

用于软 X 光空间能谱诊断的双狭缝透射光栅谱仪

易荣清 郑志坚 唐永建 孙可煦 唐道源

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

介绍了利用国内最新研制成功的由透射光栅和微通道板构成的双狭缝透射光栅谱仪的结构、工作原理和性能参数, 给出了在 1990 年度的 LF-12[#] 实验中的测试结果。

激光等离子体产生的软 X 光空间能谱特性的诊断通常采用针孔光栅^[1]。然而针孔光栅存在着一个自身无法克服的缺点, 它的空间分辨率和谱分辨率都由同一针孔确定。但是, 谱分辨率与光源到光栅的距离成正比, 空间分辨率则与此距离成反比。这就是说, 要提高它的空间分辨率就必须牺牲它的谱分辨率, 反之亦然。为解决这一矛盾, 我们在原时间积分透射光栅谱仪^[2]的基础上, 在保证能谱分辨率不变的条件下增加一个提高空间分辨率的狭缝^[3], 使得空间分辨和能谱分辨在两个相互垂直的方向上各自独立。改进后的谱仪具有许多优点: 能谱分辨率和空间分辨率较高, 灵敏度高, 效率高, 抗干扰能力强, 能区较宽 (5—150 Å), 使用灵活, 对中方便, 能同时观察若干个光源的空间能谱特性, 还可以给出某一维的空间特性。实验结果证明: 上述透射光栅谱仪可以应用于软 X 光能谱的诊断。该谱仪完全可以代替针孔光栅进行光源空间能谱特性的研究。

一、谱仪的结构

该谱仪由透射光栅、狭缝、光栅室、微通道板、偏置电源、照相机、可见光胶片以及可变长短的通光管道组成, 其结构如图 1 所示。谱仪的关键色散性元件是中国科学技术大学同步辐射实验室最新研制成功的透射光栅。其光栅周期 $d = 1.17 \mu\text{m}$ (8531/mm), 光栅材料是金, 栅线厚度为 $0.5 \mu\text{m}$, 衬底材料是聚酰亚胺膜, 衬底厚度为 $0.5 \mu\text{m}$, 线空比为 1:1。

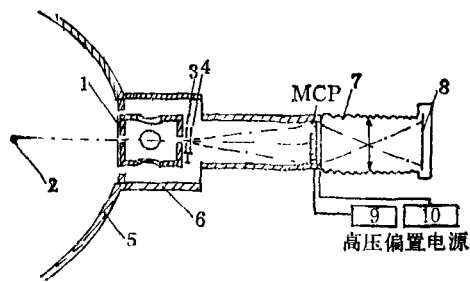


图 1 谱仪的结构和实验安排

1. 前置狭缝; 2. X 射线光源; 3. 光栅狭缝; 4. 透射光栅 (d); 5. 靶室; 6. 光栅室; 7. 照相机; 8. 胶片; 9. 3kV 源; 10. 5kV 源

另外, 光栅室除了放置光栅和调节光栅外还具有屏蔽可见光和杂色光的能力。

谱仪中使用的微通道板是一种具有电子倍增作用的光电器件, 具有把较弱的 X 光信号转换成可见光信号并且放大的能力, 且对可见光不灵敏。

二、谱仪的工作原理

如图 2 所示, 激光与靶物质作用产生的软 X 光, 经前置狭缝成像和与之垂直的光栅色散后在微通道板的灵敏面上构成 $x'-y'$ 二维的图象, 再通过微通道板转换放大, 用胶片记录下来, 就得到了光源的空间能谱分布。其中一维对应光源的空间特性, 另一维对应光源的能谱结构。

1. 能谱诊断

软 X 光经过透射光栅色散后, 对于某一级

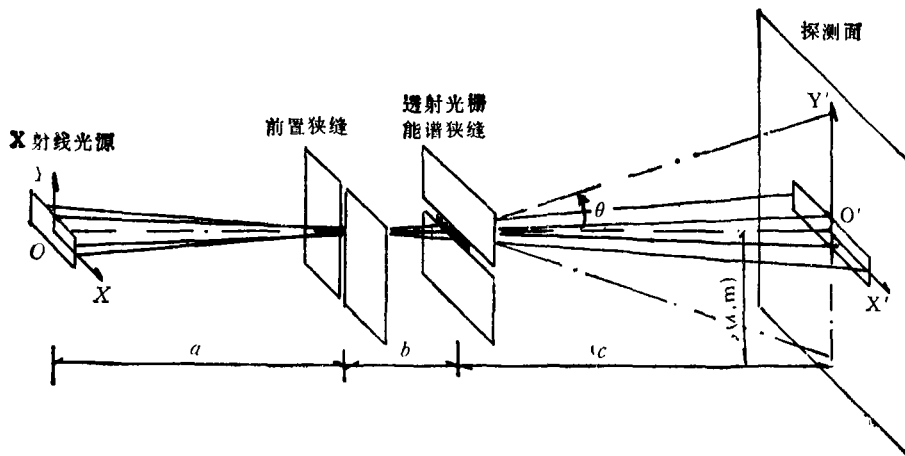


图2 谱仪的工作原理示意图

(除零级外), X光将按波长由小到大的顺序,以零级为中心,对称地向两边散开,如图2所示。

它们满足 Bragg 条件:

$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, \quad (1)$$

式中 d 为光栅周期, θ 为衍射角, m 为衍射级, λ 为 X 光波长。

考虑到探测面到光栅的距离 c 远大于光栅的有效面积,从光栅方程(1)式中可以导出下式:

$$y = \frac{c}{d} \cdot \lambda \quad (\text{对于一级衍射}), \quad (2)$$

式中 y 为波长为 λ 的 X 光色散后所落处离零级中心的距离。由上式可得

$$\lambda = \frac{d}{c} \cdot y. \quad (3)$$

由 y 可以算出对应的波长 λ 。因此,该谱仪所测谱的最大波长为

$$\lambda_{\max} = \frac{d}{c} \cdot y_{\max}, \quad (4)$$

式中 y_{\max} 是探测灵敏面的最大有效尺寸。

由于谱分辨率要受到光源大小和狭缝宽度的限制,根据狭缝成像原理和线色散关系,可以得到如下计算谱分辨的公式:

$$\Delta \lambda = \left(\frac{s+A}{a+b} + \frac{A}{c} \right) \cdot d, \quad (5)$$

式中 s 为光源的尺寸, A 为光栅狭缝的宽度, a 为光源到前置狭缝的距离, b 为前置狭缝到光

栅的距离。由(4)和(5)式,我们得到该谱仪测量 X 光能谱的范围^[4]:

$$\Delta \lambda < \lambda < \lambda_{\max}. \quad (6)$$

2. 空间特性诊断

光源发射的 X 光通过狭缝成像于探测面上,按狭缝成像原理,下列公式成立:

$$\text{放大倍数 } \beta = \frac{b+c}{a}, \quad (7)$$

$$\text{空间分辨率 } \Delta x = B \cdot \frac{a+b+c}{b+c}, \quad (8)$$

式中 B 为前置狭缝的宽度。

三、谱仪的参数实验选取和相应的性能指标

根据打靶的实际情况,谱仪各参数选取如下:

$$a = 735 \text{mm}, b = 105 \text{mm}, c = 800 \text{mm},$$

$$A = 90 \mu\text{m}, B = 50 \mu\text{m}, s = 200 \mu\text{m}.$$

在该条件下的谱仪的性能参数为

$$\Delta \lambda = 5 \text{ \AA}, \Delta x = 100 \mu\text{m}$$

$$\text{谱范围 } 5-150 \text{ \AA},$$

$$\text{横向放大倍数 } \beta = 1.2.$$

四、实验条件及其诊断结果

谱仪位于与人射光成 55° 、与水平面成 45°

夹角的位置上。实验观察到了平面金靶的空间能谱结构，还同时观察到了黑洞靶入口和诊断口发射的X光能谱结构。另外，还观察到了漏靶尾部发射的空间能谱结构。从这台谱仪的特点和这次的实验结果可以得到如下的物理信息：

1. 可以代替通常采用的亚衍(软X光)能谱仪¹⁰进行软X光能谱的诊断以及测量黑洞靶的辐射温度和X光总量,如图3所示。

2. 可以代替针孔光栅进行空间和能谱特性的研究,且同时具有较好的空间分辨率和能谱分辨率,如图4和图5所示。

3. 可以同时观测若干个光源的能谱结构,

并且可以进行直接比较。例如,图4中观察到了黑洞靶初级和次级的谱结构。结果说明:黑洞靶初级区温度比次级区温度高。在图5中我们同时观测到了入射口和诊断口发出的X光能谱。可以看出入射口的温度比诊断口的温度高得多。

4. 配上分幅相机,可同时进行快变光源的时间、空间和能谱特性研究。

该谱仪是在原来时间积分透射光栅谱仪的基础上临时改进的,所以谱仪的空间分辨率和能谱分辨率都尚未达到最佳结果。另外,谱仪还未进行校准和定标(包括光栅效率、衬底膜的

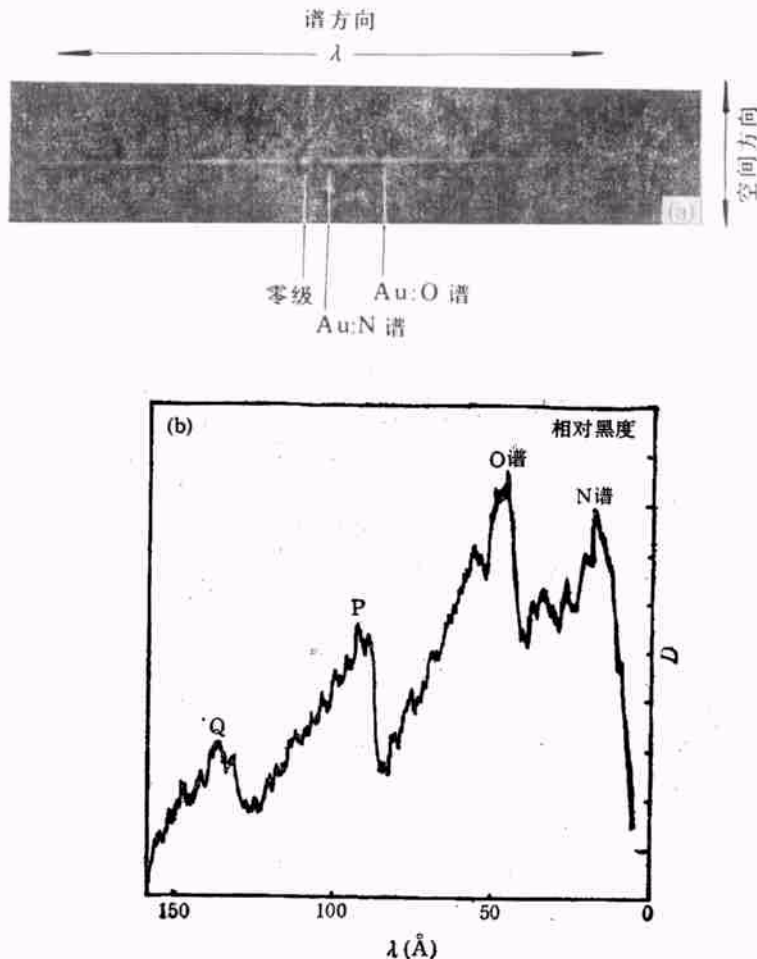


图3 平面金靶的能谱结构 ($E_L = 5J, t = 800ps$)
(a) 激光辐照平面 Au 靶产生的软X射线能谱结构; (b) 能谱曲线

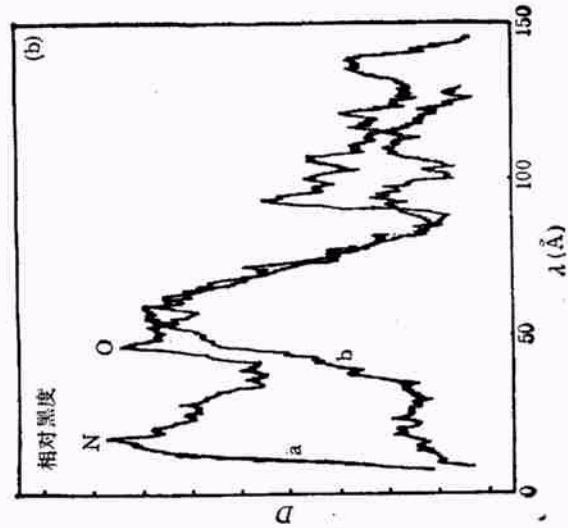
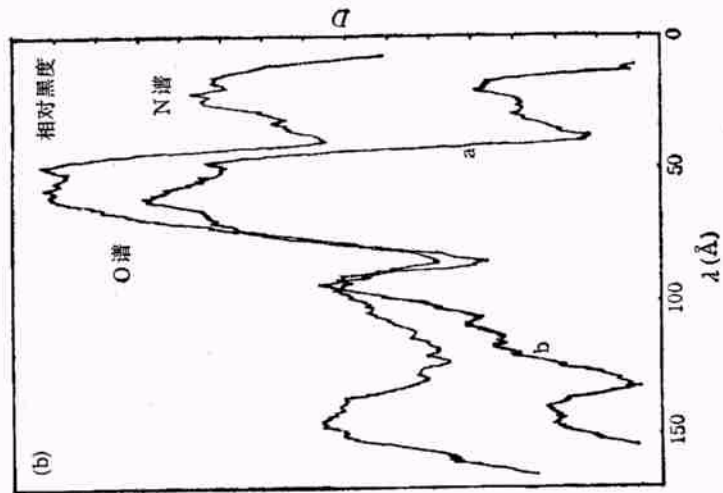
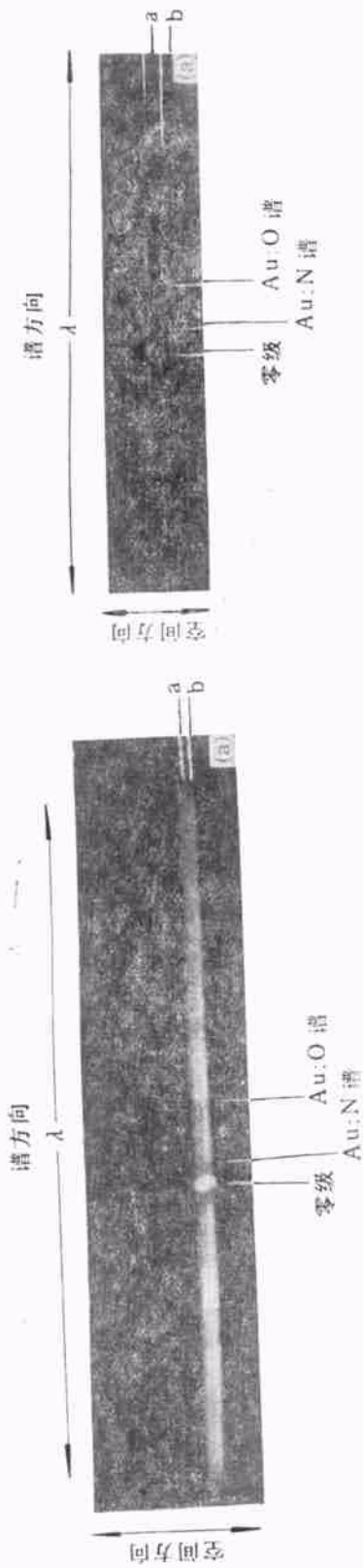


图 5 激光辐照黑靶, 分别从入射口和诊断口获得的软 X 光能谱分布
(a) 对应入射口的能谱结构; (b) 对应诊断口的能谱结构
(黑度: a 线 0.246D/cm, b 线 0.0144D/cm)

图 4 激光辐照黑靶, 从靶后观察到的软 X 光空间能谱结构的照片和分布曲线
(a) 对应初级区的能谱结构; (b) 对应次级区的能谱结构

(下转第 403 页)