫描相机的极限时间分辨率目前尚难以测定。我们只能用YAG被动锁模激光器作为打靶光源，用其激光等离子体的X射线辐射测定相机时间分辨率。

相机动态特性的测试装置如图11所示。

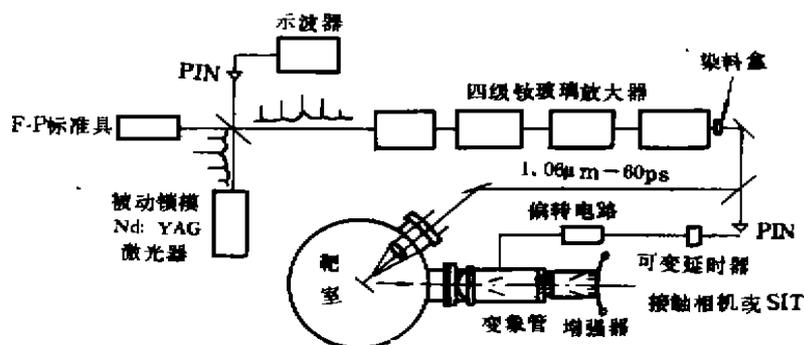


图11 动态特性测量的实验装置

激光的振荡器采用被动锁模Nd:YAG，输出脉冲约6~8个，脉宽~60ps（图12），光束经过半反镜分成两路，一路到达PIN探测器并输入示波器监测锁模脉冲波形。另一路入射到200ps法-卜标准具，入口端镀有 $R=50\%$ ， $\lambda=1.06\mu m$ 半反膜，另一端镀有 $R=100\%$ ， $\lambda=1.06\mu m$ 高反膜。光束在标准具内来回反射，并输出一系列间隔为200ps强度按50%衰减的光脉冲。序列脉冲经四级钽玻璃放大器放大后，总能量约为0.5~0.7

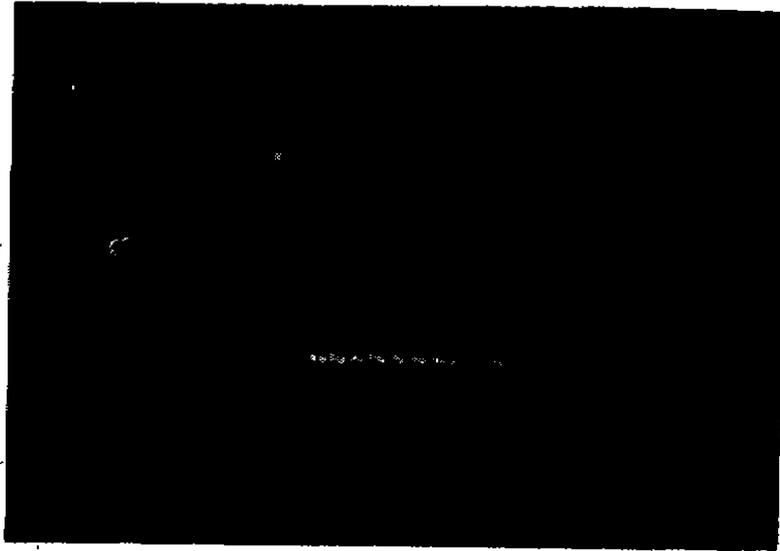


图2 YAG 激光器输出脉冲

焦尔。

序列光脉冲经延时后，通过全反镜进入靶室窗口。聚焦透镜把光束会聚于金靶或其它金属靶上，焦斑直径约 $100\mu\text{m}$ 。这种功率密度很高的激光在金属靶上产生高温等离子体，后者将放出X射线，此X射线脉冲即作为测量时间分辨率的光源。靶室及X射线扫描相机外形见图13。



图13 靶室及X射线扫描相机外形

由金靶上的等离子体发射的脉冲X射线，经过滤片钛或镍到达变象管的狭缝阴极上。相应的电子脉冲经加速、聚焦、扫描后到达荧光屏，屏上将出现条纹图象。条纹象能否出现在荧光屏合适位置，取决于光信号和电信号的同步。

由于象增强器屏上出现图象的时间极短，故必须用高速胶片拍摄。我们采用27~31 DIN的1087胶片，在象增强器屏上拍摄的条纹象见图14。用显微密度计扫描的黑度曲线见图15。

图15的黑度计坐标经换算后得出强度坐标。(1087胶片的 γ 值为1.4)。由已知的200ps标准具定出两峰间隔为200ps,相当于强度最大值的1/2处,即为FWHM值。而由图可测出X射线的FWHM为33ps,即X射线条纹的相的时间分辨率为33ps。多数情况下测出相机的时间分辨率为50~60ps。实际上,由于光源脉冲不是 δ 脉冲,故相机的分辨率应优于此值。

由图16可测出X射线变象管的扫描速度为40mm/ns'。根据已取得的照片,测量出扫描非线性小于8%。

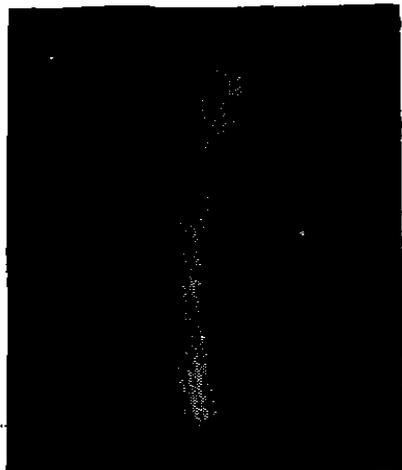


图14 标准具为200ps的条纹图象

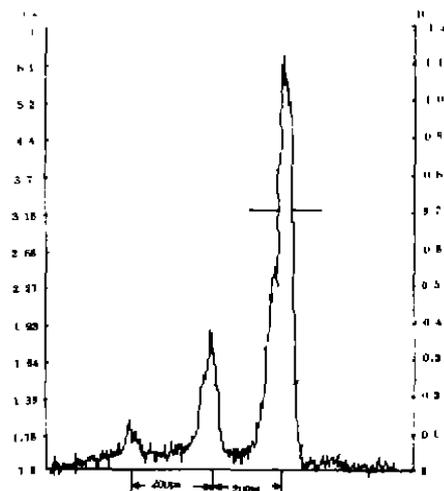


图15显微密度计扫描的显属曲线

2. X射线条纹相机动态范围的测量

条纹相机的动态范围是指在一定时间分辨率下,图象获取系统所得结果可分辨、取得的脉宽畸变小于一定值时的输入光脉冲强度的变化范围。其测量的典型方法是给相机输入一系列幅值有一定变化的脉冲,而输出结果脉宽比幅值适中的脉宽大20%的脉冲幅度与最小可探测的脉冲幅值之比即为条纹相机的动态范围。对于可见光条纹相机的动态范围测量,只需用激光器与F-P标准具即可获得具有一定的脉冲宽度、幅值按一定规律变化的脉冲序列。然而对于X射线条纹相机动态范围的测量来说,由于激光到X射线转换为非线性转换,故使用此方法有一定的困难。我们用不同厚度的滤片将同一X射线脉冲分为幅度不同的部分,用以测量动态范围,所得结果在一定程度上可表示动态范围特性。

我们在 C_2H_4 衬底的狭缝金阴极上分区粘铝聚丙烯膜,每层膜对能量600eV的X射线的透过率为50%,见图16。在狭缝上共分四个级,第一级无膜,第二级有一层膜,第三级有二层膜,第四级有三层膜。如图17所示。

这样用此方法即可将同一X射线脉冲分为幅度不同的四部分,相应的扫描相机的输出结果即表示了相机的动态范围。

测量X射线扫描相机动态范围的实验装置和时间分辨率测定装置相同,仅需将狭缝阴极更换为上述图17所示的阴极。经变象管扫描后获得的照片如图18、19所示。

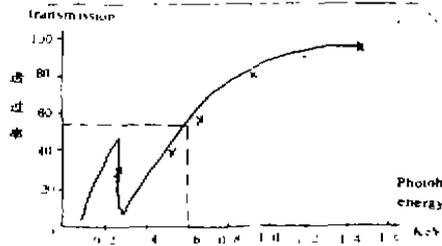


图16 测量动态范围用膜的透过率曲线

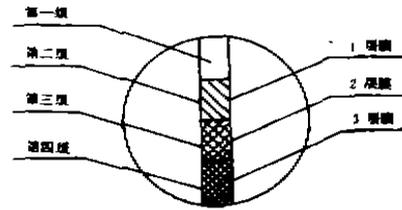


图17 动态范围测量的狭缝粘贴膜分布图

由图18、19可得出动态范围为32。但由于激光产生的软X射线脉冲强度并不一定正比于输入光脉冲的强度，并且软X射线谱的变化也取决于激光脉冲强度，因此对动态范围的准确测量将造成了极大的困难，上述测量值仅是参考值。

由图18可看出：由上到下膜层数增多，即软X射线谱的变化由上到下低能成份的比率减少。从上到下脉宽的变窄表示激光产生等离子体的X射线高能成份比低能成份具有较短的时间响应。

3. 时间畸变的测量

从以上所示的X射线条纹象的照片可看出扫描图象的弯曲。此弯曲是由于狭缝阴极两端的光电子比中心光电子具有较长的渡越时间造成的。这个弯曲量反映了变象管的时间畸变，时间的畸变将随扫速的增大而增大。上述照片所用的扫描速度为 $4 \times 10^9 \text{cm/s}$ 。如果把扫描速度降为 $2 \times 10^9 \text{cm/s}$ ，则畸变很小，如图20所示。在高扫速情况下时间畸变为 20ps 。

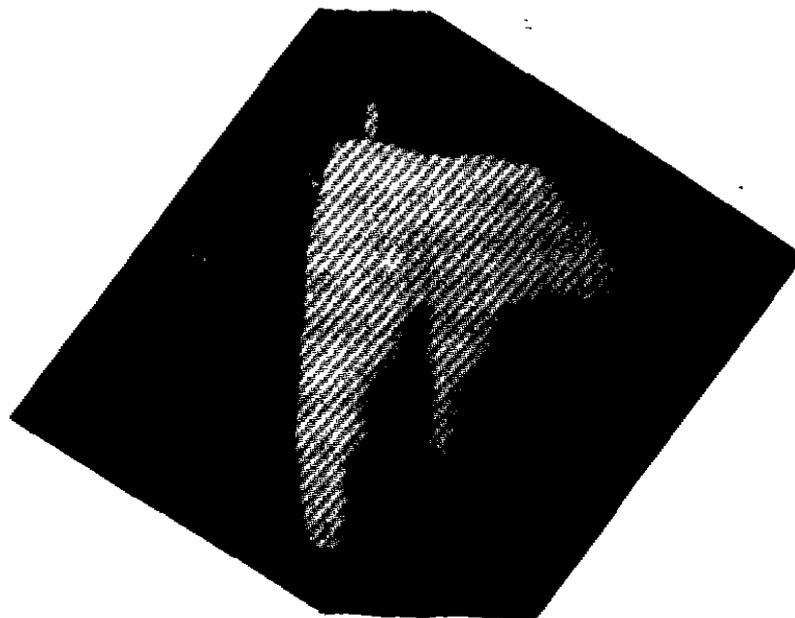


图18 动态范围测量的结果（狭缝阴极上分四个级）



图19 动态范围测量的结果 (狭缝阴极上分六个级)



图20 扫速为 $2 \times 10^9 \text{cm/s}$ 的X射线条纹图象照片

若要消除时间畸变, 则需把阴极和栅网改成球面阴极和球面网, 以消除边缘和中心电子的渡越时间差。但球面 X 射线阴极的制备是极为困难的。

4. 扫描相机的动态空间分辨率

扫描相机的动态空间分辨率是指一定扫速下, 在相机的荧光屏上获得的可分辨线对

数。此参数对于相机用在时间分辨谱或多通道时间分辨的诊断方面特别重要。

在狭缝阴极前0.5mm处放置一块金分划板，当激光打靶辐射X射线时，阴极上可得到分划板阴影，经相机扫描后在荧光屏上获得分划板图象，如图21所示。实测的该扫描相机的动态空间分辨率优于5lp/mm。



图21 动态空间分辨率照片

5、扫描相机的触发跳动

相机的触发跳动指扫描线路触发延迟的不稳定性。它关系到相机对目标的捕捉几率。为了减少触发跳动，在研制扫描线路时应选用型号合适的雪崩晶体管，并且雪崩管在线路板上布局要合理。雪崩管需经严格挑选，只有雪崩电压、电流及触发延迟一致性很好的管子才能串联使用。由于雪崩晶体管性能的分散性很大，通常要用大量的管子才能选出性能合格的器件。雪崩管工作点选用在接近于雪崩电压时，有利于减少跳动和触发延迟。



图22 触发跳动的照片

相机的触发跳动还与触发讯号有关,为了减少跳动,常要求输入讯号的幅度变化尽量小。

触发跳动的测试是用测试相机时间分辨率的装置进行的。拍摄的照片见图22。第一个脉冲对应图象位置的改变即表示触发跳动的大小。

由图22测出 X 射线皮秒变象管相机的触发跳动为 $\pm 150\text{ps}$,在扫速为 $4 \times 10^9 \text{ cm/s}$ 的情况下,可满足实用要求。

六、致 谢

X 射线皮秒变象管扫描相机的研制成功,是西安光机所全体有关同志在科学院技术科学部领导下,几年来夜以继日努力奋斗的结果。感谢侯所长的指导和技术上的帮助。

感谢牛憨笨同志设计了皮秒变象管电子光学系统,感谢光电子学室、器件室、系统室的同志们对于本工作的大力支持和帮助。

感谢上海光机所林尊琪同志对本工作的大力支持。

关键词: 变象管扫描相机, 软 X 射线变象管。

PICOSECOND SOFT X-RAY STREAK CAMERA

X. Zhang, M. Gong, Z. Chang, Z. Lei, B. Yang, K. Song, Z. Song.

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, P.O. Box 80

Xi'an, Shaanxi, China

Abstract

An x-ray streak camera with a time resolution of 30ps is described.

The particular feature of our streak camera is the demountable windowless configuration. The quantum efficiency of the photocathode has been calibrated absolutely with a fluorescent type soft x-ray monochromatic source. The relation between quantum efficiency and thickness of photocathodes has been studied. The optimum thickness for CsI is $\sim 500\text{\AA}$. The quantum yield of Au does not show significant change at 100-300 \AA thickness range. The quantum yield of 500 \AA CsI is as ~ 20 times as that of 200 \AA Au. polypropylene, Formvar and Parylene films have been studied as the substrates of the photocathode. The transmission of 1500 \AA parylene film is the highest for photon energy below 1 keV and is selected to be the substrate.

The avalanche transistors are selected to make the deflection circuit for the small jitter of the devices. 122N5681 transistors with similar performance is in series to get two ramp voltages with opposite polarity. The output ramp voltages are $\pm 1.4\text{kV}$ with ± 150 psec jitter. The write speed of the image converter with this circuit reaches 4×10^9 cm/sec, and the nonlinearity of the write speed is $\sim 8\%$.

The dynamic characteristics of the camera was measured with short pulse x-ray emission produced by mode-locked pulses irradiated on Au target. when the time resolution was measured, the x-ray pulse width was reduced by using suitable x-ray filter. A recorded pulse width of 33 ps is obtained. The dynamic spatial resolution of 8 lp/mm was measured by putting a Ni chart at the front of photocathode. Multi-layer foil method was used to measure the dynamic range giving the result of 32. The camera has been used by the researchers of the laser fusion and some primary results have been obtained.

Keywords: Image converter streak cameras, Soft X-ray image converter