第 56 卷 第 3 期 2007 年 3 月
1000-3290/2007/56(03)/1447-05

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.56,No.3,March,2007
©2007 Chin. Phys. Soc.

一种时间分辨三通道软 X 射线光谱仪*

胡 昕[1)†] 江少恩[1)] 崔延莉[1)] 黄翼翔[1)] 丁永坤[1)]
刘忠礼[1)] 易荣清[1)] 李朝光[1)] 张景和[2)] 张华全[3)]

1)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心,绵阳 621900)
2)(哈尔滨工业大学精密工程研究所,哈尔滨 150001)
3)(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所,绵阳 621900)

(2006 年 2 月 13 日收到;2006 年 3 月 9 日收到修改稿)

报道了时间分辨的三通道软 X 射线光谱仪研制工作,重点介绍了研制的三通道能谱仪的工作原理以及 210 eV,420 eV 和 900 eV 三个能区的设计参数,谱仪在上海神光 II 高功率激光器三倍频实验中进行了多次实时考核,取得较好实验结果,将多道平面镜、滤光片成功配接于高时间分辨 X 射线条纹相机上,使该谱仪在亚千电子伏能区内,可同时进行三个波段软 X 射线的时间和空间分辨测量,提供的实验结果也表明:X 射线平面镜结合滤光片的分光技术可应用于高时间分辨的 X 射线条纹相机上,从而获得高达 10 ps 的时间分辨.

关键词:软 X 射线条纹相机,平面镜,滤光片,掠入射
PACC:5270,0660J,7870D

1. 引 言

在激光聚变物理实验研究中,经常要进行能谱的时间分辨测量,更高的要求是能够在一次实验诊断中,同时获得目标多个能区的时间和空间分辨图像.X 射线掠入射平面镜结合选通滤光片获取一较窄波段的方法,是一项很成熟的技术,已经广泛应用,例如称之为‘Dante’的一种软 X 射线能谱仪就是由多个掠入射平面镜、透射滤光片以及经过绝对标定的 X 射线二极管组成,而将这种光子能带选择技术和高时间分辨的软 X 射线条纹相机(SXRSC)结合,可获取更高分辨的时、空、能信息,然而由于 X 射线条纹相机的感光元件形状是个狭缝(缝宽100 μm),要同时获取信号的时、空、能图像存在较大的困难,本文论述的研制工作很好地解决了这一技术难题.

2. 谱仪的原理和结构设计

2.1. 平面镜-滤片组合分光原理

对于宽范围的发射谱,要滤去高能成分,采用 X 射线掠入射平面镜是一个很有效的办法[1],在 X 射线波段,这种平面镜材料的折射率通常小于真空的 $n_0 = 1$,由于这种特性,在平面镜掠入射角和平面镜材料原子结构满足的情况下,在某一个截至能点 E_c 会发生表面全反射,高于 E_c 的成分可被截至,而低于 E_c 的成分能得到近似一致的反射率,平面镜原子序数低则截至能量低.滤光片是利用材料的 K 边或者 L 边突变实现分光,去掉低能部分的影响,将掠入射平面镜和滤光片组合可以获得相对较窄的能带,其谱分辨($E/\Delta E$)约为 3—5,主要由滤片材料性质决定.图 1 所示为甄别 900 eV 能道的原理示意图,由 Zn 滤片和 3°掠射角的金平面镜组合可以获得 900 eV 能区的光子,能谱范围是 800 eV—1000 eV.

2.2. 谱仪结构

研制的时间分辨的三通道软 X 射线光谱仪由软 X 射线条纹相机、三块 X 射线掠入射平面镜、滤片包和成像狭缝阵列(或针孔阵列)组成[2],如图 2 所示.

谱仪的工作过程如下:激光辐照靶点产生的 X 射线信号首先经过三个前置成像狭缝,从而对三通

* 国家高技术研究发展计划(批准号:863-804-3)资助的课题.

† E-mail:huxin88@21cn.com

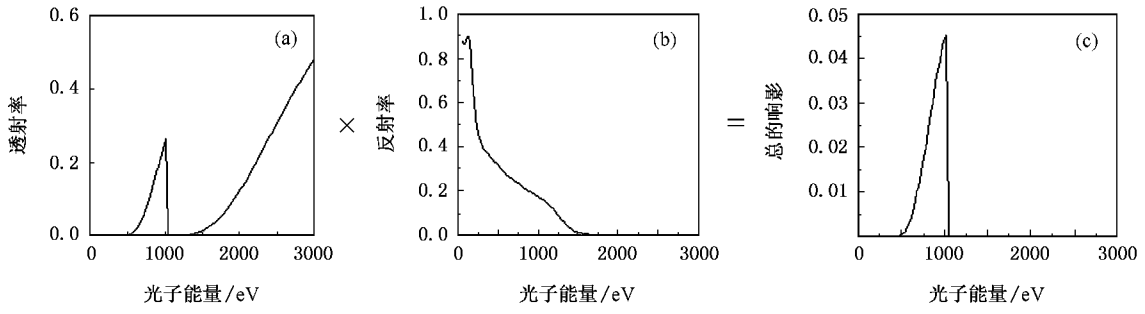

图 1 Zn 滤光片和 X 射线金平面镜组合分光原理示意图(未考虑条纹相机光阴极量子效率) (a)厚度 1.23 μm 锌滤片的透过率曲线;(b)金平面镜 3°掠射角的反射率曲线;(c)通道总的响应曲线

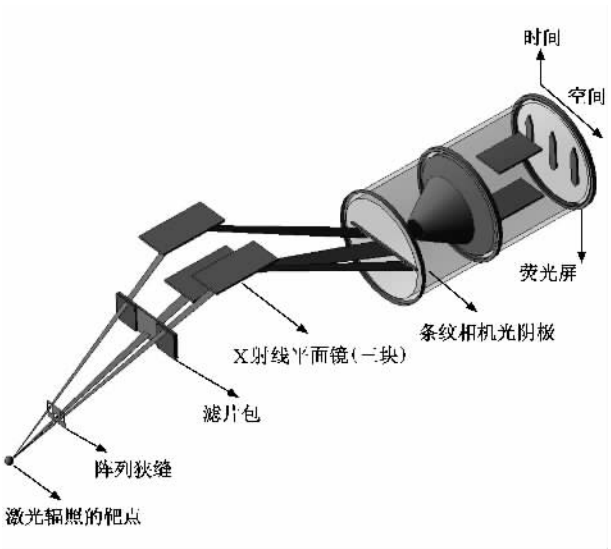

图 2 时间分辨三通道光谱仪工作示意图

道 X 射线信号提供空间分辨,空间放大倍数可以调整,通过狭缝成像后的三通道 X 射线分别入射到三个透射滤光片上,滤光片是根据不同的能道选择不同厚度的材料,并利用不同材料的 K 边或者 L 边突变实现分光,经滤片包选通的三道信号再分别按照预先设计的角度(一般是 1°到 6°)入射到 X 射线掠入射平面镜上,掠入射平面镜材料和掠射角度根据能道要求的截止能量 E_c 选择,高于截至能量 E_c 的 X 射线将被截止,这样经平面镜反射的三道 X 射线信号已经是窄波段信号,三道信号最后轰击 X 光条纹相机的光阴极,条纹相机的光阴极呈狭缝形状,材料对软 X 射线极其敏感,其产生的光电子在条纹相机变像管的加速、聚焦以及偏转斜坡脉冲扫描作用下,重新在荧光屏上形成时间分辨的扫描图像,最后经可见光 CCD 相机记录下来.

整个谱仪的三狭缝阵列、三平面镜组合、滤片包以及条纹相机光阴极均要求很高的定位精度,其中三个平面镜和成像狭缝的定位是整个系统调整的关键,由于平面镜反射光线的目标是 X 射线条纹相机的光阴极狭缝,所以在目标靶点和条纹相机光阴极的位置确定的情况下,三平面镜在立体空间的位置基本上是唯一的,因此三平面镜的定位调整机构是六向精细调整,为了采用狭缝或者针孔成像,必须利用高分辨的长焦显微望远镜作调整观测基准,图 3 是平面镜的六向精细调整装置照片.

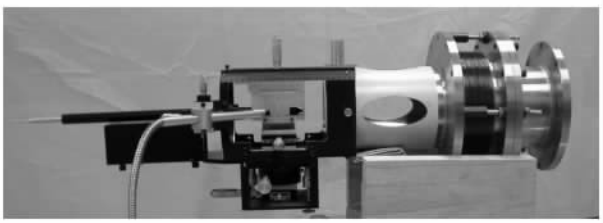

图 3 谱仪平面镜调整安装机构

2.3. 谱仪设计参数和指标

研制的时间分辨三通道软 X 射线光谱仪平面镜/滤片组合参数如表 1.

表 1 平面镜-滤片组合参数

中心能点/eV	平面镜类型	掠射角度/(°)	滤光片材料	滤片质量厚度/(μg/cm²)
210	碳	5	碳	438
420	镍	5	钛	333
900	金	3	锌	880

配接在谱仪上的条纹相机为国内目前性能指标最好的 X 射线条纹相机之一，其指标如表 2.

研制的三通道能谱仪的机械调整定位达到的指标见表 3.

表 2　X 射线条纹相机指标

时间分辨(0.5%全屏扫描时间)/ps	光阴极类型	光阴极有效长度/mm	光阴极响应能区/keV	标称空间分辨/(lp/mm)
50—10	CsI	28	0.1—20	15

表 3　谱仪机械定位指标

平面镜掠射角定位精度/(°)	狭缝成像空间放大倍数	成像狭缝定位精度/μm	条纹相机变像管轴心线和水平交角/(°)	条纹相机光阴极到目标靶点距离/mm
±0.02	3.3—10(可调)	±20	3	1100

3. 实验结果

3.1. 考核实验 1

利用神光Ⅱ高功率激光器对谱仪进行了实验考核，实验时，神光Ⅱ八路 0.35 μm 三倍频激光从腔靶的两端入口注入，每路 260 J，我们的测量目标是腔靶的一个入射口，从图示方向观测，入射口大小约为 190 μm，按照预先的估计，这个目标 X 射线 210 eV，420 eV 和 900 eV 三个能区的发射起始时间应该基本一致，或者只有很微小的差别[3]. 图 4 给出了该项考核实验排布和实验结果典型扫描图像.

通过对腔靶入射口多发测量，研制的谱仪均测到理想的三能道扫描信号，三能道图像清晰，空间和时间分辨均符合预想的要求，由于我们是考核实验，没有为这种诊断方法准备专门的靶型，比如一种腔内有泡沫输运管的靶型，如果是采用这种专门的输运靶型，将会看到三能道信号出现的起始时刻是不一样的，相互之间会有一定的延迟[4]，这种现象也是这种谱仪研制意义之一.

3.2. 考核实验 2

考核实验同样在神光Ⅱ高功率激光器打靶实验中进行，实验时，八路激光空间均匀轰击直径为 400 μm 的金球靶，每路激光 260 J，每路焦斑约 200 μm，研制的谱仪在水平正对方向测量三能道信号，实验排布示意和三能道测量结果如图 5 所示.

从实验扫描图像上可以看出谱仪不仅甄别出了球靶辐射 X 射线的三能道信号，而且狭缝成像的一维空间分辨也很好地反应在图像上，加上扫描时间分辨，达到了时、空、能同时测量的实验目的.

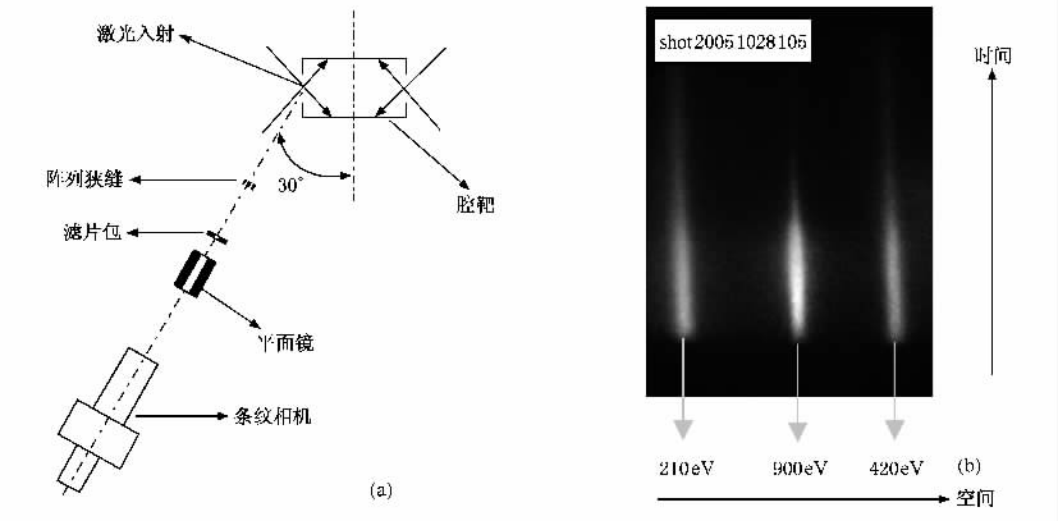

图 4　时间分辨三通道能谱仪实验排布及典型扫描图像(诊断目标为八路激光(每路 260 J)注入的腔靶入射口，激光波长 0.35 μm，脉宽 800 ps，条纹相机光阴极到靶 1.1 m，阴极材料为 1000 Å 的 CsI，阴极衬底为 1000 Å 的 parylene-N(C_8H_8)，每道空间放大倍数 5.7 倍)　(a) 实验排布图；(b) 实验扫描图像

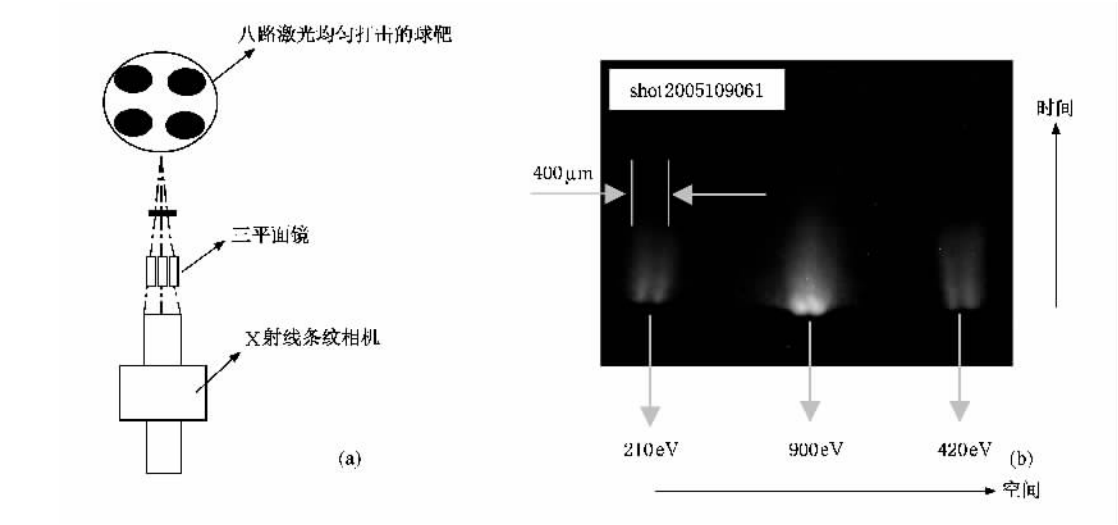

图 5 时间分辨三通道能谱仪实验排布及结果(诊断目标为八路激光轰击的金球靶,球靶直径 400 μm,每道空间放大倍数 9 倍) (a) 实验排布图;(b) 实验扫描图像

4. 结 论

从取得的实验结果分析,研制的时间分辨三通道软 X 射线光谱仪是成功的,其主要优势是时间分辨很高,并可同时进行时间、空间(一维)和能量分辨,它的核心技术在于多道平面镜、成像元件的精确定位方法以及掠入射平面镜的制备和精密组装,通过改变平面镜的类型和掠入射角度,并选取合适的滤光片,也可在亚千电子伏能区内甄别出任意能区信号.谱仪除了应用于激光聚变领域辐射输运、辐射场特性等实验研究,在软 X 射线范围内,需要测量高时间分辨单能信号的实验研究,均可采用这种方法,该谱仪的缺点是谱分辨本领还不够高,随着我国 X 射线多层镜制备技术的完善,今后的延续性工作是采用 X 射线多层镜取代单质平面镜,这样可获得更高的能谱分辨[5],加上 X 射线条纹相机的高时间分辨,这将是一种理想的时、空、能诊断系统.

[1] Sun K X, Yi R Q, Yang G H *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1099 (in Chinese) [孙可熙、易荣清、杨国洪等 2004 物理学报 **53** 1099]

[2] Stradling G L, Attwood D T, Kauffman R L *et al* 1983 *IEEE Journal of Quantum Electronics*. **19** 609

[3] Stradling G L 1981 *A soft X-ray streak camera for laser fusion applications* (MS dissertation) p66

[4] Jiang S E, Sun K X, Zheng Z J *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3413 (in Chinese) [江少恩、孙可熙、郑志坚等 2004 物理学报 **53** 3413]

[5] Sun J W 2003 *High Temperature Plasma X-ray Spectroscopy* (Beijing: National Defence Industry Press) p253 (in Chinese) [孙景文 2003 高温等离子体 X 射线谱学(北京:国防工业出版社) 第 253 页]

A time-resolved three-channel soft X-ray spectrometer*

Hu Xin[1)†]　Jiang Shao-En[1)]　Cui Yan-Li[1)]　Huang Yi-Xiang[1)]　Ding Yong-Kun[1)]　Liu Zhong-Li[1)]
Yi Rong-Qing[1)]　Li Chao-Guang[1)]　Zhang Jing-He[2)]　Zhang Hua-Quan[3)]

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

2)(*Department of Fine Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*)

3)(*Institute of Machine Building Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621900, *China*)

(Received 13 February 2006; revised manuscript received 9 March 2006)

Abstract

Developing of a time-resolved three-channel soft X-ray spectrometer is reported, and the operating principle and the parameters of spectrometer designed in three energy bands of 210eV, 420eV and 900eV are presented specially. On the ShenGuang-Ⅱ high power laser facility, the spectrometer was applied in experiments with good results. This work is the first attempt in China to construct a spectrometer which couples planar mirrors and filters to X-ray streaked camera, and which is capable of measuring X-ray signal with spatial- and temporal-resolution in three sub-Kev energy channels simultaneously. Experimental results show that by combining X-ray reflector and filter, the spectrometer has achieved enery resolution of 5 and temporal resolution ability of 10 ps.

Keywords: soft X-ray streak camera, planar mirror, filter, grazing incidence

PACC: 5270, 0660J, 7870D

* Project support by National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-804-3).

† E-mail: huxin88@21cn.com