

## 一种透射式软 X 光带通方法研究\*

曹柱荣<sup>†</sup> 董建军 杨正华 詹夏宇 袁铮 张海鹰 江少恩 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2012年5月14日收到; 2012年9月26日收到修改稿)

基于微通道板 (MCP) X 射线光学, 提出了一种透射式软 X 光带通方法. 通过三种通道结构的 MCP-X 光传输特性比较, 给出了带通设计方法. 利用北京同步辐射装置开展了方孔 MCP 和滤片标定. 结果表明, MCP 透射谱具有宽能带选择范围和高效率的特点, 并且在 1 keV 以下可以在多个多能点实现 100 eV 带宽的带通设计.

关键词: X 射线光学, 微通道板, 软 X 光带通

PACS: 52.70.-m, 41.50.+h, 07.85.-m

DOI: 10.7498/aps.62.045205

## 1 引言

在天体物理、等离子体、高能量密度物理以及惯性约束聚变研究中, 需要广泛关注辐射体 X 光发射的各种信息. 辐射体诊断首先需要完成对 X 光的能量或波长选择, 选择方法包括单色方法、带通方法以及平响应全光谱测量等<sup>[1-3]</sup>. 单色方法比如各种类型的光栅、晶体以及波带片等, 应用中需要考虑辐射体的强度和谱特性等因素. 平响应全光谱测量主要为一般性的强度诊断或者已知谱情况下的辐射流诊断. 带通方法主要为各种类型的平面镜和滤片组合, 应用相对普遍, 它是辐射体诊断中单色与全光谱测量方法之间的一种折中, 被广泛用于绝对计量. 比如用于惯性约束聚变研究的软 X 光功率谱仪, 可以获得黑腔辐射体 X 光辐射通量、辐射温度、X 射线返照率以及转换效率等信息的绝对计量<sup>[4-7]</sup>.

基于平面镜和滤片的这种传统 X 带通方式是一种掠入射反射式结构, 虽然构成结构比较简单, 但是在精密实验应用中仍然存在很多不足. 比如在辐射流特性诊断中的多通道软 X 光功率谱仪, 需要多通道的掠入射平面镜组合. 镜子的结构与装配会引入较多的不确定性, 镜子的角度敏感性对标定和

应用提出很高的精度要求. 尤其是多通道结构下, 整个谱仪的视角接近  $8^\circ$ , 对于动态辐射体而言, 通道视角因子的差异几乎不可能修正. 另外在辐射体成像型带通诊断中, 比如多组平面镜配合针孔成像诊断辐射体等离子体运动研究, 系统瞄准和图像固有倾角成为系统设计和实际应用的难点<sup>[8-10]</sup>.

因此, 发展透射式结构的带通方法在辐射体带通诊断中具有非常重要的实际意义, 它可以大大减小多通道设计下的视角差, 可以解决带通成像的结构性问题.

本工作针对基于微通道板 (micro-channel plate, MCP) X 射线光学, 提出了一种平面透射式软 X 光带通方法, 通过同步辐射装置单色 X 光束线标定, 获得了初步的实验结果.

## 2 带通设计原理

图 1 为方孔 MCP 的基本原理. 在以一定角度平行光入射情况下, 从入射口不同位置入射, 其反射次数不同. 入射点深度越深, 反射次数越少, 反之反射次数加大.

显然, 反射次数与通道长度、通道孔径、入射角度以及入射点位置等参数有关. 不考虑 X 射线穿过通道墙的透射影响, 则通过微通道传输效率为

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10905050) 和中国工程物理研究院发展基金 (批准号: 2010B0102015) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn

$$\eta(\lambda) = k \prod_{s=1}^M R(\lambda, \theta_s), \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为 X 射线波长,  $k$  为 MCP 占空比,  $M$  为反射次数. 从使用角度分析, 有三种通道口结构的反射几何.

第一种为方形通道口, 反射次数直接由平面多次反射得到; 在应用上比较简单, 有效反射率高, 带通效果比较实用.

第二种为六角形通道口, 在 MCP 一定倾角下反射面为一个底面和两个侧面. 反射面为侧面时, 光路将沿着六角面逐个反射, 并且反射次数将是两倍于底面. 在考虑角度与反射率的关系后, 总的通道出射谱和效率将是底面与侧面在二倍关系反射次数和两种角度反射率的综合平衡结果.

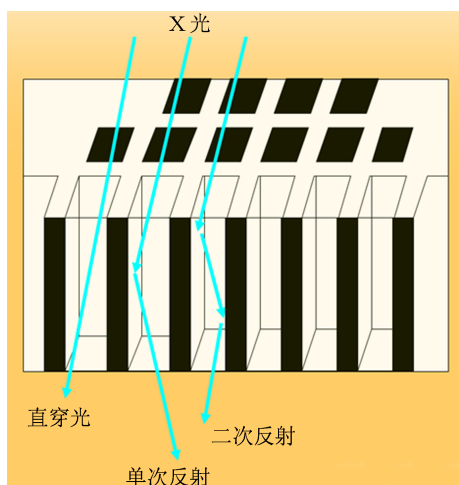


图1 方孔 MCP 反射几何原理

第三种情况为圆孔通道口, 在 MCP 一定倾角下反射面为舌状柱面. 模拟结果表明, 对于圆孔通道, 虽然每个入射点的反射角不同, 但二次反射角度与首次反射角度永远相同. 但是随着反射位置变化, 反射角增大, 有效反射率降低. 因此, 在相同入射角下, 圆孔通道的透过率最低.

因此, 从效率和实用性角度, 方形通道口 MCP 具有明显优势. 模拟以通道长度  $500 \mu\text{m}$ 、通道孔径  $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$  为基本参数, 变化入射角度, 对反射次数进行了模拟. 在平行光入射情况下, 设入射角度为  $\theta$ , 孔径为  $d$ , 通道长度为  $L$ , 则首次反射面的长度为  $d/\text{tg}\theta$ , 反射次数为  $L/(d/\text{tg}\theta)$ . 显然只有特定设计时  $L/(d/\text{tg}\theta)$  才为整数时. 一般地, 由于通道孔径只有几微米, 长径比为几十, 所以反射次数只有  $n$  次到  $n+1$  次两种分布. 并且角度越大, 反射次数越多, 单位通道面积上对应的反射率呈幂指

数衰减. 我们可以比较两个角度的反射率差异. 首先建立出射谱的计算模型, 设 MCP 的开口面积比为  $O$ , X 光在 MCP 内表面的单次反射反射率为  $R$ , 反射次数对应的权重为  $P$ , 则对应的出射谱为

$$T(\lambda) = O \cdot (P(n) \cdot R(\lambda)^n + P(n+1) \cdot R(\lambda)^{n+1}). \quad (2)$$

图 2 为  $\theta = 1^\circ$  和  $\theta = 5^\circ$  时的单次反射率和多次反射权重匹配后的反射率. 由图 2 可见, 对于  $\theta = 1^\circ$ , 反射两次的份额为 30%, 与单次反射差异不太大. 但对于  $\theta = 5^\circ$ , 反射 6 次的份额为 70%; 反射 7 次的份额占 30%. 对于软 X 光而言, 几乎全部截止. 由此可见, 控制小角度入射是必要的, 过大的角度很难实现 X 光的带通选择.

因此, MCP 带通设计主要考察 MCP 长径比设计, 在此基础上给出合适的角度设计. 另外, 获得高效率透射谱, 必须解决好表面粗糙度问题, 粗糙度太大, 既影响反射效率和最终的透射率, 也会增大散射份额, 增大 X 光信号本底.

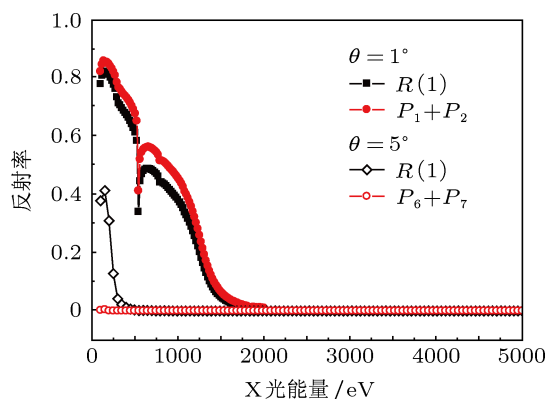


图2  $\theta = 1^\circ$  和  $\theta = 5^\circ$  的反射率比较

### 3 实验方法

基于北京同步辐射装置标定 4B7B 软 X 光束线 (3W1B 升级) 开展了 MCP-X 光传输特性的精密标定实验 [6]. 4B7B 软 X 光束线的能量范围为 50—1500 eV; 能量分辨本领大于 200; 二次谐波成分比例不高于 5%; 光子通量高于 109 phs/s (250 mA, 2.5 GeV). 标定实验装置如图 3 所示, 光束经过单色器系统后输出单色光, 通过单色光入射 MCP 前后的光强比获得出射谱. 为减小光弥散造成的测量不确定性, MCP 样品与探测器距离尽量小于 1 mm. 光源强度由 AXUV-100 型硅光二极管标准探测器给出, 输出信号用 6517 A 弱电流计记录.

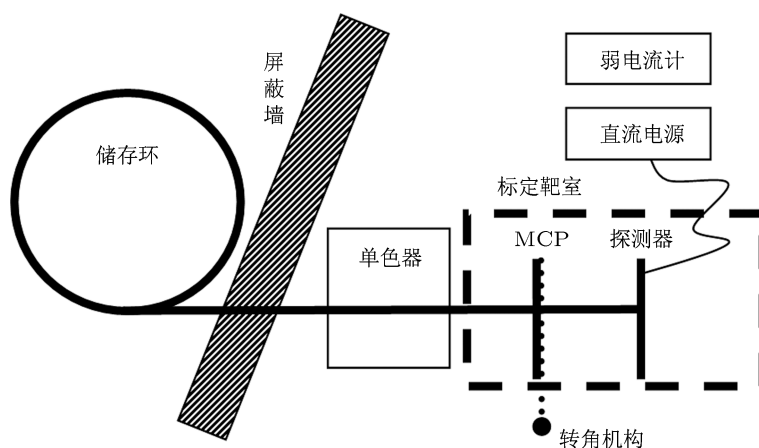


图3 实验装置示意图

### 4 实验结果与分析

图4为两次标定给出的MCP透射谱, MCP厚度为0.5 mm, 倾角为13 mrad, 孔径为 $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ , 占空比为50%. 由图4可见, 透射谱中MCP丰富的吸收非常清楚, 如常见的C边, O边以及在800 eV附近皮玻璃自身金属的各种吸收边, 其中尤其O边比较深, O边深度为低于538 eV和高于538 eV的带通设计和选择提供了条件. 同时, MCP透射率比较高, 在80—538 eV范围大于30%, 在538—1000 eV范围大于20%. 高透过率对于X光带通应用提供较高的效率.

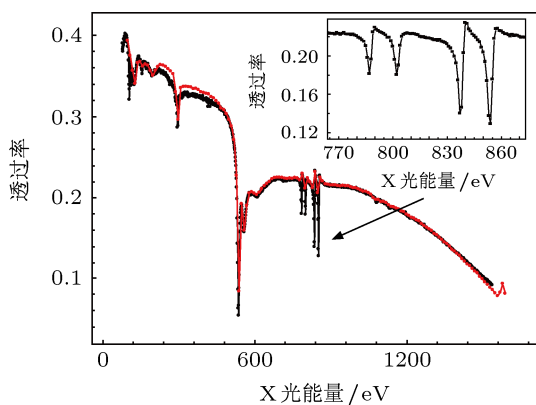


图4 方孔MCP带通效率的标定结果

图5为实验结果与计算结果的比较. 理论计算结果分别为13 mrad和17 mrad两个角度. XOP软件计算的反射率结合图2所示的反射次数与权重, 给出不同角度情况下的MCP透射谱. 计算中MCP

分子式为“ $\text{O}_{212}\text{Si}_{87}\text{Pb}_{16}\text{K}_{12}\text{Na}_4\text{Bi}_3\text{Ba}_4\text{Al}_2$ ”. 由图5可见, 13 mrad的结果与实验符合得较好, 角度越大, 截止能点越低. 基于图5所示的MCP带通片透射谱, 结合滤片标定结果, 可以给出多种窄能带结构的能量选择器, 由此验证了MCP作为带通片的设计和标定技术.

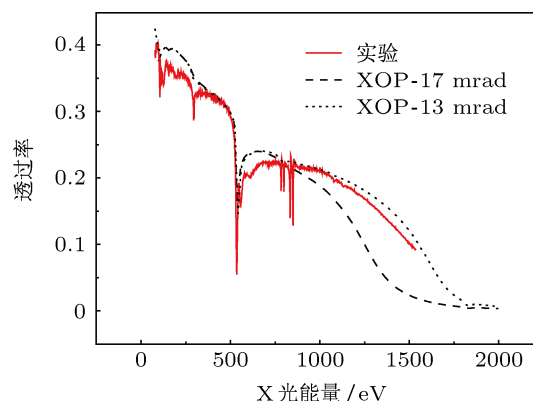


图5 孔MCP带通效率标定结果与计算结果的比较

图6为4种滤片标定数据与图5透射谱标定数据组合后的数据结果, 这4种滤片为神光II装置 DANTE 谱仪用的常规滤片, 透过率为同条件下的标定数据. 由图6可见, MCP带通效果具有明显于平面镜的窄能带特点, 并且在一个角度下的MCP即可实现多个能点的选择.

由图6可以给出带通宽度和带通能点的配置, 表1为4条曲线的带通中心能点和能带宽度的实验数据. 数据表明, 带通效率可以被设计在很接近的范围, 由此为同条件配置谱仪通道提供了可靠的结果, 同时也方便进行结构设计.

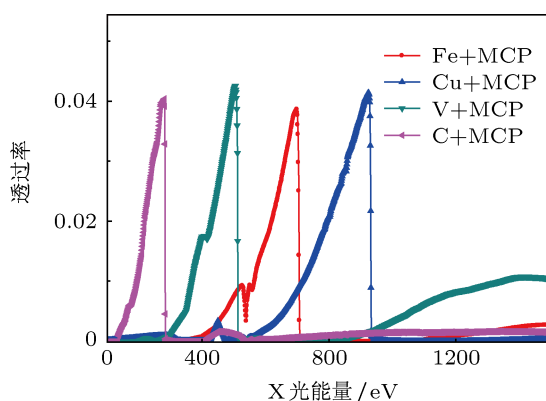


图6 MCP配滤片的带通谱结果

表1 MCP配滤片的带通参数

带通参数	C+MCP	V+MCP	Fe+MCP	Cu+MCP
中心能点/eV	281	505	700	924
能带宽度/eV	64	77	87	130
带通效率/%	4.05	4.28	3.9	4.16

与当前平面镜方法实现多能带选择相比, MCP带通方法可以单片实现多能段选择, 大大简化结构. 反射式带通元件的多通道设计则存在各个通道镜面角度调整精度、标定与应用一致性、大体积下视角因子对辐射流测量的影响等方面的问题.

## 5 结论

基于 MCP X 射线光学, 提出了一种平面透射式软 X 光带通方法. 通过同步辐射装置 4B7B 软 X 光束线单色束线标定, 获得了方孔 MCP 的实验结果. 结果表明, 孔径为  $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ , 厚度为 0.5 mm 的 MCP, 在倾角 13 mrad 下, 透射谱具有很好的出射效率和高能截止效果, 并且配合滤片能够在 1 keV 以下多个能点实现低通, 通带宽度为 100 eV 左右.

与当前平面镜方法实现多能带选择相比, MCP带通方法可以单片实现多能段选择, 大大简化结构, 在标定与应用一致性、视角因子影响等方面具有明显优势. 这种新型透射式带通技术在辐射流精密诊断、软 X 光窄能带成像以及各类 X 射线源测试与应用中具有广泛的应用前景和重要的实际意义.

本工作中的北京同步辐射装置标定实验得到中国科学院高能物理研究所赵屹东、洪才浩、郑雷、崔明启等老师的帮助和指导, 本工作中的特种 MCP 研制得到北方夜视南京公司潘京生、孙建宁、苏德坦等老师的支持和帮助, 在此一并表示感谢.

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [2] Campbell E M, Hogan W J 1999 *Plasma Phys. Control Fusion* **41** B39
- [3] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [4] Sun K X, Cui Y L, Yi R Q, Jiang S E, Huang T X, Yang J M, Ding Y K, Cui M Q, Zhu P P, Zhao Y D, Li G, Zhang J H 2003 *Optics and Precision Engineering* **11** 349 (in Chinese) [孙可煦, 崔延莉, 易荣清, 江少恩, 黄天暉, 杨家敏, 丁永坤, 崔明启, 朱佩平, 赵屹东, 黎刚, 张景和 2003 光学精密工程 **11** 349]
- [5] Sun K X, Yi R Q, Yang G H, Jiang S E, Cui Y L, Liu S Y, Ding Y K, Cui M Q, Zhu P P, Zhao Y D, Zhu J, Zheng L, Zhang J H 2004 *Acta Opt. Sin.* **53** 1099 (in Chinese) [孙可煦, 易荣清, 杨国洪, 江少恩, 崔延莉, 刘慎业, 丁永坤, 崔明启, 朱佩平, 赵屹东, 朱杰, 郑雷, 张景和 2004 物理学报 **53** 1099]
- [6] Yi R Q, Yang G H, Cui Y L, Du H B, Wei M X, Dong J J, Zhao Y D, Cui M Q, Zheng L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6287 (in Chinese) [易荣清, 杨国洪, 崔延莉, 杜华冰, 韦敏习, 董建军, 赵屹东, 崔明启, 郑雷 2006 物理学报 **55** 6287]
- [7] Cao Z R, Li S W, Jiang S E, Ding Y K, Liu S Y, Yang J M, Zhang H Y, Yang Z H, Li H, Yi R Q, He X A 2011 *Acta Phys. Sin.* **59** 7170 (in Chinese) [曹柱荣, 李三伟, 江少恩, 丁永坤, 刘慎业, 杨家敏, 张海鹰, 杨正华, 黎航, 易荣清, 何小安 2010 物理学报 **59** 7170]
- [8] Cao Z R, Zhang H Y, Dong J J, Yuan Z, Miao W Y, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 045212 (in Chinese) [曹柱荣, 张海鹰, 董建军, 袁铮, 缪文勇, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤 2011 物理学报 **60** 045212]
- [9] Cao Z R, Ding Y K, Liu S Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2640 (in Chinese) [曹柱荣, 丁永坤, 刘慎业 2010 物理学报 **59** 2640]
- [10] Cao Z R, Zhang H Y, Yi R Q, Li H, Dong J J, Gu Y Q, Liu S Y, Ding Y K 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 948 (in Chinese) [曹柱荣, 张海鹰, 易荣清, 黎航, 董建军, 谷渝秋, 刘慎业, 丁永坤 2008 强激光与粒子束 **20** 948]

# A new method of soft X-ray transmission band-pass\*

Cao Zhu-Rong<sup>†</sup> Dong Jian-Jun Yang Zheng-Hua Zhan Xia-Yu Yuan Zheng  
Zhang Hai-Ying Jiang Shao-En Ding Yong-Kun

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

(Received 14 May 2012; revised manuscript received 26 September 2012)

## Abstract

Based on microchannel plate (MCP) X-ray optics, a transmission soft X-ray band-pass approach is presented. X-ray transmission band-pass characteristics are given through three structures of MCP channel. Calibration results from a square hole MCP and filter on Beijing Synchrotron Radiation Facility show that MCP transmission spectrum is of a wide range of band-pass options and high efficiency, and can achieve multi-point design of 100 eV bandwidth at lower than 1 keV with different filters.

**Keywords:** X-ray optics, microchannel plate, soft X-ray band-pass

**PACS:** 52.70.-m, 41.50.+h, 07.85.-m

**DOI:** 10.7498/aps.62.045205

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905050) and the Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2010B0102015).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn