

软X射线探测器

张小秋 赵卫

(中国科学院西安光机所)

摘要: 西安光机所自1984年开始,共研制了不同型的五台软X射线条纹相机,1987年开始,研制了软X光分幅相机。这些仪器,已在激光核聚变研究、激光等离子体诊断、核试验及爆轰物理研究等领域,作为有效的测试工具。本文介绍了我们的有关研究工作和X射线条纹相机、分幅相机的主要性能。

一、软X射线条纹相机

X射线条纹相机是一种用变像管扫描技术测量X射线脉冲而能达到ps时间分辨率和一维 μm 级空间分辨率的核物理中常用的诊断工具,它是研究伴有X射线辐射的一切高速瞬变过程的极为重要的测量手段。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X线的研究可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线辐射的整个过程只在ps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ps级时间分辨率及 μm 级空间分辨率的X线诊断技术。在核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。

X射线条纹相机由具有对软X射线敏感的阴极ps扫描变像管、像增强器、图像信号处理系统及电子学控制线路所组成,如图1所示。

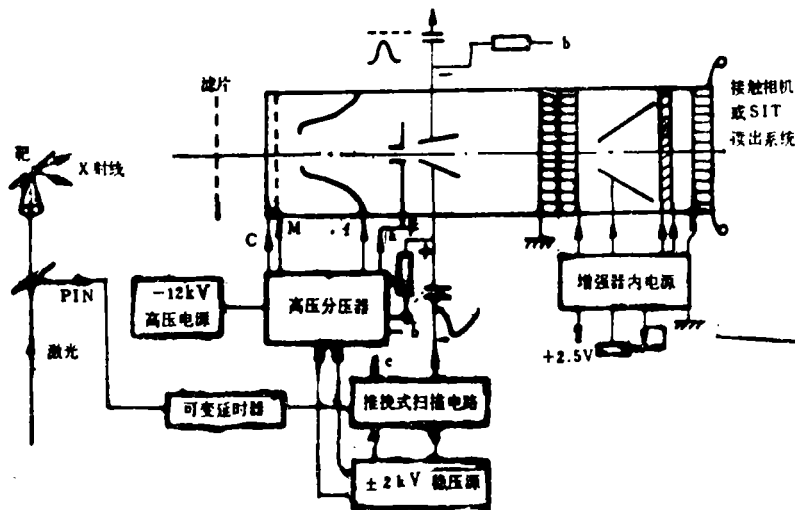


图1 软X射线ps扫描相机系统连接图

用于软X射线变像管光阴极的基底材料应该对软X射线透明或近乎透明。但是由于软X射线很容易被物质吸收,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,故我们采用了开放式变像管,即无窗的变像管,它的阴极基底无需承受大气压力,所以可以用很薄的薄膜作为阴极基底,开放式变像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。变像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 1×10^{-8} Pa,若激光打靶引起靶室真空度严重下降,则必须对变像管单独安装一套真空机组,使变像管内的真空度维持在 1×10^{-8} Pa以上,否则变像管内真空度的严重下降将导致变像管内电极间的高压击穿,使变像管不能正常工作。在阴栅间高压区内引起微弱放电,也会在变像管荧光屏上出现虚假信号,将干扰正常信号。

激光打靶时产生的软X射线脉冲经变像管狭缝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像。此图像与X射线脉冲随时间变化过程相对应,它最后被图像讯号处理系统所接收。

通常变像管荧光屏上呈现的条纹像亮度是很低的,需经像增强器增强后才能拍摄到黑度合适的照片。我们把像增强器与带光纤板输出的变像管耦合在一起,并在像增强器后安装接触式相机,使像增强器输出面板与胶片直接相贴以记录条纹图像。条纹图像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像的强度分布。

二、X 线条相机主要性能

1. 时间分辨率

X射线条纹相机时间分辨率指相机荧光屏上扫描方向两个象元对应的时间。它表示了相机能够分开的两个可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像管内渡越时间弥散,变像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 $\Delta\tau$,若相机时间分辨率为 $\Delta\tau_c$,则所得到脉冲宽度, $\Delta\tau_c = \sqrt{\Delta\tau_s^2 + \Delta\tau_c^2}$ 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必须有脉宽足够短的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。

2. 动态范围

条纹相机的动态范围是指在一定时间分辨率下图像获取系统所得结果可分辨得到的脉宽畸变小于一定值时的输入光脉冲强度的变化范围,我们采用在狭缝阴极上分区粘铝聚丙烯膜,每层膜对能量为600eV的X射线的透过率为50%,在狭缝上共分六个级。用此方法将同一X射线脉冲分为幅度不同的六部分,相应的扫描相机的输出结果即表示了相机的动态范围。

3. 动态空间分辨率

条纹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分辨率对数,此参数对于相机用于时间分辨谱或多通道时间分辨的诊断方面特别重要。

三、软X光分幅相机

由于激光等离子体的存在时间为几百ps至几个ns，空间尺度为几百 μm ，其光谱辐射主要为0.1~10keV光子能量区的X射线。因此具有ps时间分辨能力 μm 级空间分辨能力的X射线高速摄影技术是激光等离子体诊断的有力工具。

X光条纹相机在激光等离子体诊断中获得了广泛应用，但这种相机只有一维空间分辨能力，而研究等离子体的许多特性如对称性不稳定性，都需要诊断设备具有二维空间分辨能力，为了满足这一需求必须发展X射线ps分幅相机。

我们所研制的X光分幅相机主要原理如图2所示。

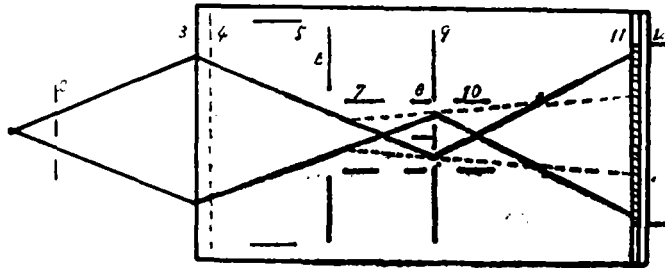


图2 分幅变像管原理图

图中1—等离子体；2—针孔组；3—光阴极；4—加速网；5—聚焦级；6—阳极；7—快门板；8—分离板；9—双缝光栏；10—补偿板；11—微通道板；12—荧光屏

在进行ps分幅摄影时，被摄等离子体通过两个针孔在光阴上形成两幅间隔一定距离的像，相应的两束光电子在阴极后交叉，并在双缝光栏处形成两个分离的电子斑。当在快门板上加以斜坡电压时，这两个电子斑便依次通过两个狭缝光栏，在加直流电压的分离板和加斜坡电压的补偿板作用下，最后在荧光屏上形成四幅图像。每幅图像的曝光时间等于电子斑在快门板作用下扫过狭缝光栏的时间。这种分幅方案使用了线性扫描原理，只需控制线路产生斜坡电压即行。

ps分幅相机包括带有MCP内增强的可拆卸的变像管，接触相机，雪崩晶体管斜坡发生器和电源，变像管光阴极采用 C_6H_6 薄膜上镀150 \AA 导电膜和碘化物。用此相机在实验室测得的动态分辨率为5lp/mm，每幅曝光时间为250ps。

四、用于高速摄影变像管的软X射线光电阴极

我们先后研究了CsI、CsBr、Au和 MgF_2 四种光电阴极的光电发光特性和光电发射与阴极厚度的关系，找出了最佳阴极厚度，并用软X射线荧光单色仪测量了最佳厚度阴极的量子效率，CsI为4.5，Au为0.25，CsBr为2.9， MgF_2 为0.12前两种X射线阴极已投入实际使用，后两种阴极由于量子效率较低，未被采纳。

为了直观比较几种阴极的效率，我们在同一衬底上分区制备了几种不同材料的狭缝阴极，用钨靶X射线管作为光源，把光阴极装于变像管上，在变像荧光屏上拍摄照片，并测出黑

度扫描曲线。

我们在研究了Au CsI阴极的同时,也研究了CsBr MgF₂阴极的厚度对灵敏度的影响,阴极厚度在镀膜时用石英晶体振荡器监测,准确的膜厚用激光椭圆偏振仪测量。

我们在研究X射光阴极的同时,建立了一套完整的超薄膜制作技术,在制取超薄膜 C₆H₆ 研制了一套气相沉积设备。

在真空中将粉末环二体材料加热汽化,通过600℃高温区裂解为单体,然后进入成膜室,在室温下沉积于玻璃表面聚合而成薄膜,目前制得的薄膜,最后可达 500 Å,在玻璃板上制得的薄膜,利用脱膜技术使膜成为自由支承膜,然后将膜转移到狭缝阴极上,我们也掌握了一套转移技术,能使薄膜平展的粘于狭缝上而不致破损薄膜。

五、微通道板在 X射线探测中的应用

软X射线探测在高温等离子体诊断,天文医学和生物研究等领域有十分重大的意义,空间分辨率高,时间响应快及输出电子的初能量分布窄等优点,从而在软X射探测中获得了广泛的应用。几年来我们使用所内研制的微通道板进行了这方面的研究工作,并取得了一些有意义的结果。

1. X射线光电倍增管

X射线光电二极管已广泛应用于激光等离子体诊断,但其探测灵敏度较低,不能满足微弱信号探测的需要,我们利用MCP时间响应快(~60ps)和电子增益高的特点,把我们研究的可见光MCP光电倍增管作适当修改后制成X射线光电倍增管这种器件与高速示波器连用,可观测X射线超短脉冲幅度随时间的变化。

我们研制MCP X射线光电倍增管的结构为无窗开放式,X射线由MCP接收,从而省去了普通倍增管的透射式阴极。在MCP前装有滤片以防止紫外线直射到MCP上,MCP前的磁环,可以将射向MCP的带电粒子偏离MCP接收面。

2. X射线光谱仪

在等离子体诊断中的非时间分辨X射线光谱分析多采用胶片作为X射线探测物质。这时胶片需置于真空中,而处理结果时则需打开真空室,故很不方便,我们把X射线色散元件与开放式MCP像增强器相结合制成了X射线光谱仪,这种仪器不仅探测灵敏度比较胶片高,且其输出屏处于真空外,故结果处理很方便。

3. MCP阴极X射线变像管

在X射线条纹相机中采用MCP作为光电阴极,在X光条纹相机测试和使用时都可使用较低亮度的光源,由于MCP具有小的电子初能量分布和较小的电子渡越时间弥散,故用MCP作为光阴极,甚至可以进行动态测试,它对时间和空间分辨率均不会产生大的影响。

Soft X-ray Detectors

Zhang Xiaoqiu Zhao Wei

Abstract

This institute has developed soft X-ray strip cameras of 5 models since 1984, and these strip cameras have been used in time resolution plasma diagnostics. The process and results in the development and calibrations are presented in this paper.