

利用轮胎镜对 X 光波段的光成像

冯贤平 徐至展 张正泉
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文首先从理论上分析, X 光学成像性质, 指出利用掠入式的方法对短波 X 射线进行成像的可行性, 并在实验上用轮胎镜及其组合镜具体地对激光产生的 X 光源进行几何成像试验, 得到了与理论分析相一致的结果, 实验结果肯定了上述方法在 X 光学成像上的适用性。

关键词: X 射线; 轮胎镜; 成像。

一、引 言

近年来, 由于军事、民用对 X 射线激光器和 X 射线显微镜等的迫切需要, 对 X 光学的研究又一次地被提到待研究的项目上来了。目前也提出了许多 X 光学成像设想, 如镀膜反膜法、晶体衍射法等^[2~4]。但由于目前在技术上还有相当困难。本文介绍一种掠入射的成像方案 其原理类似于前人提出的全反射法^[5, 6]。

首先在理论上对 X 光性质进行讨论, 然后分析了 X 光学的成像系统。在这个基础上, 利用自制轮胎镜及其组合件, 具体地对激光等离子体的 X 射线进行成像工作, 得到了与理论分析相一致的结果。

二、基本理论分析

X 射线的衍射或反射效率主要是取决于所用介质的折射率, 一般可写成复数形式^[6]为

$$N = n + i\gamma, \quad (1)$$

这里 n 是真实折射率, 它是波的相速度函数, γ 是一个衰减系数, 对于 X 射线, 折射率 n 一般是稍小于空气中折射率值^[6]。故它可写成

$$n = 1 - \delta, \quad (2)$$

其中 δ 是减小率。对于波长为 0.1 nm 的射线, δ 的量级一般是在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。在 X 射线区域, 由于减小率 δ 很小, 因此在实际上用透镜来成 X 光的像是不可能的。这是因为对于一块双凸薄透镜, 假设其二面的曲率半径是 R_1 和 R_2 , 那么镜的焦距是^[7]

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right], \quad (3)$$

这里 R_1 与 R_2 符号相反, 如果镜两面半径相同, 则有

$$\frac{|R|}{f} = 2\delta. \quad (4)$$

从上面(4)式可看出,如我们不考虑吸收,即镜不太厚,则当 R 是一个有理常数时,镜的焦距至少要达到几十到几百米程度。如要缩短焦距,方法之一是改小 R 值,这就意味着透镜孔径变小,厚度变大。方法之二是寻找一个 δ 大的而 γ 小的材料,然而,事实上参数 δ 与 γ 是有一定关联的,由文献[6]的理论计算表明:如果入射的 X 射线波长是远离于介质的吸收边时,衰减系数 γ 和减少率 δ ($0 < \delta < 1$) 分别近似表达为^[6]

$$\gamma \sim \lambda^4 N_e \alpha_0, \quad (5)$$

$$\delta \sim K \lambda^2, \quad (6)$$

$$K = \mu_0 \theta^2 N_e / 8\pi^2 m_e, \quad \left. \vphantom{\delta \sim K \lambda^2} \right\}$$

其中 m_e 、 N_e 、 e 分别为电子质量,电子密度和电子电荷, α_0 为一常数, μ_0 是自由空间磁导率, λ 是入射的 X 射线波长,当波长 λ 一定时,可看出参数 δ 、 γ 与电子密度成线性关系,由此得到 δ 与 γ 是二个互成正比的量。

为了克服上述折射率与吸收系数矛盾,可采用全反射成像方法,由于 X 射线在介质中传播时的折射系数小于 1,那么,在一定的条件下, X 光从真空向介质传播时一定会发生全反射现象,现假设 n_1 、 n_2 分别表示 X 光经过的二个不同区域的折射率值,如图 1 所示。 i_1 、 i_2 分别为入射角和折射角。发生全反射现象的阈值条件为

$$\sin i_1 = n_2 = 1 - \delta. \quad (7)$$

利用(6)式及 $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$, 则可得 X 光发生全反射时所要求的入射角 i_1 满足

$$i_1 = \arccos \left[e \lambda \left(\frac{N_e}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \frac{1}{2\pi c} \right], \quad (8)$$

式中 c 是光速, ϵ_0 是介电常数,当在实验中固定入射角 $i_1 = i_0$ 时,相应得到体系能发生全反射对应的最短波长

$$\lambda_{\min} = \frac{2\pi c}{e} \left(\frac{\epsilon_0 m_e}{N_e} \right)^{1/2} \cos i_0, \quad (9)$$

其实上述结果如我们不采用文献[6]的 δ 结果,而直接从等离子体物理中最基本折射率方程^[6]: $n = [1 - (\lambda^2 \theta^2 / 8\pi^2 e^2 \epsilon_0 m_e N_e)]^{1/2}$ 也能导出(9)式。

根据前面结果可看出,当入射的 X 光满足(8)式条件时,会发生全反射,但实际上,在极紫外和 X 射线波段,由于反射表面对入射光具有强烈的吸收、散射等。即使入射角满足全反射条件,反射率也不能达到 100%,如设镜表面均方根粗糙度是 σ , 则镜反射系数是^[6]

$$\eta = \exp[-(4\pi\sigma \cos \alpha / \lambda)^2], \quad (10)$$

由此近似可得散射

$$\xi = (1 - \eta) \approx (4\pi\sigma \cos \alpha)^2 / \lambda^2. \quad (11)$$

由于 X 光波长 λ 很短,故只要有一定的 σ 存在,散射影响就很大。所以,在进行 X 光成像实验中,一方面要求光学元件要有极高的光洁度,另一方面须正确选择入射角和色散元件表层

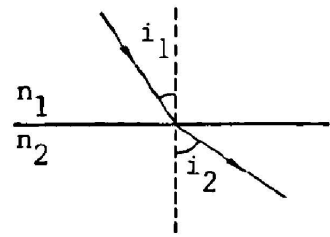


Fig. 1 Light transmitted at different interface

的反射材料。从文献[10]式可知，应尽量选择高电子密度的材料。表给 1 出各种常用的材料的电子密度 N_e 和极限波长 λ_{min} 关系。由表 1 可知，在 X 波段区，镜面材料以金、铂等为好。图 1 给出了金铂在不同入射角下的各波长的实际反射率^[9]。从图 2 可看出，对于极紫外线要得到较好的反射值其入射角只有当接近 $(\pi/2)$ 时才能满足。如对波长是 120 Å，入射角小于 80° 度时，反射系数就明显下降，而对长波，几乎在任何情况下都具有较高的反射率。

Table 1 The relationship between λ_{min} and electronical density of material

material	C	glass	Al	AlO	Ag	Au	Pt	Ir	
$N_e(\text{cm}^{-3})$	57	78	73	115	276	466	514	542	$\times 10^{22}$
$\lambda_{min}(\text{Å})$	447	379	379	312	201	154	147	143	$\times \cos i_0$

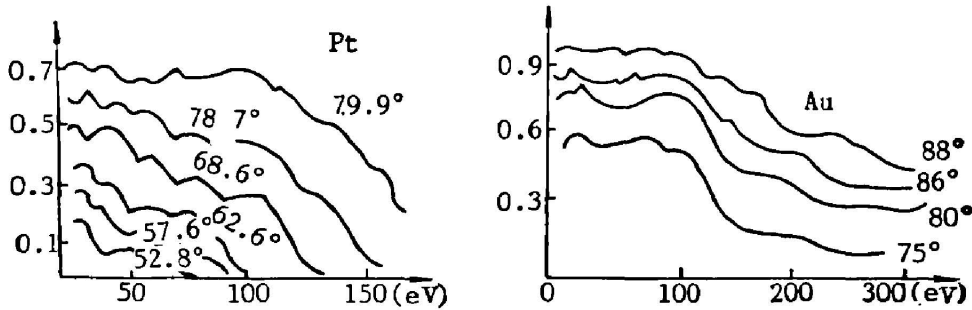


Fig. 2 The relationship between angle of ray incidence and coefficient of reflection

三、光学成像系统分析

从上面分析知：采用镀金的凹面反射镜，能够有效地反射和会聚掠入射到镜面的 X 光线。但是，由于光束是远离光轴入射到镜面的，故得到像的像散比较严重。由像散的普遍公式^[11]在 $\sin \alpha \approx \sin \beta \approx 1$ ，子午面上无曲率的情况下，可近似地得到

$$l = h(\gamma + r)/r, \tag{12}$$

式中 h 是镜宽度， r 是源到镜的距离， r' 是像到镜的距离， l 是入射点源对应的成像长度。若 $r' > r$ ，则 $l > 2h$ ，显然像散是严重的。

为了克服像散的影响，考虑到不同曲面型的像散符号不同，适当地选配系统中各球面的曲率以及合理地确定有效光阑的位置等，就能得到对于视场角 ω 为某一定值的无像散差的光学系统。图 2 就是经本文适当安排下的一个无像差的光学系统，基本参数见表 2 所示。另外，用相同曲率半径的凹面光栅来代替图 2 顶端 G 处的凹面镜，同时根据光栅方程

$$d(\sin \beta - \sin \alpha) = K\lambda, \tag{13}$$

以及系统消像散条件^[10](具体符号见图 2 所示)

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{P} - \frac{1}{P'} &= \frac{2}{R \cos \varphi}, \\ \frac{1}{P} + \frac{1}{P'} &= \frac{1}{P} + \frac{1}{R \cos \alpha + P' - r_s} = \frac{2 \cos \varphi}{\rho}. \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

再恰当地增加和安排好狭缝，暗盒等位置，就做成了一个掠射式消像差的光栅光谱仪^[11]。

Table 2 Optical parameters for a stigmatic system

parameters of toroidal			
Meridional Radius	$R=3400\text{ mm}$	Angle of incidence on mirror	$\varphi_0=84.78^\circ$
Sagittal Radius	$\rho=30.5\text{ mm}$	Material in surperficies	Au
Dimension of model	$30\times 50\times 10\text{ mm}^3$	Surperfical area	$30\times 50\text{ mm}^2$
parameters of construction		parameters of curvature of mirror	
Width of slit	$\Delta l=24\text{ }\mu\text{m}$	Angle of incidence on mirror	87.418°
Height of the image on slit	$\Delta l'=1\sim 1.5\text{ mm}$	Radius of curvature of mirror	$R=999.6\text{ mm}$
Mirror-source distance	$P_1=387.4\text{ mm}$	Dimension of model	$10\times 25\times 30\text{ mm}^3$
Mirror-entrance-silt distance	$P'=194.1\text{ mm}$	Material in surperficies	Au
Image-entrance-silt distance	$P_0=90.6\text{ mm}$	Meridional aperture	$\omega_{11}=0.415\times 10^{-3}$
Magnification	$\alpha'=1$	Sagittal aperture	$\omega_1=0.137$

四、实验结果分析

图 4、图 6 分别是可见光、图 3 是等离子体软 X 光经轮胎镜的光学系统所成的像，其中图 4、图 5 是在子午面 t 附近的像，而图 6 是在弧矢面 S' 附近的像。从图 4 可看出，对于可见光 (He-Ne) 的点源对应的像散像较为清楚，像对比度高，背景的散射光很少，而从图 3 中表现出来的等离子体软 X 射线点源对应的像也较清楚，但背景上的散射光也非常之强，这由公式 (11) 散射系数 $\xi \sim (\sigma/\lambda^3)$ 与波长的关系很易解释上述现象。另外，比较图 4、图 5，还可发现短波像的一个奇怪现象，即像的下部杂光比上部强许多。经初步分析认为这种不对称分布并不是由系统的慧差所引起的现象。因为在全反射系统中，任何成像的参数都与折射率无关。因此，如系统存在慧差，那么无论对什么光波段都应有这个现象，但事实上 He-Ne 激光的像没有这现象。背景下部强区的杂光可能是由于等离子体源发射的软 X 射线一部分

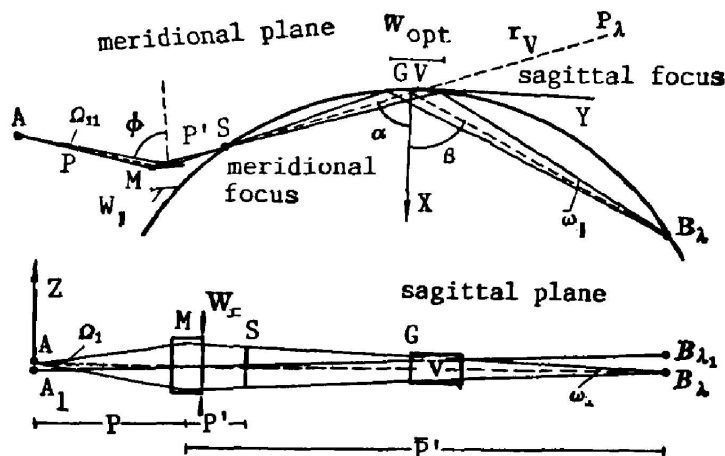


Fig 3 M—toroidal mirror; S—focal line of meridional plane; B—focal spot of system; V—concave mirror; A—source

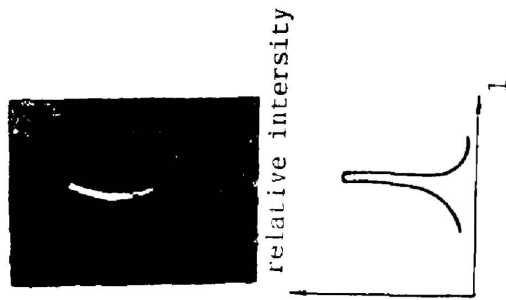


Fig. 4 Image of visible-ray source near meridional focal line (t)



Fig. 5 Image of X-ray source near meridional focal line (t)

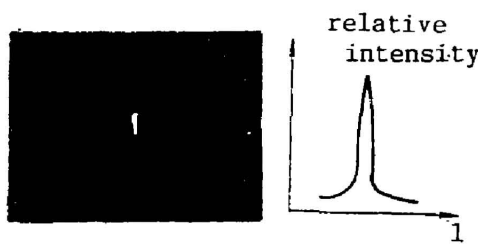


Fig. 6 Image of visible-ray source near sagittal focal line (S')

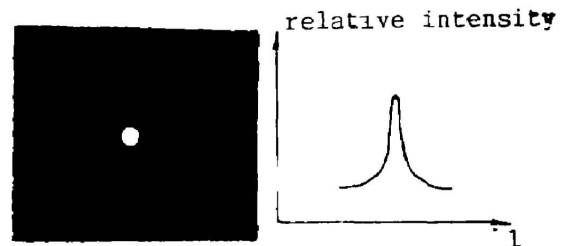


Fig. 7 Image of source near focal spot of system (B)

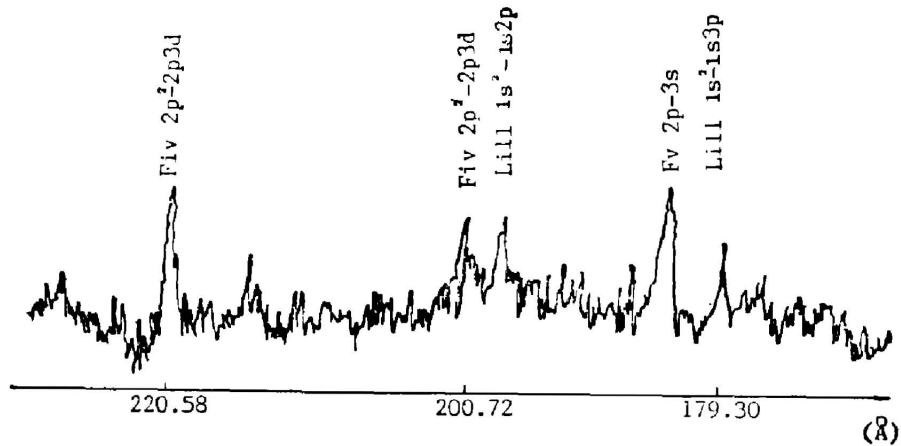


Fig. 8 Microdensitometer tracing from LiF spectrum

即没入射到反射镜又没被阻挡直接穿过铝泊入射到像下部所致。另外比较图 4、图 5 中的像还可发现它们大小有点差别,这主要是拍照时位置移动引起的,而图 5 中像的右侧有一亮斑是由于挡光铝泊(4000 \AA 厚)有砂眼而引起漏光所致。综合上述结果,不难发现虽然在照像过程中底片前放了厚为 4000 \AA 的铝泊,但从得到的极紫外波段的像还是很强的,这说明轮胎镜对软 X 射线的反射系数还是很高的,图 7 是利用图 3 的消像差光学系统拍摄到的点源像。图 8 是根据消像差原理和光栅方程,利用轮胎镜、光栅等元件组合成掠入式消像差光栅光谱仪拍摄到的 LiF 等离子体极紫外光谱。在拍摄谱时虽然用了 P-5F 型的底片,其对上述波段灵敏度较差,但从图 8 所得到的谱图可看出各谱线的信噪比还是很好的。在文献 [12] 中我们已对此谱进行较为详细的分析。

五、结 论

从上述的理论分析和实验结果表明, 利用轮胎镜对掠入射式 X 光进行成像的方案是可行的, 虽然其像差比较严重^[13], 但只要适当地组合系统中各光学元件, 就能克服这一缺点。掠入射式消像差光谱仪对软 X 射线成像和拍谱的成功, 有力地说明了这一点。另外, 它也为研制, 发展其他光学系统如 X 激光反射系统, X 显微镜系统提供了强有力的依据。

作者感谢赵世诚同志、周锦智同志和金仁山同志在本实验中所给予的许多帮助, 感谢范正修同志、余文炎同志、施正荣同志等在光学成像等分析中给出许多有益的意见。

参 考 文 献

- [1] C. D. Michelis *et al.*; *Nuclear Fusion*, 1981, **21**, No. 6 (Jun), 679~696.
- [2] B. Kursunglu *et al.*; *Progress in Laser and Laser Fusion*, (Plenum press, New York, 1975), Vol. 8, 147~269.
- [3] B. Я. 皮漫斯; 《细聚焦 X 射线管及其在结构分析中的应用》, (科学出版社, 1963), 5~40.
- [4] A. И. 杜德罗夫斯基; 《光学仪器》, (科学出版社, 1965), 330~349.
- [5] 项志遵, 俞昌旋; 《高温等离子体诊断技术》, (上海科学技术出版社, 1982), 176~179.
- [6] C. Bonnelle; *Advance in X-ray spectromy*, (Pergamon press Ltd, New York, 1982), 338~362.
- [7] 母国光, 战元令; 《光学》, (人民教育出版社, 1979), 16~35.
- [8] 徐家鸾, 金尚亮; 《等离子体物理学》, (原子能出版社, 北京, 1981), 296~333.
- [9] 私人通讯.
- [10] G. Tondello; *Opt. Acta*, 1979, **26**, No. 3 (Mar), 357~367.
- [11] 私人通讯.
- [12] 私人通讯.
- [13] M. Bron. E. Wolf; 《光学原理》, (科学出版社, 北京, 1978), 267~285.

Imaging X-ray source by using toroidal mirror

FENG XIANPING, XU ZHIZHAN AND ZHANG ZHENQUAN
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanis, Academia Sinica)

(Received 17 April 1987; revised 8 July 1987)

Abstract

We give a detailed theoretical analysis of X-ray optics and point out that it is possible to image X-ray source in grazing incidence manner. By using a toroidal mirror and a concave mirror, a picture of X-ray source from laser produced plasma was taken and same results were consistent with theoretical analysis. The experimental result shows that this method is applicable to X-ray optics.

Key words: X-ray; toroidal mirror; imaging.