

软 X 射线晶体谱仪

范品忠

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

E. Fill

(Max-Planck Institut für Quantenoptik, 85748, Garching)

关铁堂

(福州大学化学系, 福州 350002)

摘 要 描述了用于激光等离子体软 X 射线光谱学研究的长波晶体谱仪。用具有大晶格常数的晶体(OHM, $2d = 6.35$ nm), 极薄的滤片和对软 X 射线灵敏的底片, 获得了波长达 5.8 nm 的激光等离子体软 X 射线光谱。同时还给出了实验测定的谱仪光谱分辨率。

关键词 软 X 射线光谱学, 软 X 射线分光晶体, 激光等离子体。

1 引 言

平面晶体谱仪, 包括天然和人工生长晶体, 由于其结构简单, 操作方便和低成本, 已成为许多实验室激光等离子体研究的日常诊断工具^[1]。与光栅谱仪相比, 很明显, 平晶谱仪的优点不仅结构简单, 使用方便, 而且效率高; 特别对于短波长, 这时光栅谱仪为提高光栅的反射率, 一般采用掠入射形式——这极大地降低了谱仪的接收效率。同透射光栅、L-B 皂膜假晶体和最近研制成的多层器相比, 其光谱分辨率也要高得多。

用各种晶体谱仪, 人们已获得十分丰富的激光等离子体高价离子光谱, 如许多元素的 K , L 和 M 光谱, 并用这些光谱来进行激光等离子体状态(电子温度和电子密度)的诊断。但以前的工作仅限于 2 nm 以下的波长范围。其原因, 或者是缺乏大晶面间距的可用晶体, 或者是没有合适的滤光片以便在长波 X 射线区获得高的透过率并挡住可见光, 或者是缺乏长波灵敏的软 X 光底片。最近作者结合福州大学晶体组研制成功的大面积可用的 OHM 晶体 ($2d = 6.35$ nm), 慕尼黑技术大学提供的极薄的碳滤光片(310 nm)和软 X 射线底片(SIOFM-5FW), 成功地获得了激光等离子体长波软 X 射线光谱。这使用晶体谱仪研究激光等离子体长波 X 射线光谱成为可能。这种晶体谱仪可用来研究低 Z 元素 $n \rightarrow 1$ 跃迁的 K 光谱(B, C, N, O 等), 类 Li 至类 Ne 离子 $n \rightarrow 2$ 跃迁的 L 光谱(Na, Mg, Al, Si, P; K, Ca, Se, Ti 等)和类 Na 离子 $n \rightarrow 3$ 跃迁的 M 光谱(Fe, Co, Ni, Cu, Zn 等)。特别应提及的是能用该谱仪研究 X 射线激光领域所熟知的“水窗”2.38 nm~4.36 nm 光谱。本文叙述了该长波软 X 射线晶体谱仪, 获得的长波软 X 射

线光谱以及实验测定的谱仪光谱分辨率。

2 晶体谱仪

所用谱仪如图 1 所示。该谱仪的结构为等腰直角三角形。晶体位于等腰直角三角形的底边上，而底片和入射窗口分别位于两直角边上。因此晶体表面(C)与底片平面(F_m)间的夹角 α 为 45 度，这对谱仪与光源间的准直带来不少方便。入射窗为一长度为 24 mm 宽度可变(从 0 到约 2 mm)的狭缝(S1)。挡可见光的滤光片(F_t)藏在入射窗口内，其支架与窗口之间有较大的通道(室内光线在底片上产生的背景很弱)，以利于谱仪内部的抽空和减少激光等离子产生的冲击波对薄滤片的冲击破坏。谱仪整体能绕一垂直于纸面的轴转动。这样能改变入射角的范围，亦即所能获得光谱的波长范围。晶体没有底边那么长，所以能沿底边移动，这样也能改变入射角的范围。拍谱结束后，整个谱仪从靶室取出，在暗室中装取底片。

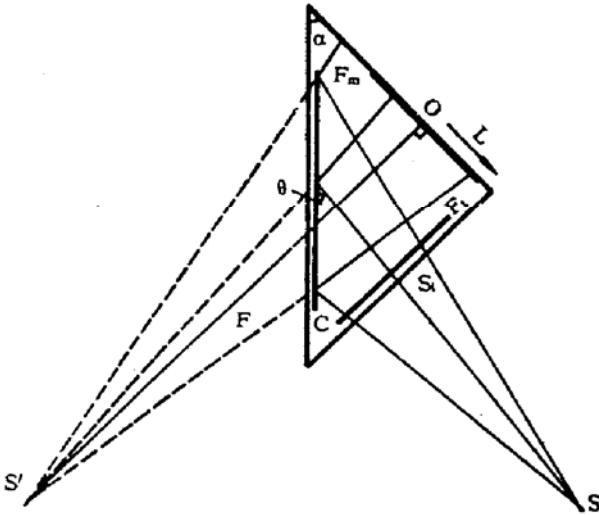


Fig. 1 Schematic of the flat crystal spectrograph

OHM 晶体由福州大学提供。对(001)衍射平面，晶格常数 $2d = 6.35 \text{ nm}$ ，对 $\text{CuK}\alpha$ 线，测得峰值反射率 $P = 64.1\%$ ；晶体的摆动曲线半宽度 $\Delta\theta$ 为 $148.4'' \approx 7.2 \times 10^{-4} \text{ rad}^{[2]}$ 。由此推得积分反射率约为 5×10^{-4} 。

所用滤光片为 310 nm 厚的碳膜，由慕尼黑技术大学提供。该滤膜在碳吸收边长波边有较高的透过率；在短波边透过率也在 20% 以上。这种滤光片可以用在 17 nm 以下的光谱范围并挡去可见光。所用底片为 SIOFM-5FM，这是一种无保护层底片，在软 X 射线光谱区，除碳吸收边 4.36 nm 外，有较高的灵敏度和较高的动态范围。虽然这种无保护层底片表面很易受到损伤，如划痕等，但能在暗红灯光下操作，这大大减少表面受损的机会。

对于平晶谱仪，有布拉格公式：

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

其中 λ 为入射波长， θ 为布拉格角， d 为晶面间距，和

$$L = -F \text{ctg} [\alpha + \sin^{-1}(\lambda/2d)] \quad (2)$$

其中 L 为谱线在底片上的位置^[3,4]，当 $\alpha + \sin^{-1}(\lambda/2d) = 90^\circ$ 时， $L = 0$ 。 $F = \overline{S'O}$ 为光源在晶体中的虚像至底片平面的距离(见图 1)。若 α 和 $2d$ 已知，则从两条已知波长 λ_1 和 λ_2 谱线的相对位置 $\Delta L = L_2 - L_1$ ，从(2)式就能获得：

$$F = \Delta L / [\text{ctg}(\alpha + \theta_1) - \text{ctg}(\alpha + \theta_2)] \quad (3)$$

由(2)式可以推得线色散倒数

$$\Delta\lambda / \Delta L = (2d/F) \sin^2(\alpha + \theta) \cos \theta \quad (4)$$

和光谱分辨率

$$\lambda / \Delta\lambda = (F/\Delta L) \text{tg} \theta / \sin^2(\alpha + \theta) \quad (5)$$

图 2 给出了 $\alpha = 45^\circ$ 时， $\sin^2(\alpha + \theta) \cos \theta$ 随 θ 变化曲线，即相对线色散倒数曲线。从图可以看出在 $\theta = 30^\circ$ 时达极大值。当 θ 趋近 90° 时，该值很快下降，即谱仪的线色散很快增加。当然谱

仪的线色散和分辨率都随 F 增加而增加。

3 实 验

实验在马普学会量子光学所(MPQ)高功率玻璃激光器上进行, 该激光装置的二倍频($\lambda = 532$ nm)输出能量为 10 J, 脉宽为 3 ns。打靶聚焦透镜 $f = 350$ mm, $\varphi = 60$ mm。聚焦焦斑直径约为 100 μm , 因此靶面功率密度可达 4×10^{13} W/cm²。但 X 射线源的尺度与靶材料有关。一般低 Z 靶产生较大的源尺寸, 高 Z 靶产生较小的源尺寸。

谱仪观察方向几乎与入射激光轴(即靶面法线方向)成 90° 。为减少源尺寸对谱线宽度的影响, 谱仪窗口中心离靶点最远达 15 cm(这时底片至靶点的距离约为 22 cm)。即使如此, 仍然存在源尺寸对谱线宽度的影响, 尤其是低 Z 靶材。为此有少数几发采用针状靶以减少源尺寸的影响。

实验中, 谱仪入射窗口的宽度约为 400 μm , 获得的光谱线高度约 1 mm。在真空靶室外能控制谱仪沿靶面法线方向作平移。实验中, 激光靶点固定不变, 每打一发, 使谱仪作 1 mm 平移, 这样就能在不破坏真空的条件下在同一底片上获得许多条光谱。当然由于谱仪相对靶点有位移, 这些光谱的谱仪参数(如 F 值)稍有不同^[3]。但由于打靶透镜焦距较长, 激光聚焦精度能保证发与发之间靶点位置的变化不会超过 50 μm , 因此谱仪参数变化是很小的。当然也可以固定谱仪不动, 将几发相同靶材的曝光叠加以增加曝光量, 或将不同靶材的几发曝光叠加以比较不同靶材料光谱线波长。

曝光的底片用 D-19 显影液显影; 光谱由 Joyce-Loebl 3CS 显微密度计扫描和处理。

4 实验结果

利用上述平晶谱仪, 在几个不同 F 值条件下获得了 Mg、Al、Si、Cu、BN(Boron Nitride)、NaCl 以及聚四氟乙烯等靶材料的光谱。图 3 给出了所获得的 Mg、Si 类 Li 光谱和 Cu 的类 Na 光谱。能获得的最长波长已达 5.8 nm (Mg X5.7876 nm Mg X 5.7920 nm)。L 光谱的许多双重谱线已能明显分开, 如 Si XII 4.4021 nm 和 4.4165 nm Al XI 5.2299 nm 和 5.2446 nm 和 Cu XIX 4.7340 nm 和 4.7445 nm。由这些能分开的双重线, 获得最高光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 450$ (Cu XIX 4.7340 nm 和 4.7445 nm)。

在 F 值较小时, 虽然能获得较大的光谱范围, 但谱仪的分辨受到源加宽的严重影响。为减少源加宽的影响, 将 F 增加至 170 mm, 能分开 Mg X 4.7231

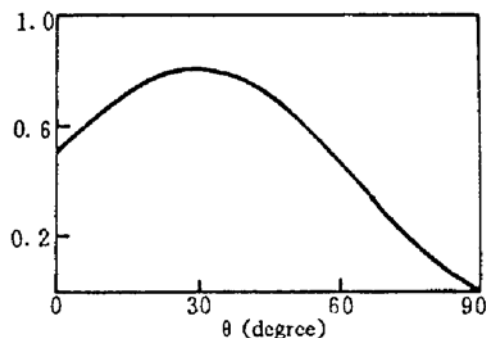


Fig. 2 $\sin^2(\alpha + \theta)\cos\theta$ versus θ

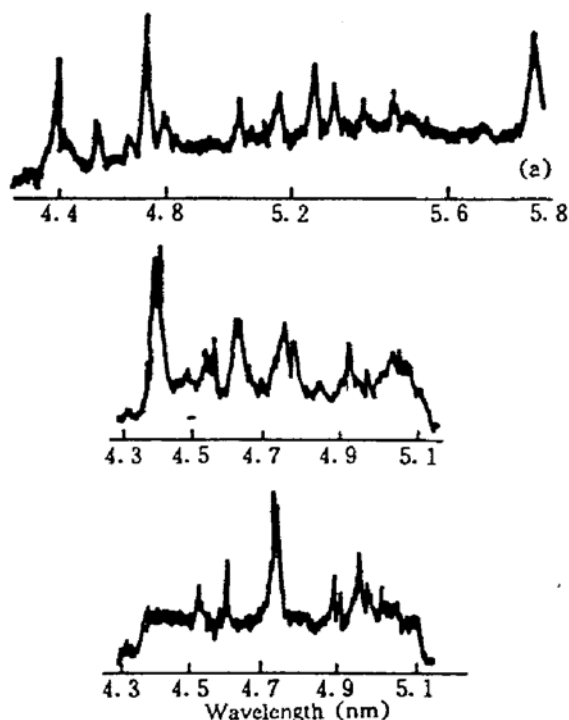


Fig. 3 Long wavelength soft X-ray spectra (a) magnesium spectrum; (b) silicon spectrum; (c) copper spectrum

nm 和 4.7310 nm。这时 $\lambda/\Delta\lambda = 600$ 。

为进一步减少源加宽的影响,作者曾试过针状靶。在用针状 Mg 靶(靶面尺寸约为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$)获得的光谱中, Mg X 4.7231 nm 和 4.7310 nm 已明显分开。

光谱分辨率也能用光谱中最窄谱线宽度来估算。在 Cu 的光谱中在 4.9 nm 附近发现一条最窄的谱线,其黑度值半宽度约为 0.2 mm,由对应的 $\Delta\lambda/\Delta L = 0.0231\ \text{nm/mm}$ 获得 $\Delta\lambda = 0.0046\ \text{nm}$ 。由此可以得到 $\lambda/\Delta\lambda = 1065$ 。

利用该谱仪已进行了共振光激发 X 射线激光方案中的泵浦谱线波长与吸收谱线波长重合研究。重合实验研究的谱线对为:

Si XII	2p-3d	4.402 nm	Cu XIX	3d-4f	4.7340 nm	Al XI	2s-3p	4.8338 nm
Mg X	2s-4p	4.405 nm	Mg X	2p-4d	4.7310 nm	Mg IX	2s-2s4p	4.834 nm

其结果将另文发表。

作者衷心感谢 Mr. A. Böswald 在激光装置运行和 Mr. Folsnter 在靶的制备方面的帮助和支持,范品忠对 Max-Planck-Gesellschaft 的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] V. A. Boiko, A. Ya. Faenov, S. A. Pikuz, X-ray spectroscopy of multiply-charged ions from laser plasmas. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1978, 19(1): 11~50
- [2] 关铁堂, 软 X 射线分光晶体马来酸轻十八脂. *光学学报*, 1991, 11(4): 353~355
- [3] 范品忠, 张正泉, X 射线平晶谱仪色散曲线和波长的确定. *中国激光*, 1991, 18(2): 88~93
- [4] 张正泉, 范品忠, 赵世诚等, 激光产生的钴等离子体 X 射线发射光谱. *光学学报*, 1987, 7(4): 324~334

Soft X-Ray Crystal Spectrograph

Fan Pinzhong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

E, Fill

(Max-Planck Institut für Quantenoptik, 85748 Garching, Germany)

Guan Tietang

(Department of Chemistry, Fuzhou University, Fuzhou 350002)

(Received 18 July 1994; revised 29 August 1994)

Abstract In this paper, the crystal spectrograph used to investigate long wavelength soft X-ray spectroscopy of laser-produced plasmas was described. The laser plasmam soft X-ray spectra with wavelength up to 5.8 nm have been taken by using OHM crystal ($2d = 6.35\ \text{nm}$), combining with very thin carbon filter (310 nm in thickness) and soft X-ray sensitive film (SIOFM-5FW). The measured spectral resolution of the spectrograph was also given.

Key words soft X-ray spectroscopy, soft X-ray analysis crystal, laser-produced plasmas.