

CNIC-01914

CAEP-0201

## 软 X 射线聚束透镜特性研究

秦 义

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

### 摘 要

研制了软 X 射线聚束透镜, 它由 1 387 根内直径为 0.45 mm、外直径为 0.60 mm 的 X 光导管组成, 分 21 层排布, 收光角达到  $28.9^\circ$ 。该透镜同高温等离子体辐射源组合可以获得除去等离子体溅射的高强度宽能带软 X 射线束。同激光等离子体软 X 射线源组合, 在透镜后焦点处获得的功率密度达到  $1.3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ , 传输效率为 18.6%, 能量密度增益达到 1 000。将“强光一号”加速器近似为点光源软 X 射线源, 使用透镜与之耦合, 在焦斑处获得的功率密度可以达到  $0.5 \text{ TW/cm}^2$ 。

关键词: X 射线聚束透镜 X 光导管 传输效率 功率密度增益

# Characteristics of Soft X-ray Lens

(In Chinese)

QIN Yi

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

## ABSTRACT

A soft X-lens was devised with waveguide X-ray optics of total external reflection (TER). The lens consists of a stack of 1 387 TER waveguides with inner diameter of 0.45 mm and outer diameter of 0.60 mm. With the help of plasma sources of soft X-ray radiation, high density of pure soft X-ray radiation (without plasma expansion fragments) with broad-band spectral range can be obtained at the focus of the lens. As laser-plasma is considered, the radiation density of  $1.3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  is obtained, the transmission coefficient is 18.6%, the ratio of the density at the focus with and without the lens is 1 000 and the radiation capture is 28.9°. The density of 0.5 TW/cm<sup>2</sup> can be obtained as far as Qiang-Guang I facility is considered.

**Key words:** X-lens, X-ray guide, Transmission coefficient, Power density

# 引言

20 世纪 80 年代前苏联科学家 KUMAKHOV 首先提出了一种全新的 X 射线聚束方法,即利用 X 射线在空心纤维导管内表面的多次全反射来实现对 X 光聚束,并采用这一原理成功地研制了首台 X 光聚束装置<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代中期北京师范大学低能物理研究所研制出整体 X 射线透镜<sup>[2]</sup>,并成功地应用到 X 射线荧光分析等领域,它的利用大大提高了 X 射线荧光分析谱仪对中重元素的分析灵敏度<sup>[3,4]</sup>。但所获得的微束 X 射线能量密度增益只有 10 ~ 300,所获得的微束 X 射线功率密度则未见报道。为大幅度提高 X 光束功率密度,我们研制了性能优越的软 X 射线聚束透镜,将其同激光等离子体辐射源组合可以在大角度范围内收集发散的软 X 射线束,并将其聚焦到较小的空间尺度范围内,以获得高功率密度软 X 射线束,可以达到甚至超过同步辐射的光强。

## 1 X 光在导管中的传输原理<sup>[5,6]</sup>

X 光透镜由 X 光导管组成。X 光导管一般是很细的内表面非常光滑的玻璃毛细管。当 X 光以小于玻璃材料的外全反射临界角  $\theta_c$  的掠射角入射到直 X 光导管时,它将以很高的反射率经多次反射从导管的入射端传输到出射端从而提高了出端的 X 光功率密度。对于弯曲导管,只要始终保持反射时的掠射角小于  $\theta_c$ ,其传输效率仍然很高。如图 1 所示,X 光束平行导管中轴线入射到 X 光导管内,通过建立合适的坐标系,导管内表面的曲面方程表示为:

$$(\sqrt{x^2 + y^2} - R)^2 + z^2 = r^2 \quad (1)$$

式中: $R$ ——弯曲导管的曲率半径;

$r$ ——导管的内半径。

则掠射角  $\theta$  的最大值  $\theta_{\max}$ :

$$\sin\theta_{\max} = 2\sqrt{r/R}/(R+r) \quad (2)$$

在  $r/R \ll 1, \theta_c \ll 1$  条件下,  $\theta_{\max} \approx 2\sqrt{r/R}$ 。

如果  $\theta_{\max} \leq \theta_c$ ,则进入导管的 X 光全能顺利通过导管,即

$$\gamma = R\theta_c^2/4r \geq 1 \quad (3)$$

否则会出现进入导管的 X 光不能全部顺利通过导管,即会出现进入导管的部分 X 光,由于掠射角  $\theta > \theta_c$ ,而不被反射。式(3)表明导管  $R$  越大,  $r$  越小, X 光波长越长(即  $\theta_c$  大),越有利于 X 光的传播,这在文献<sup>[7]</sup>中得到实验验证。

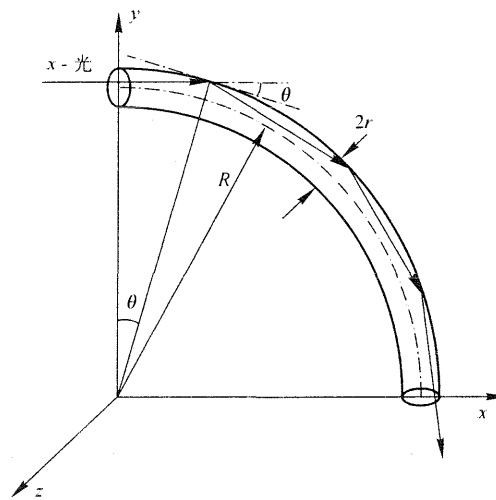


图 1 X 光平行入射弯曲导管

## 2 X 射线聚束透镜设计

X 光透镜主要结构参数示意图如图 2 所示。在集束 X 光导管群中,除中心导管是直导管外,其余 X 光导管都以它为中心向外层排列,每一层光导管的曲率半径均相同,且顺序向外层逐渐缩小。X 射线点光源位于透镜系统的前焦点上(焦距为  $f_1$ ),后焦点即为接收 X 光

聚焦能量的位置。这里为了方便起见我们讨论系统对称情形 ( $f_1 = f_2 = f$ ), 且假定 X 光导管的端部位于以  $f$  为半径的球面上, 每条 X 光导管的端部都与一段直导管相接。

如果层与层之间的导管紧密排列, 导管的内半径用  $r$  表示, 外半径用  $r'$  表示, 中心导管的长度为  $L$ , 则从中心算起, 第  $K$  层导管的辐射弯曲角为

$$\Phi_K = \frac{4r'}{f}K \quad (4)$$

该层导管弯曲部分的曲率半径为

$$R_K = \frac{L}{2\sin(2r'K/f)} \quad (5)$$

该层导管长度为

$$L_K = \Phi_K \times R_K + 2 \times f \times [\csc(2r'K/f) - 1] \quad (6)$$

按照这种设计, 第  $K$  层共有导管  $6K$  根, 如果透镜共有  $m$  层导管, 那么组成透镜的导管总根数为:

$$M = 1 + \sum_{K=1}^m 6K = 1 + 3m(m+1) \quad (7)$$

对于理想的各向同性的 X 射线源, 输出功率为  $W$  时, 每条 X 光导管所得到的辐射能量为

$$W_0 = W(r/f)^2/4 \quad (8)$$

则在透镜输入端总输入能量为:

$$MW_0 = W(r/f)^2[1 + 3m(m+1)]/4 \quad (9)$$

在透镜的输出端得到的总能量为:

$$W_{out} = \eta MW_0 = \eta W(r/f)^2[1 + 3m(m+1)]/4 \quad (10)$$

式中:  $\eta$ ——整个系统的 X 射线传输系数, 表示 X 射线聚束透镜对 X 射线的传输效率。

透镜焦点处的束斑半径为  $r + f\bar{\omega}$ , 由光线离开每条导管时的出射离散角  $\bar{\omega}$  决定,  $\bar{\omega}$  值显然不大于全反射临界角  $\theta_c$ , 透镜所会聚的 X 射线能量密度为

$$\rho = \eta W(r/f)^2[1 + 3m(m+1)]/[4\pi(r + f\bar{\omega})^2] \quad (11)$$

我们研制的软 X 射线聚束透镜, 由 1 387 根内直径为 0.45 mm、外直径为 0.60 mm 的 X 光管组成, 分 21 层排布, 辐射弯曲最大角为 28.9°。透镜中心长度为 400 mm, 焦距为 50 mm, 光源与汇聚焦点距离为 500 mm, 其实物图如图 3 所示。

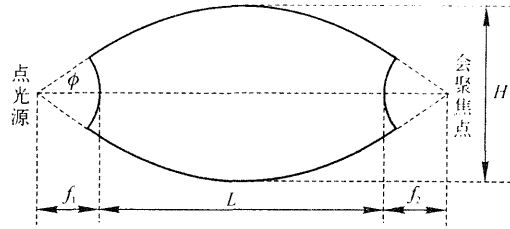


图 2 X 光透镜结构参数示意图

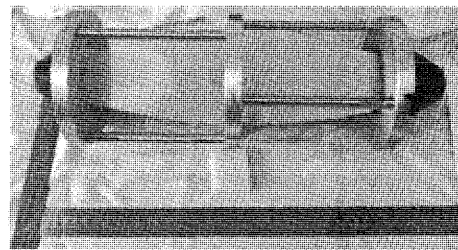


图 3 软 X 射线聚束透镜实物图

### 3 软 X 射线聚束透镜特性研究

利用激光等离子体辐射源对研制的软 X 射线聚束透镜特性进行了实验研究,实验设计如图 4 所示,从激光器发出脉冲激光束,经过透镜聚束后,聚焦到真空靶室中的金属靶表面上,在激光焦点处产生等离子体并辐射软 X 射线,软 X 射线聚束透镜将发散的 X 射线束聚焦到其后焦点处,探测系统测量聚束后的软 X 射线能量以及强度分布。

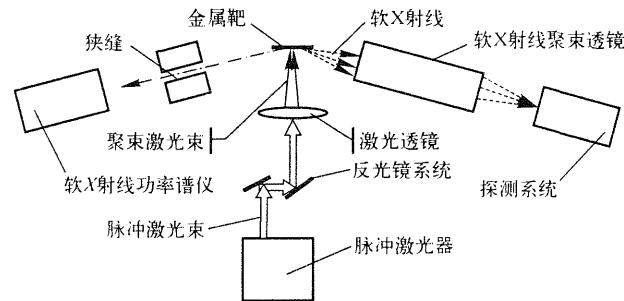


图 4 实验示意图

X 射线功率谱仪<sup>[8]</sup>测得激光等离子体辐射 X 射线能量为 46 mJ,利用公式可以计算出入射到透镜入射端口 X 射线能量为 0.32 mJ。在软 X 射线聚束透镜后焦点处测得出射 X 射线能量为 0.06 mJ。则透镜的整体传输效率为 18.6%。

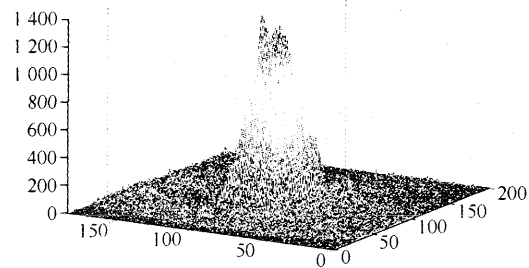


图 5 聚束光斑强度相对分布

CCD 成像系统<sup>[9]</sup>拍摄经软 X 射线聚束透镜聚束后软 X 射线光斑,图 5 为光斑强度的相对分布,束斑半径小于 1 mm。X

射线功率谱仪测得峰值功率为  $4.1 \times 10^3$  W,因此所获得的软 X 射线束功率密度为  $1.3 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>。

焦点处所获得的能量密度  $\rho = 1.91$  mJ/cm<sup>2</sup>;若不使用软 X 射线透镜,在此处所获得的密度为  $\rho_0 = 1.46 \times 10^{-3}$  mJ/cm<sup>2</sup>,因此其能量密度增益为  $\chi = \rho/\rho_0 = 1308$ 。

若不使用透镜,在距离光源 17.8 mm 处的 X 光束功率密度为  $1.3 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>,因此等效距离  $L_{eq} = 17.8$  mm,即使用透镜时在距离光源 500 mm 处所获得的射线功率密度同不使用透镜时在距离光源  $L_{eq}$  处获得的射线功率密度相等。

### 4 结 论

研制了性能优越的软 X 射线聚束透镜,与激光等离子体软 X 射线源组合,传输效率好于 18.6%,获得的软 X 射线功率密度为  $1.3 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>,能量密度增益达到 1308。那么随着等离子体辐射源辐射 X 射线强度的增加,利用软 X 射线聚束透镜与之耦合,可以获得干净的(除去等离子体产生的电子和离子等的污染)高强度宽能带 X 光束,达到甚至超过同

步辐射的光强,降低用光成本。这样高功率密度 X 射线束可以用作标定源,用于软 X 射线探测系统的相对标定,探测系统的非线性响应等研究。

以“强光一号”加速器为例,其辐射的软 X 射线功率为  $1\sim 2\text{ TW}^{[10]}$ ,将软 X 射线聚束透镜与之耦合,在焦点处获得的 X 射线功率密度可以达到  $0.5\text{ TW/cm}^2$ ,可为在该装置上开展 X 光辐射运输、辐射烧蚀等重要物理研究提供辐照条件。随着加速器驱动能力的增强,我们甚至可能采用聚束的方式收集 Z-Pinch 辐射加热次级黑腔,同 Z-Pinch 驱动黑腔相比,可以成量级减小体积,有效降低黑腔能量漏失。

### 参 考 文 献

- 1 Komakhov M A, Komarov F F. Multiple reflection from surface X-ray optics[A]. Physics Reports[C], 1990, 5: 289
- 2 颜一鸣,赫业军,丁训良,等. X 射线光学的新成就——X 光透镜及其应用. 自然科学进展, 2000, 11: 995
- 3 丁训良,梁炜,颜一鸣. 使用 X 光透镜的 XRF 谱仪的研究进展. 核技术, 1996, 19: 164
- 4 丁训良,赫业军,颜一鸣. X 光透镜在  $\mu$ -XRF 分析中的应用. 原子核物理评论, 1997, 14: 155
- 5 邬鹏举,李玉德,林晓艳,等. X 射线在毛细导管中传输的模拟计算. 物理学报, 2005, 54:4478
- 6 牛胜利,彭玉,王建国,等. X 光导管传输特性的蒙特卡罗模拟. 强激光与粒子束, 2004, 16:12
- 7 秦义,许泽平,李正宏,等. 软 X 射线光导纤维传输特性. 强激光与粒子束, 2006, 18: 913
- 8 蒋世伦,宁加敏,徐荣昆. Z-箍缩 X 射线辐射功率闪烁探测系统. 原子能科学技术, 2006, 40: 96
- 9 Zhang Faqiang, Li Zhenghong, Xu Zeping. X-ray observations of tungsten wire array Z-pinch implosions on QiangGuang-1 facility. Chinese Physics, 2006, 15: 2 058
- 10 XU Rongkun. Study of tungsten wire array Z-Pinch implosion on Qiang-Guang I facility. Chinese Physics, 2005, 8: 1 613