

软 X 射线分光晶体 KAP 的反射率特性*

熊先才¹ 钟先信¹ 段绍光¹ 肖沙里¹ 杨国洪² 高洁¹

(1 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要 弯晶谱仪是激光等离子体软 X 射线的有效诊断工具, KAP 是弯晶谱仪的分光晶体之一. 利用原子散射因子和结构因子分量, 以及镶嵌晶体模型计算 KAP 的积分反射率, 表明 KAP 的积分反射率与波长有关, 先随波长增大而减小, 后随波长增大而增大. 此外, 还计算了 KAP 的峰值反射率、半最大值宽度、能量宽度和能量分辨率, 表明峰值反射率和能量分辨率随波长增大而减小.

关键词 分光晶体; 积分反射率; 弯晶谱仪; 软 X 射线诊断

中图分类号 O721 **文献标识码** A

0 引言

激光核聚变产生大量的高温高密度等离子体, 从激光等离子体中辐射出大量的 X 射线, 这被认为是产生波长为 0.1 ~ 30 nm 软 X 射线的有效光源^[1]. 这种软 X 射线源能够用于光谱测量、等离子体诊断、X 射线光刻技术等. 通过光谱测量来诊断激光等离子体的状态, 如电子的温度和密度, 以前通常采用光栅谱仪. 为了提高光栅的反射率, 一般采用掠入射形式, 这极大地降低了谱仪的接收效率, 而且只能获得一维空间分辨的软 X 射线光谱, 测量的波长范围是 2 ~ 30 nm, 而晶体谱仪在测量波长范围为 0.1 ~ 2 nm 的软 X 射线方面应用较广^[2,3]. 我们目前正在研制的双通道椭圆弯晶谱仪(以下简称弯晶谱仪), 能够分析 0.2 ~ 2 nm 的激光等离子体软 X 射线, 覆盖的 Bragg 角是 30 ~ 67.5°, 空间和时间分辨率分别是 1000 和 20 ps. 该弯晶谱仪是将分光晶体弯曲成椭圆形, 这样可以将软 X 射线在空间上展得很开, 从而获得比平晶谱仪更高的空间分辨率. 除了在一个通道上用软 X 射线胶片或 X-CCD 作空间分辨测量外, 还在另一个通道上用软 X 射线条纹相机作时间分辨测量, 从而同时获得软 X 射线的空间和时间分辨率^[4]. 弯晶谱仪采用的分光元件是 LiF、PET、Mica 和 KAP 四种晶体, 由于分光晶体是弯晶谱仪的关键部件, 所以研究分光晶体的反射率特性对弯晶谱仪的设计和分析弯晶谱仪的传递效率具有重要的意义.

1 分光原理

软 X 射线源位于真空靶室的球心上(即椭圆的前焦点), 在软 X 射线掠入射到柱面镜上之后, 发生全反射并截止 0.2 nm 以下的波段, 然后通过光阑之后入射到椭圆晶体上发生衍射, 最后经滤光膜截止 2 nm 以上的软 X 射线并挡住杂散光, 同时通过狭缝(即椭圆的后焦点)到达软 X 射线胶片或 X-CCD 和 X 光条纹相机. 弯晶谱仪的光路安排如图 1 所示.

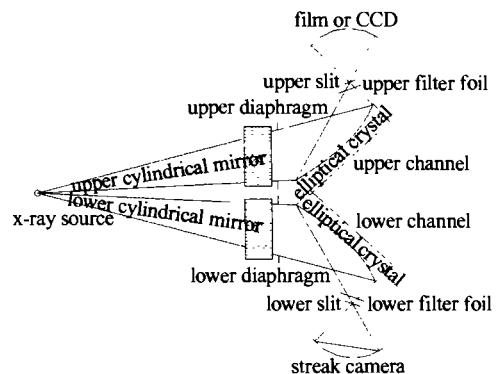


图 1 弯晶谱仪的光路布置
Fig. 1 Light path of curved crystal spectrograph

2 晶体测量的波长范围

当 X 射线入射到晶体上时, 晶体点阵中的原子(或离子)就成为子波的波源, 向各个方向发出散射波, 两列散射波经相互干涉后发生衍射. 根据 Bragg 衍射原理, 得到衍射明纹的条件是

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

式(1)中, d 是晶体的晶面间距, θ 是 Bragg 衍射角, m 是 Bragg 衍射级数, λ 是 X 射线的波长. 在弯晶谱仪的设计中, 使用一级衍射明纹, 即 $m = 1$, 则式(1)变成

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

由于弯晶谱仪覆盖的 Bragg 角是 30 ~ 67.5°, 利用式(2)计算出的四种晶体分别测量的软 X 射线波

* 国家 863 课题资助项目 (863-804-3)
Tel: 023-65103134 Email: xiongxiancai@163.net
收稿日期: 2003-02-28

长范围如表 1 所示.

表 1 晶体测量的波长范围

Crystal	hkl	2d /nm	Measured range of wavelength/nm
LiF	(200)	0.403	0.20 ~ 0.37
PET	(002)	0.874	0.44 ~ 0.81
Mica	(002)	1.984	0.99 ~ 1.83
KAP	(1010)	2.663	1.33 ~ 2.46

3 晶体的积分反射率

晶体具有镶嵌结构,即晶体由一些小块组成,小块的尺度为 100 nm 左右,每个小块都是理想的完整晶体.具有镶嵌结构的晶体,其衍射强度是各个镶嵌块衍射强度之和,积分衍射强度就是衍射的总强度^[5].X 射线入射到晶体上之后,在晶面上发生反射.但是,只有沿镜式反射方向反射的射线强度最大,满足 Bragg 条件时,就会发生衍射.根据原子物理学,影响晶体的积分反射率有原子散射因子和结构因子.

3.1 原子散射因子 $f_1 + if_2$

利用原子光吸收截面 μ_a 来计算原子散射因子分量 f_1 和 f_2 的散射公式^[6]如下

$$f_1 = Z + C \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon^2 \mu_a d\varepsilon}{E^2 - \varepsilon^2} \quad (3)$$

$$f_2 = (1/2) \pi C E \mu_a(E) \quad (4)$$

式中, Z 是原子序数, $C = (\pi r_0 h c)^{-1}$, r_0 是经典电子半径, h 是普朗克常数, c 是光速, E 是入射光子的能量, $\mu_a = (A/N_0) \mu_m$, μ_m 是质量吸收系数, A 是原子量, N_0 是阿伏加德罗常数.

式(3)中的不规则积分项,对整个低能 X 射线区域有重要价值.对电离极限附近的能量值 E 而言,它变得非常大(为负数).只有远离极限的高光子能量,才能把汤姆逊项作为对 f_1 较好的逼近.当非常接近吸收边时,即使 $\mu_a(E)$ 的极限变化是已知的, f_1 也不能用式(3)准确给出.其原因是在散射积分中,衰减效果被忽略了,而该衰减效果在极限处变得比较大.但是,在 0.2 ~ 2 nm 的软 X 射线能区,原子散射因子分量 f_1 和 f_2 能通过式(3)和(4)的散射关系,由光吸收截面 μ_a 唯一确定.

3.2 结构因子 $F_1 + iF_2$

KAP 属于酞酸盐晶体,分子式是 $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$, 软 X 射线在 KAP 上通过多分子层反射,其结构因子^[6]分量 F_1 和 F_2 , 分别由原子散射因子分量 f_1 和 f_2 计算.

$$F_1 = \sum_p x_p f_{1p} \cos \frac{2\pi m z_p}{d} \quad (5)$$

$$F_2 = \sum_p x_p f_{2p} \cos \frac{2\pi m z_p}{d} \quad (6)$$

式中, x_p 是在位置 z_p 处位于晶胞内的 p 类原子数, z_p 是晶胞的位置, f_{1p} 和 f_{2p} 分别是原子散射因子 f_p 的实部和虚部, m 是 Bragg 衍射级数, d 是晶格常数.

3.3 KAP 的积分反射率

根据镶嵌晶体模型^[6-8], 利用 KAP 的结构因子分量,可以得到 KAP 的积分反射率计算式

$$R_m = \frac{(r_0 \phi \lambda^2)^2}{16 \pi \beta} (F_1^2 + F_2^2) \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin 2\theta} \quad (7)$$

式(7)中, ϕ 是单位体积内的晶胞数, λ 是软 X 射线的波长, β 是光学常数, θ 是软 X 射线的 Bragg 衍射角, r_0 是经典电子半径, F_1 和 F_2 是 KAP 的结构因子分量.

利用式(7)计算出的 KAP 的积分反射率如表 2 所示.在表 2 中也列出了 KAP 的峰值反射率 P 、半最大值宽度 ω 、能量宽度 ΔE 和能量分辨率 $E/\Delta E$.

表 2 KAP 的 Bragg 反射率特性

E /eV	R_m /mr	P /(%)	ω /mr	ΔE /eV	$E/\Delta E$ /(%)	λ /nm
556.3	0.0583	2.06	1.80	0.65	856	2.23
572.8	0.0559	2.25	1.58	0.65	888	2.17
637.4	0.0524	3.11	1.07	0.64	1001	1.95
676.8	0.0523	3.75	0.89	0.63	1074	1.83
705.0	0.0533	4.29	0.79	0.63	1118	1.76
776.2	0.0573	5.97	0.61	0.63	1235	1.60
851.5	0.0633	8.32	0.48	0.63	1362	1.46
929.7	0.0695	11.15	0.39	0.63	1479	1.33
1011.7	0.0760	14.57	0.33	0.64	1591	1.23
1041.0	0.0784	15.89	0.31	0.64	1629	1.19
1188.0	0.0897	22.96	0.24	0.67	1786	1.04
1253.6	0.0945	26.19	0.22	0.68	1835	0.99
1486.7	0.1105	37.24	0.17	0.76	1949	0.83
1740.0	0.1259	47.54	0.14	0.87	1997	0.71
2042.4	0.1424	57.30	0.12	1.01	2017	0.61

从表 2 可以看出,在 0.61 ~ 1.83 nm 的软 X 射线能区内, KAP 的积分反射率 R_m 随波长增大而减小;在 1.95 ~ 2.23 nm 的软 X 射线能区内, KAP 的积分反射率 R_m 随波长增大而增大.在 0.61 ~ 2.23 nm 的整个软 X 射线能区内,峰值反射率 P 随波长增大而减小;半最大值宽度 ω 随波长增大而增大;能量分辨率 $E/\Delta E$ 随波长增大而减小.

4 结论

由于分光晶体是弯晶谱仪的关键部件,晶体的积分反射率的高低将影响弯晶谱仪的传递效率和探测效率,所以在加工晶体时,不能破坏其晶向;在切割晶体时,边缘不能有毛刺,以保证晶体的完整性.因

为弯晶谱仪是在高真空环境下工作,所以晶体粘贴在椭圆形基底上之后不能留有气泡,否则晶体会从基底上鼓起,导致晶体破碎和不满足理想的椭圆方程. 晶体的反射率主要与软 X 射线的波长有关,本文只计算了 KAP 的反射率,其它三种晶体的反射率可以按照相同的理论和公式计算.

参考文献

- 1 Feng X, Liu M H, Lee S A. A transmission grating spectrograph and its application in both laser plasma and plasma focus. *Rev Sci Instrum*, 1997, **68**(8):3068 ~ 3073
- 2 陈志伟,王占山,牛惠辉. 软 X 射线狭缝透射光栅谱仪的研制. *光学精密工程*, 2000, **8**(3):254 ~ 256
Chen Z W, Wang Z S, Niu H H. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(3):254 ~ 256
- 3 范品忠, Fill E, 关铁堂. 软 X 射线晶体谱仪. *光学学报*, 1995, **15**(7):923 ~ 926
Fan P Z, Fill E, Guan T T. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7):923 ~ 926
- 4 熊先才,钟先信,肖沙里,等. 双通道椭圆弯晶谱仪分辨率的影响因素分析. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2002, **25**(10):27 ~ 29
Xiong X C, Zhong X X, Xiao S L, et al. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, **25**(10):27 ~ 29
- 5 王英华. X 光衍射技术基础(第二版). 北京:原子能出版社, 1993. 101 ~ 103
Wang Y H. *Foundation on X-ray Diffractive Technology*(2nd edition). Beijing: Atomic Energy Press, 1993. 81 ~ 83
- 6 Henke B L, Lee P, Tanaka T J, et al. Low-energy x-ray interaction coefficients: photoabsorption, scattering, and reflection. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1982, **27**(1):1 ~ 16
- 7 Zhong X X, Xiong X C, Xiao S L, et al. Analysis and calculation on transmission efficiency of two-channel elliptical crystal spectrometer. in: Tan Jiubin, Wen Xianfang eds. *Proceedings of 2nd International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, Volume 3. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002. 167 ~ 171
- 8 熊先才,钟先信,肖沙里,等. 双通道椭圆弯晶谱仪的传递效率分析. *光学精密工程*, 2002, **10**(6):592 ~ 596
Xiong X C, Zhong X X, Xiao S L, et al. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(6):592 ~ 596

Reflectivity Characteristics of Dispersion Crystal KAP for Soft X-ray

Xiong Xiancai¹, Zhong Xianxin¹, Duan Shaoguang¹, Xiao Shali¹, Yang Guohong², Gao Jie¹

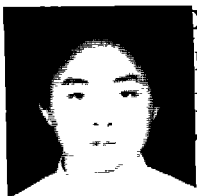
¹ Key Laboratory of Opto-electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China

² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, P. R. China

Received date: 2003-02-28

Abstract Curved crystal spectrograph is an effective diagnostic instrument of soft X-ray produced by laser plasmas, KAP is one of dispersion crystals for curved crystal spectrograph. Integrated reflectivity of KAP is calculated through components of atomic scattering factor and structure factor, and mosaic crystal model. It shows that integrated reflectivity of KAP is related to wavelength, which firstly decreases, then increases as wavelength increases. Moreover, the peak reflectivity, the full width at half-maximum, energy width and energy resolution are calculated, it shows that the peak reflectivity and energy resolution decrease as wavelength increases.

Keywords Dispersion crystal; Integrated reflectivity; Curved crystal spectrograph; Diagnosis of soft X-ray



Xiong Xiancai was born on October 7, 1973 in Chongqing, China. He respectively received the B. S degree in 1997 and M. S. degree in 2000 from Department of Survey Engineering, Jiaozuo Institute of Technology. Now he is a Ph. D. candidate of the Key Laboratory of Opto-electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University. His current research interests concentrate primarily on opto-electronic precise instrument.