

# 掠入射平场光栅谱仪消级次重叠技术的实验研究

李儒新 范品忠 陆培祥 陆海鹤 周锦智  
张正泉 徐至展 欧阳斌 刘亚青

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

利用掠入射反射短波截止原理,成功地实现了平场光栅谱仪的无级次重叠摄谱.实验结果表明,利用该方法来消除平场光栅谱仪中短波长的高级谱对所考察波段的一级谱的影响是简便而有效的.实验获得了镁激光等离子体在 4.4~5.6 nm, 5.9~11.8 nm, 7.0~14.0 nm 三个不同波段的近似的纯一级谱.

**关键词** 消级次重叠, 平场光栅谱仪, 软 X 射线光谱.

## 1 引 言

平场光栅谱仪是近年发展起来的用于极紫外和软 X 射线波段范围的光谱诊断设备<sup>[1]</sup>. 由于其独到的优点——在一个平直的焦面上形成所谓“平场光谱”,解决了与具有平直接收表面的探测器的联接问题,再加上由前置光学成像系统带来的空间分辨能力<sup>[2]</sup>和较高的谱分辨能力及接收效率,平场光栅谱仪已成为各大实验室进行 X 射线激光实验研究的主要诊断设备.

然而,平场光栅谱仪与罗兰圆光栅谱仪不同,短波长辐射的高级次光谱影响很大,特别是常用的 1200 l/mm 的变间距光栅<sup>[3]</sup>,甚至有高达 12 级次的光谱被记录下来,这就造成了谱线级次的严重重叠,谱线容易混淆,干扰了谱线的辨认这对 XUV 光谱研究和 X 射线激光的实验诊断都是极为不利的,因此,消除平场谱仪的级次重叠,获得近似“纯粹”的一级谱或高级谱,是十分迫切和必要的,这对改善平场光栅谱仪提高谱仪诊断能力,意义很大.

在经典的光谱技术中常采用前置附加色散元件构成双色散结构来消除光谱的级次重叠<sup>[4]</sup>. 这对工作在可见或紫外波段的光谱仪是十分有效的.但在软 X 射线区域,各光学元件的效率剧减,若采用双色散结构,效率太低且机构过于复杂而不实用.利用平面反射镜的掠入射反射短波截止原理实现的消级次重叠,则是一种简便而有效的方法.英国卢瑟福实验室利用该技术,在碳的吸收谱测量中成功地消除了 2.5 nm~5.0 nm 范围的高级次光谱对 12.0 nm~18.0 nm 光谱区的影响<sup>[3]</sup>.

本文报道了采用了一种更为简单的仪器排布结构,利用上述原理,针对自行研制的掠入射平场光栅谱仪实现消级次重叠拍谱的实验结果.对实验结果进行了初步分析,最后对进一步的实验安排作了简介.

## 2 实验原理与装置

对于软 X 射线,介质的复折射率的实部一般稍小于空气中的折射率值.因此,当满足一定的入射条件时,软 X 射线从真空(光密媒介)向介质(光疏媒质)传播时会发生全反射现象.发生全反射的临界角与入射波长及介质的电子数密度等参数有关<sup>[5]</sup>.对于给定的反射介质,不同波长的辐射对应不同的临界角,因此采用不同的掠入射角,即可使不同波段的辐射被“截止”,即滤除短波,那么短波长的高级谱也就随之消失了.

本文采用的消级次重叠技术正是基于上述原理;利用掠入射反射镜来滤除高级谱.反射镜材料的选择是个关键,它要满足:当波长大于截止波长时,掠入射反射率要足够大,使谱仪保持较高的效率;当波长小于截止波长时,掠入射反射率的下降要足够快,使短波滤除的效果明显.经分析比较,实验选择了以 K9 玻璃为基底的镀金平面反射镜,镀金反射镜的反射率随入射波长和掠入射角的变化关系可由菲涅尔公式得出,计算中采用的金的光学常数取自文献<sup>[6]</sup>,结果如图 1 所示.

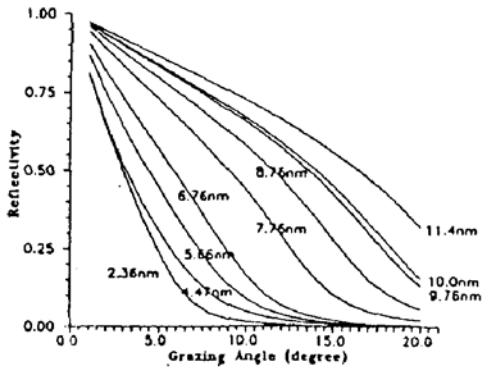


Fig. 1 The reflectivity of a gold mirror for unpolarised soft X-ray wavelength at different grazing angles

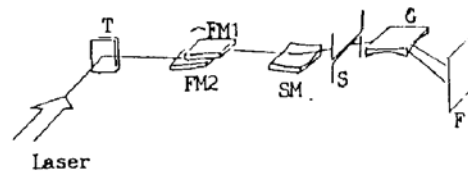


Fig. 2 Schematic set-up of the experiment for eliminating high order spectrum

实验采用的消级次重叠滤波机构和平场光栅谱仪的联接如图 2 所示.

其中  $FM_1$  和  $FM_2$  为相互平行放置的镀金平面反射镜,构成滤波装置. $SM$  为球面反射镜, $S$  为谱仪狭缝, $G$  为 1200 1/mm 的变间距光栅, $F$  为接收底片. $SM, S, G, F$  构成基本的平场光栅谱仪,其相对位置关系和结构参数见文献<sup>[2]</sup>.与单反射镜相比,双反射镜结构的滤波效果更好<sup>[3]</sup>,而且,不转折系统光路,只有很小的平移,使滤波机构与谱仪的联接调整非常方便.通过计算确定  $FM_1$  和  $FM_2$  的相对位置参数,便得该滤波机构具有较大的通光口径,同时确保所有入射光在平面镜的入射角偏差不超过  $0.8^\circ$ ,以使反射率变化不大.双平面镜系统的角度可以方便地精确调整(精度可达  $0.1^\circ$ ),使得入射光的掠入射角可在大范围内连续可变(在本实验结构参数下,掠入射角在  $2^\circ \sim 30^\circ$  范围内可调).

实验是在上海光机所 115# 高功率钕玻璃激光装置上进行的.采用的靶材为表面经过抛光的镁平板靶.能量约为 20 J,脉宽 150~200 ps 的  $1.06 \mu\text{m}$  激光经过一个  $f/2$  非球面镜会聚到靶面上,形成点状镁的激光等离子体.实验所用的记录底片为无保护层的上海医用 5FX 光底片.由于底片灵敏度的限制,采用累积能量打靶,正常打靶两次,即可获得一张清晰的光谱照片.实验中控制每次打靶能量偏差在 1.0 J 以内.底片经 D-76 显影液显影,显影时间和温度严格控制,误差分别为 1 sec 和  $0.1^\circ\text{C}$ .谱线的位置和黑度是用 MP-3 型显微光度计处理实验所得的光谱照片而得出的.

### 3 结果与讨论

图 3 所示的是在不同的平面反射镜的掠入射角条件下分别得到的镁等离子体发射光谱的扫描曲线. 其中图 3(a)是未加双平面反射镜时得到的光谱(根据谱仪的位置参数可计算出对于球面镜 SM 的掠入射角约为  $2.8^\circ$ , 而对光栅的掠入射角则为  $3^\circ$ <sup>[2]</sup>, 图 3(b)和图 3(c)是加上双平面反射镜后分别对应于双平面镜的掠入射角为  $7^\circ$  和  $11^\circ$  得到的光谱. 实验中, 球面镜和光栅的掠入射角保持不变. 图 3 中已对一些较强的谱线作了辨认, 这些谱线主要属于  $Mg^{5+}$ ,  $Mg^{6+}$ ,  $Mg^{7+}$ ,  $Mg^{8+}$  离子发射谱的一级和高级光谱, 也有一些其他电离阶离子的光谱. 对比图 3 的 (a), (b) 和 (c), 可以发现, 这些谱线的相对强度和结构均有很大的变化. 显然这种差异是由于加上双平面镜及对应的掠入射角的改变而导致的, 说明了双平面镜的滤波效果. 相应于短波长辐射不同程度的衰减和截止, 它们的高级谱也就衰减乃至消失, 使得原来与短波长高级谱重迭的长波长一级谱逐渐显露出来, 不同程度地消除了级次重迭的影响, 有利于谱线的准确辨认. 例如图 4 中的谱线 1', 2', 3', 4' 和 5' 分别是 5.91 nm, 6.48 nm, 6.85 nm, 7.11 nm 和 7.59 nm 的二级谱, 加上双平面反射镜之后, 随着掠入射角的增大, 从图 4(b)过渡到图 4(c), 这些二级谱逐渐变弱, 最后淹没在本底中. 波长为 12.97 nm 的  $Mg^{4+}$  离子发射光谱谱线位置恰与 2' 重合, 当 2' 被衰减之后, 12.97 nm 的谱线也就消除了与高级次谱线的级次重迭, 成为近似纯率的一级谱. 限于篇幅, 其它波长的消级次重迭情况, 在此不一一说明了.

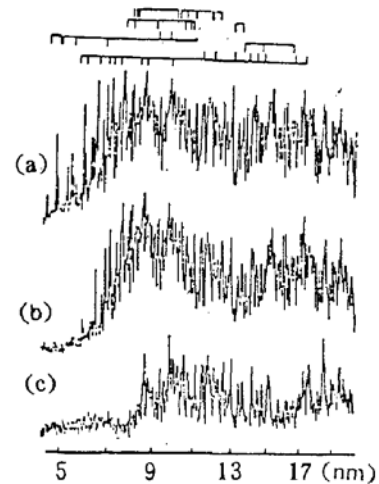


Fig. 3 Microdensitometer traces of Mg spectrum (a) without FM1 and FM2 (b) with FM1 and FM2 at  $7^\circ$  grazing angle. (c) with FM1 and FM2 at  $11^\circ$  grazing angle

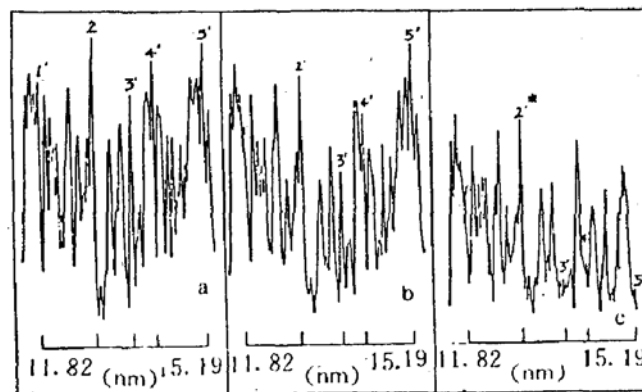


Fig. 4 Microdensitometer traces of Mg spectrum showing the effect of eliminating high order spectrum. (a) without FM1 and FM2. (b) with FM1 and FM2 at  $7^\circ$  grazing angle. (c) with FM1 and FM2 at  $11^\circ$  grazing angle

这样,通过前置的双平面镀金反射镜,使平场光栅谱仪获得了三个不同波段的不同程度地消除了高级谱干扰的近似的纯一级谱.当然上述讨论是基本定性的观察,定量的结果需要底片的标定数据,这方面的工作正在进行中.从定性角度看,图 3(b)中从 5.9 nm 到 11.8 nm 范围可看成纯一级谱,不含其它短波长高级谱的影响.图 3(c)中从 7.0 nm 到 14.0 nm 的谱线也可看成纯一级谱.同理,未加上平面镜时,由于球面镜和光栅的滤波作用,可以认为图 3(a)中从 4.4 nm 到 5.6 nm 也是一级谱.可见,通过简单地改变平面反射镜的入射角,就可获得不同波段的一级光谱,基本上消除了级次重叠现象,改善了谱仪的性能.

若当平面反射镜的掠入射角为  $g$  时,双平面镜对波长为  $\lambda$  的软 X 射线的总反射率为  $T(\lambda, g)$ ,则可定义消除因子如下<sup>[3]</sup>:

$$R_c(\lambda, g) = T(\lambda, g)/T(\lambda/2, g) \quad (1)$$

显然要达到满意的滤波效果,必须兼顾  $R_c(\lambda, g)$  和  $T(\lambda, g)$ .从图 3 和图 4 可得到定性的结论:本实验中  $R_c(\lambda, g)$  和  $T(\lambda, g)$  的折衷还是较成功的,即在保持谱仪效率的前提下,又取得较好的滤波效果(根据底片在低曝光量时,强度和底片黑度的近似线性关系,可以推算出加上双平面反射镜后,当掠入射角分别为  $7^\circ$  和  $11^\circ$  时,12.0 nm 附近的谱线强度大约下降了 35% 和 70%).

由于在软 X 射线区域,反射率对表面粗糙度极为灵敏,因而研究表面粗糙度对滤波效果的影响十分有趣.但由于实验条件所限,实验未对所使用的双平面反射镜的表面粗糙度进行测量.文中给出有关计算分析结果,供进一步实验参考.利用反射率与粗糙关系的简单关系<sup>[7]</sup>:

$$R_c = R_0 \exp[-(4\pi\delta\cos\theta/\lambda)^2] \quad (2)$$

式中  $R_0$  为理想光滑表面的反射率,  $\delta$  为表面均方根粗糙度,  $\theta$  为入射角,  $\lambda$  为入射波长.计算了  $\theta = 83^\circ$  (对应于 (1) 式中  $g = 7^\circ$ ),  $\lambda$  为 10.0 nm 时的  $R_c(\lambda, g)$  和  $T(\lambda, g)$  随  $\delta$  变化的曲线,如图 5 所示.可见,与对反射镜表面质量的常规要求不同,在消级次重叠技术中,适宜的粗糙度,将使滤波效果更为理想.例如,对上述波长和入射角,当  $\delta$  为 7.0 nm 左右时,  $R_c$  和  $T$  获得较好的折衷,使反射镜对  $\lambda/2$  的二级谱的截止效果较好.

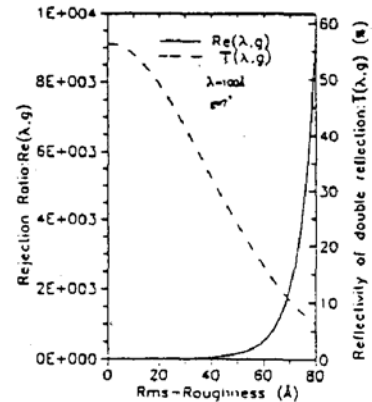


Fig. 5 A graph showing the rejection ratio:  $Re(\lambda, g)$  and reflectivity from double gold reflection against surface roughness

## 4 结 论

- 1) 建立了低通滤波机构,在一定波长范围里,成功地实现了掠入射平场光栅谱仪的无级次重叠拍谱.
- 2) 获得了镁激光等离子体在 4.4~5.6 nm, 5.9~11.8 nm 和 7.0~14.0 nm 三个不同波段的近似的纯一级光谱.
- 3) 讨论了平面镜质量对消级次重叠效果的影响.

本文作者衷心感谢 115# 装置运行组的大力协助,还要特别感谢十室殷功杰同志的有益讨论.

## 参 考 文 献

- [1] Noboru Nakano, Hiroto Kuroda, Toshiaki Kita *et al.*, Development of a flat-field grazing-incidence XUV spectrometer and its application in picosecond XUV spectroscopy, *Appl. Opt.*, 1984, **23**(14):2386~2392
- [2] 范品忠,张正泉,周锦智等 消像散掠入射平场光栅谱仪及其在等离子体 XUV 光谱诊断中的应用. *光学学报*, 1992, **12**(2):118~122
- [3] S. J. Davidson, D. Neely, C. L. S. Lewis *et al.*, Recent advances in the technique of point projection spectroscopy, 13~16  
C. L. S. Lewis, D. Neely, A. R. Damerell, Reflection filtered optics designed to eliminate higher orders on the R. A. L. flat-field soft X-ray spectrometers, *Rutherford Appleton laboratory Annual Report to the Laser Facility Committee*, 1990, 73~77
- [4] H. E. Blackwell, G. S. Shipp, M. Ogowa *et al.*, properties of a plane grazing predisperser used with a grazing incidence vacuum spectrograph, *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(5):665~674
- [5] James A. R. Samson, *Technique of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*, John Wiley and Son, Inc., 1967, 35~36
- [6] David L. Windt, Webster C. Cash Jr., M. Scott *et al.*, Optical constants for thin films of C, diamond, Al, Si and CVD Sic from 2.4 nm to 121.6 nm, *Appl. Opt.*, 1988, **27**(2):279~295
- [7] Mihiro Yanagihara, Michio Niwano, Tsuneharu Toide *et al.*, Soft X-ray reflection from SiC, TiC, and WC mirrors, *Appl. Opt.*, 1986, **25**(24):4586~4590

### Experimental research on eliminating spectral order overlapping in grazing incidence flat-field grating spectrometer

LI Ruxin    FAN Pinzhong    LU Peixiang    LU Haihe    ZHOU Jinzhi  
ZHANG Zhengquan    XU Zhizhan    OUYANG Bin    LIU Yaqing

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Shanghai 201800)

(Received 30 April 1992)

#### Abstract

The performance of double reflecting mirrors as a reflection filter used with a grazing incidence flat-field grating spectrometer has been experimentally investigated. We have achieved "pure" first-order spectrum of Mg laser-produced plasma in some spectral regions. The result shows that the double mirrors reflection filter is very simple and useful to eliminate order overlapping in grazing incidence flat-field grating spectrometer.

**Key words** eliminating order overlapping, flat-field grating spectrometer, soft-X-rays spectrum.