

文章编号 1004-924X(2002)06-0592-05

双通道椭圆弯晶谱仪的传递效率分析

熊先才¹, 钟先信¹, 肖沙里¹, 段绍光¹, 高洁¹, 杨国洪²

(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, 四川 绵阳 621900)

摘要: 双通道椭圆弯晶谱仪(以下简称 TCECS)是激光惯性约束核聚变(ICF)研究中非常重要的诊断仪器,在一个通道上用 X 光胶片或 X-CCD 作空间分辨测量,在另一个通道上用 X 光条纹相机作时间分辨测量,从而同时获得 X 射线的空间和时间特性。TCECS 传递效率的高低将影响摄谱效果,而 TCECS 的传递效率取决于柱面镜的反射率、晶体的积分衍射率、滤光膜的透射率和光谱相对孔径。本文从理论上分析了 TCECS 传递效率的四种影响因素与波长的关系,并用 Matlab 6.1 软件进行了数值计算,表明 TCECS 的传递效率随 X 射线波长增大而减小,这对今后 TCECS 的结构设计具有重要的指导作用。

关键词: 椭圆晶体谱仪;传递效率;激光聚变;X 射线诊断

中图分类号: TH744.15 文献标识码: A

1 引言

在激光惯性约束核聚变(ICF)研究中,强功率、空间和时间高度集中的激光束从各个方向均衡地照射在含有热核燃料的小靶球上,巨大的脉冲功率密度使靶球在很短的时间内高度压缩并加热,在靶球还来不及飞散之前就产生一次热核爆炸,产生大量高温等离子体。由于空间和时间尺度分别以微米和皮秒计,因此产生的高温等离子体密度特别高。高温等离子体辐射出大量的 X 射线,X 射线测量不仅可用于测量电子和离子的温度、电子能量的时空分布、等离子体定向运动;还可用于测量和分析超热和逃逸电子,以及等离子体的不稳定性^[1,2,8]。目前正在设计的双通道椭圆弯晶谱仪是 X 射线非常重要的诊断仪器,TCECS 的测量波长范围是 0.2~2nm;Bragg 角是 30~67.5°;空间和时间分辨率分别是 1000 和 20ps。在一个通道上用 X 光胶片或 X-CCD 作空间分辨测量,在另一个通道上用 X 光条纹相机作时间分辨测量,从而同时获得 X 射线的空间和时间特性,光路布置如图 1 所示。

然而,TCECS 传递效率的高低将影响摄谱效果,本文从理论上分析了 TCECS 传递效率的影响因素,这对今后 TCECS 的结构设计将具有重要的指导作用。

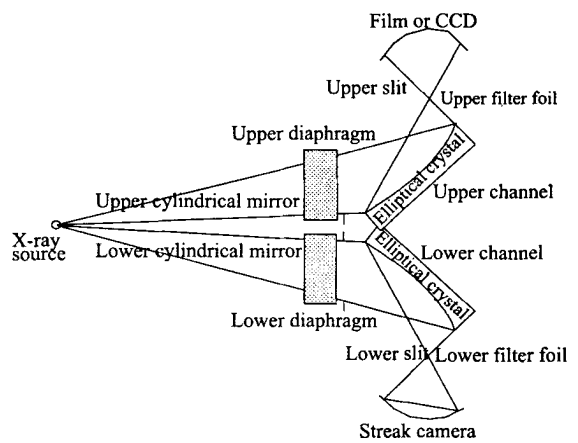


图 1 TCECS 的光路布置

Fig. 1 Light path for TCECS.

2 TCECS 传递效率的影响因素

X 射线经柱面镜反射之后,通过光阑,然后经椭圆晶体衍射,最后通过滤光膜和狭缝到达探测

器, 因此谱仪的传递效率取决于柱面镜的反射率、晶体的积分衍射率、滤光膜的透射率和光谱相对孔径。

2.1 柱面镜的反射率

TCECS 采用镀金膜的柱面镜, 掠入射角为 3.7° , 进行 X 射线的高能截止。X 射线以掠入射角 θ 入射到柱面镜上发生全反射, 但有一部分会被反射材料吸收, 对非极化入射光束而言, 垂直和平行于反射面的入射电场两个极化分量的反射光强^[3,4]分别是:

$$I_o = \frac{4\rho^2(\sin\theta - \rho)^2 + \gamma^2}{4\rho^2(\sin\theta + \rho)^2 + \gamma^2}, \quad (1)$$

$$I_\pi = \frac{4\rho^2(\rho - \cos\theta\cot\theta)^2 + \gamma^2}{4\rho^2(\rho + \cos\theta\cot\theta)^2 + \gamma^2} I_o. \quad (2)$$

则, 柱面镜反射的总光强和反射率分别是:

$$I(\theta) = (1/2)I_o[1 + (I_\pi/I_o)], \quad (3)$$

$$M = I(\theta) \times 100\%. \quad (4)$$

式中, θ 是掠入射角, γ 是光学常数, ρ 是特征参数。柱面镜的反射率由镀膜材料、掠入射角、X 射线的波长决定, 柱面镜的反射率曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在波长 0.71~ 2.17nm 之间, 柱面镜的反射率随 X 射线的波长增大而增大; 波长越短, 反射率下降得越快。

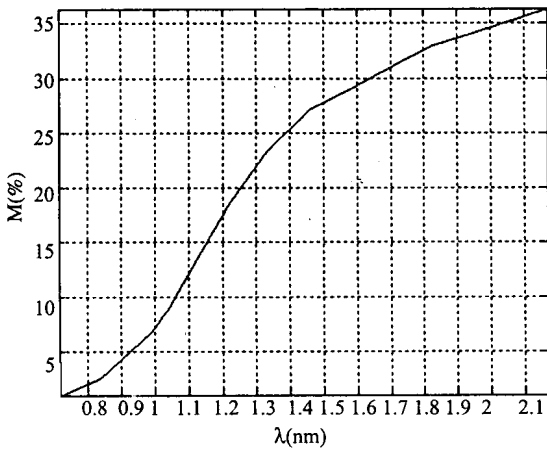


图 2 柱面镜的反射率曲线

Fig. 2 Reflectivity of the cylindrical mirror.

2.2 晶体的积分衍射率

晶体具有镶嵌结构, 即晶体由一些小块组成, 小块的尺度为 100nm 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^[3]。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。根据镶嵌晶体模型^[3, 5, 9], 晶体的积分衍射率为:

$$R_m = \frac{(r_0 \varphi \lambda^2)^2}{16 \pi \beta} (F_1^2 + F_2^2) \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin 2\theta}, \quad (5)$$

式中, r_0 是经典电子半径; φ 是单位体积内的晶胞数; λ 是 X 射线的波长; β 是光学常数; F_1 、 F_2 是结构因子; θ 是 X 射线的 Bragg 衍射角。

TCECS 的色散元件是 Al、PET、MiCa、KAP 四种晶体, 以 KAP 晶体为例, 它的积分衍射率曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在波长 0.61~ 2.23nm 之间, KAP 的积分衍射率先随波长增大而减小, 后随波长增大而增大, 在波长 1.83nm 处积分衍射率最低。

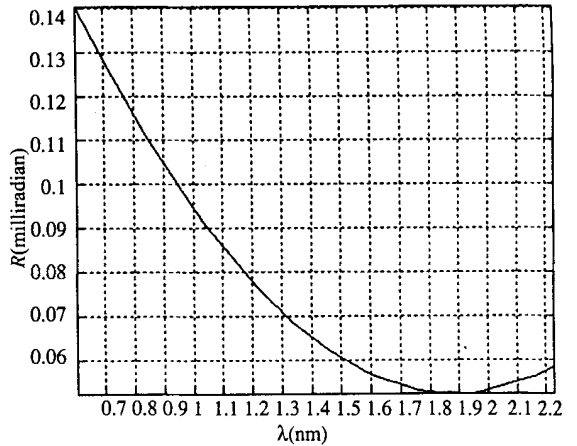


图 3 KAP 的衍射率曲线

Fig. 3 Integrated diffraction of KAP.

2.3 滤光膜的透射率

X 射线通过滤光膜时, 将部分被吸收。这种吸收服从朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律, 设 X 射线入射时的强度为 I_0 , 通过厚度为 x 的滤光膜后, 强度减为 I , 则: $I = I_0 e^{-\alpha x}$ 。式中, α 是线吸收系数, 用质量吸收系数 $\mu_m = \alpha/\rho$ 代替线吸收系数 α , 则吸收定律改写为:

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x}, \quad (6)$$

除了滤光膜对 X 射线的吸收外, 还有 X 射线的相干散射和康普顿散射, 但对 X 射线的吸收占绝大部分, 因吸收引起的减弱远大于因散射引起的减弱, 如 Cu 的 $K_{\alpha 1}$ X 射线(8046eV)通过碳时, 光电吸收占 92%^[6]。因此, 滤光膜的透射率为:

$$F = \frac{I}{I_0} = \exp[-\mu_m \rho x], \quad (7)$$

式中, μ_m , ρ , x 分别是滤光膜的质量吸收系数、密度和厚度。

TCECS 的滤光膜用镀膜进行 X 射线的低能截止, 镀膜的厚度是 $1.1\mu\text{m}$, 其透射率曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 在波长 $0.21\sim 2.17\text{nm}$ 之间, 镀膜的透射率随波长增大而减小。

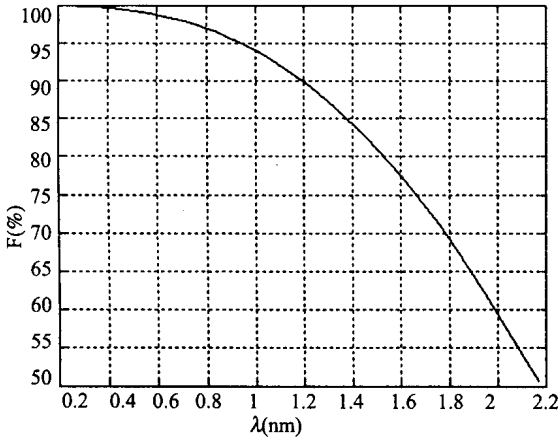


图 4 镀膜的透射率曲线

Fig. 4 Transmissivity curve of the filter foil for Be.

2.4 光谱相对孔径

X 射线从激光等离子体辐射出来之后, 先经柱面镜反射、椭圆晶体衍射、滤光膜透射, 最后到达探测装置, 根据椭圆的几何关系^[7]和 Bragg 公式, 可以得到光谱的相对孔径为:

$$2d \sin\theta = \lambda (m = 1), \quad (8)$$

$$x = 2\theta - \beta, \quad (9)$$

$$\tan\theta = \frac{1 - \epsilon \cos\beta}{\epsilon \sin\beta}. \quad (10)$$

对式(9)和(10)分别进行微分, 得到式(11)和(12)

$$\frac{dx}{d\theta} = 2 - \frac{d\beta}{d\theta}, \quad (11)$$

$$\frac{d\beta}{d\theta} = \frac{1 - 2\epsilon \cos\beta + \epsilon^2}{\epsilon(\epsilon - \cos\beta)}. \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 得到式(13)

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{\epsilon^2 - 1}{\epsilon(\epsilon - \cos\beta)}, \quad (13)$$

式中, d 是晶面间距; θ 是 Bragg 角; x 是 X 射线与椭圆长轴的夹角; β 是谱线的探测角; ϵ 是椭圆的离心率。

TCECS 的椭圆离心率是 0.9688, 光谱的相

对孔径如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在波长 $1.33\sim 2.17\text{nm}$ 之间, 光谱的相对孔径随 X 射线的波长增大而减小。

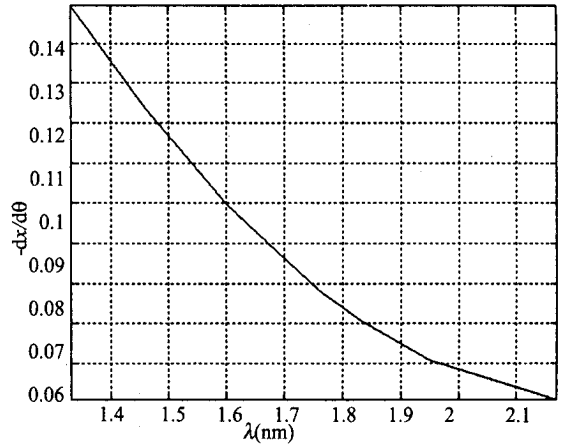


图 5 光谱的相对孔径曲线

Fig. 5 Curve of the spectrographic aperture ratio.

2.5 TCECS 的传递效率

TCECS 的传递效率由柱面镜的反射率、晶体的积分衍射率、滤光膜的透射率和光谱相对孔径四个参数决定, 可以用线传递函数^[3,7]来表示:

$$Tl = N/i_0 \Psi = MRF \frac{dx}{d\theta}, \quad (14)$$

式中, M 是柱面镜的反射率; R 是晶体的积分衍射率; F 是滤光膜的透射率; $dx/d\theta$ 是光谱的相对孔径。以晶体 KAP 为例, 传递效率的计算值见表 1, 传递效率曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出, 在波长 $1.33\sim 2.17\text{nm}$ 之间, TCECS 的传递效率随 X 射线的波长增大而减小。

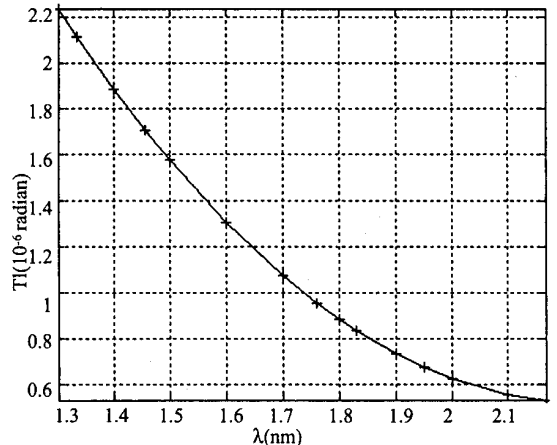


图 6 TCECS 的传递效率曲线

Fig. 6 Transmission efficiency curve of TCECS for KAP.

表 1 传递效率的计算值

Table 1 Value of transmission efficiency for KAP

Wavelength λ (nm)	1.3	1.33	1.4	1.46	1.50	1.60	1.7	1.76	1.80	1.83	1.90	1.95	2.0	2.1	2.17
Tl (10^{-6} radian)	2.23	2.13	1.90	1.71	1.57	1.27	1.06	0.95	0.89	0.85	0.75	0.70	0.65	0.56	0.51

3 结论

本文从理论上分析了 TCECS 传递效率的影响因素, 并用 Matlab 6.1 软件模拟计算了 TCECS 的传递效率, 表明 TCECS 的传递效率随 X 射线的波长增大而减小。因此, 在今后 TCECS 的结构设计时, 由于测量的 X 射线波长较短(0.2~2nm), 前置镜要用镀金膜的高光洁度柱面镜, 要

选取合适的掠入射角, 既保证有较高的反射率, 又使得柱面镜的半径不至于太大; 椭圆导轨要有较高的光洁度, 晶体粘贴之后要满足椭圆方程且不能留气泡, 以保证有较高的衍射率; 滤光膜用原子序数较低的金属薄膜, 以保证有较高的透射率; 狭缝要很窄, 以保证有较高的分辨率。通过这些措施, 就可以提高 TCECS 的传递效率, 从而获得较好的摄谱效果。

参考文献:

- [1] 国家自然科学基金委员会. 等离子体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] 翟南. 我国激光核聚变实验研究概述[J]. 核物理动态, 1995, 12(3): 21_25.
- [3] Henke B L, Gulliksen E M, Davis J C. X-ray interaction: photoabsorption, scattering, transmission and reflection at E=50_30000eV, Z= 1_92[J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, 54(2): 181_200.
- [4] Okamoto Y, Yoshikawa M, Yamaguchi N, et al. Absolute calibration of space and time_resolving flat_field vacuum ultraviolet spectrograph under both P and S polarized light conditions for plasma diagnostics [J]. *Rev. Sci. Instrum.* 2001, 72(12): 4366_4371.
- [5] 王英华. X 光衍射技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1993.
- [6] 杨福家. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] Henke B L, Yamada H T, Tanaka T J. Pulsed plasma source spectrometry in the 80_8000eV X-ray region[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, 54(10): 1311_1316.
- [8] 王峰, 徐朝银, 潘国强, 等. 同步辐 X 射线双晶单色仪能量扫描[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(4): 401_404.
- [9] 金春水, 王占山, 曹健林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(4): 66_70.

Analysis of the transmission efficiency of a two_channel elliptical crystal spectrometer

XIONG Xian_cai¹, ZHONG Xian_xin¹, XIAO Sha_li¹, DUAN Shao_guang¹,
GAO Jie¹, YANG Guo_hong²

- (1. *Key Laboratory of Opto_electronic Technology and System, MOE, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*
2. *China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

Abstract: The two_channel elliptical crystal spectrometer (TCECS) is a very important diagnostic instrument for researching inertial confinement fusion controlled by laser. Since spatial resolution is recorded by X_film or X_CCD in one channel, and time resolution is recorded by an X_streak camera in another channel, the spatial and time characteristics can be measured simultaneously. Spectrographic effects will be affected by the transmission efficiency of TCECS, which depends on the reflective ratio of a cylindrical mirror, the integrated diffraction of a crystal, the transmissivity of filter foil, and the spectrographic aperture ratio. The relations between these four influencing factors and wavelength are analyzed theoretically in this paper. The numerical calculations are done by using Matlab 6.1 software. It is indicated that transmission efficiency decreases as X_ray wavelength increases, which is very important to instruct the structural design.

Key words: elliptical crystal spectrometer; transmission efficiency; laser fusion; x_ray diagnosis

作者简介:熊先才(1973),男,重庆人,重庆大学光电工程学院博士研究生,主要从事 X 射线诊断和精密仪器方面的研究,已发表论文 4 篇;

钟先信(1935),男,重庆人,重庆大学光电工程学院,教授,博士生导师,主要从事精密机械, MEMS 等方面的研究。