

# 软 x 射线平场光谱仪系统的优化设计<sup>\*</sup>

刘运全 张 杰 陈正林 彭晓昱

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

(2003 年 5 月 20 日收到, 2003 年 7 月 13 日收到修改稿)

采用光线追踪和光路函数的方法, 优化设计了具有超环面镜的前置光学系统的掠入射软 x 射线平场谱仪, 得到了谱仪的谱分辨和空间分辨本领. 波前像差理论和光线追踪程序得到结果均表明, 优化设计后的软 x 射线平场谱仪系统在波长为 4—45 nm 的光谱范围内具有很好谱分辨能力( $\lambda/\Delta\lambda > 1000$ )和空间分辨能力(优于  $40\mu\text{m}$ ).

关键词: 软 x 射线平场谱仪, 光路函数, 光线追踪

PACC: 5270L, 4230

## 1. 引言

在强场物理<sup>[1]</sup>、实验室天体物理<sup>[1]</sup>、x 射线激光<sup>[2]</sup>、空间等离子体诊断<sup>[3]</sup>、高次谐波<sup>[4]</sup>以及强激光驱动的惯性约束核聚变<sup>[5]</sup>的实验研究中, 会观察到丰富的软 x 射线辐射谱, 这些谱线携带了激光等离子体或者空间等离子体的大量信息, 这些信息可以为人们进一步认识等离子体的性质提供了必要参数. 对于这些谱线的测量, 传统软 x 射线谱仪要求入射狭缝、光栅和探测器严格按照罗兰圆安放, 因此平面接收的探测器诸如电荷耦合器 (CCD)、微通道板、以及条纹相机等无法与之很好地耦合. 为了能够与这些平面接收探测器相匹配, 可以采用机械刻化的球面变栅距平场光栅来制造软 x 射线光谱仪. 这种光栅可以把色散后的软 x 射线聚焦于一个平面, 解决了与平面探测器的耦合问题, 而且通过设计闪耀角的方式, 提高了一级衍射效率. 软 x 射线平场谱仪正是由于其独有的优势, 在激光等离子体诊断领域起着重要的作用.

为了增加反射效率, 软 x 射线谱仪一般采用掠入射方式, 而掠入射大大减少了光栅的接收效率, 因此可以采用取消狭缝的办法来提高接收效率<sup>[6]</sup>, 但是这样会增加平场谱仪在成像平面的像散, 而且测量范围较小<sup>[7]</sup>. 这是因为在掠入射条件下, 非理想点源通过凹面光栅在子午面上和弧矢面上的聚焦位置

有所不同, 于是人们通过加入合适的前置光学系统来补偿像散. 采用在平场光栅前面放置柱面镜的办法虽然可以提高软 x 射线的接收效率, 但并不能够补偿像散. 在我们设计的平场谱仪中, 在光栅前面增加了前置光学系统——超环面镜 (轮胎镜) 和狭缝. 由于轮胎镜具有在子午面和弧矢面上不同的曲率半径, 可以在子午面和弧矢面上分别聚焦. 这样的前置光学系统可以很好地补偿由于掠入射造成的像散<sup>[8,9]</sup>, 而且大大地增加了 x 射线的接收立体角. 通过选择合适的轮胎镜参数, 还可以使系统具有空间分辨能力, 谱仪系统的空间分辨能力对等离子诊断有着重要意义<sup>[10]</sup>. 我们将用光路函数和光线追踪的方法优化设计软 x 射线平场谱仪系统, 分析谱仪的谱分辨和空间分辨能力, 并设计了光线追踪程序进一步优化分析平场谱仪的结构参数.

## 2. 谱仪原理和基本结构

我们设计的软 x 射线平场谱仪系统主要由超环面镜 (轮胎镜)、狭缝、变栅距平场光栅、x 射线 CCD 以及相应的真空系统组成, 其结构如图 1 所示, 优化的结构参数如表 1 所示. 轮胎镜具有子午面和弧矢面上不同的曲率半径. 在子午面上, 激光等离子体源发出的软 x 射线通过轮胎镜收集后反射成像于狭缝 (狭缝宽度为  $50\mu\text{m}$ ), 透过狭缝后, 再经过平场光栅色散于焦平面上, 实现谱分辨; 在弧矢面上, 源发出

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 19974074, 60108007)、国家高科技惯性约束聚变主题 (批准号: 863-416) 和国家重点基础研究专项经费 (批准号: G1999075200) 资助的课题.

的软 x 射线经轮胎镜收集,通过狭缝后,成像于距平场光栅中心为  $r_{s2}$  处,这个像对于平场光栅来说是虚像,然后通过平场光栅成像于焦平面.这样软 x 射线

谱仪系统,在平场光栅的焦平面上可以获得软 x 射线的谱分辨,同时实现了空间分辨.

图1中的各个参数需满足条件<sup>[9,11,12]</sup>(1)–(5)

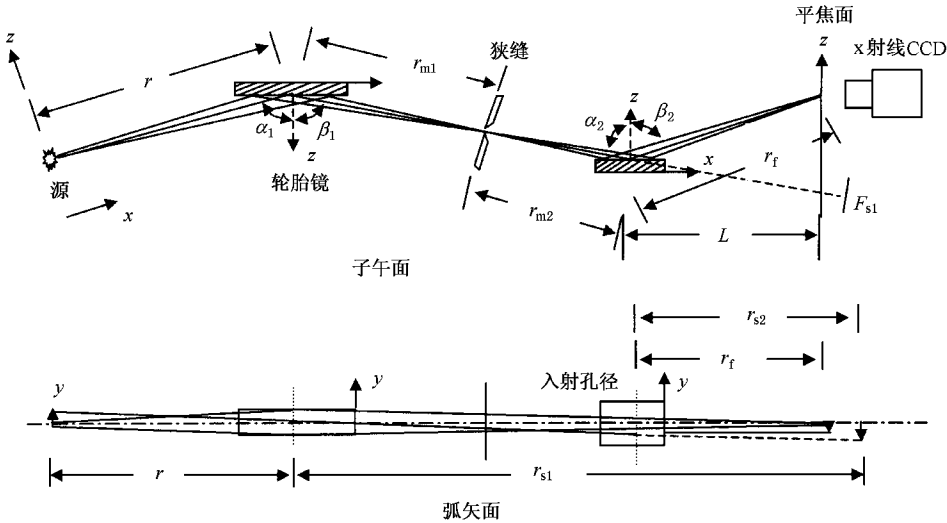


图 1 软 x 射线谱仪结构示意图

表 1 软 x 射线平场谱仪系统的结构参数

轮胎镜	平场光栅
弧矢面曲率半径 $\rho_1 = 47.6\text{mm}$	入射角 $\alpha_2 = 87^\circ$
子午面曲率半径 $R_1 = 5194\text{mm}$	中心刻线密度 $\sigma_0 = 1200\text{ line/mm}$
入射角 $\alpha_1 = 86.3^\circ$	闪耀角 $\delta = 3.2^\circ$
源与轮胎镜距离 $r = 816.9\text{mm}$	光栅控制参数 $b_2 = 20, b_3 = 4.558 \times 10^2, b_4 = 1.184 \times 10^4$
子午面像点与轮胎镜距离 $r_{m1} = 208\text{mm}$	曲率半径 $R_2 = 5469\text{mm}$
弧矢面像点与轮胎镜距离 $r_{s1} = 685\text{mm}$	狭缝与光栅距离 $r_{m2} = 237\text{mm}$
轮胎镜面尺寸 $150\text{mm} \times 25\text{mm}$	弧矢面上源与光栅之间距离 $r_{s2} = 240\text{mm}$
狭缝宽度 $S = 50\mu\text{m}$	光栅顶点与焦平面垂直距离 $L = 235\text{mm}$
	消色散波长 $\lambda_{\text{central}} = 10.0\text{nm}$
	光栅刻纹尺寸 $50\text{mm} \times 30\text{mm}$

式,其中(1)式是 x 射线源通过轮胎镜成像于狭缝的条件,即子午面上的成像关系,(2)式是弧矢面上的成像关系.为了补偿由于掠入射造成的像散,弧矢面上的焦点需要满足条件(3).该系统设计的消像散波长为 10nm.(4)式为光栅方程.轮胎镜到狭缝的距离  $r_{m1}$ ,狭缝到光栅的入射距离  $r_{m2}$ ,以及  $r_{s2}$  和弧矢面的焦距  $r_{s1}$  满足关系式(5).  $R_1$  和  $\rho_1$  分别为轮胎镜子午面上和弧矢面上的半径,我们采用  $R_1 = 5194\text{mm}$ ,  $\rho_1 = 47.6\text{mm}$ ,光栅焦面位于光栅后 235mm 处,这样得到  $r_{s1} = 685\text{mm}$ .

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r_{m1}} = \frac{2}{R_1 \cos \alpha_1}, \tag{1}$$

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r_{s1}} = \frac{2 \cos \alpha_1}{\rho_1}, \tag{2}$$

$$r_{s2} = \frac{R_2 L}{L(\cos \alpha_2 + \cos \beta_2) - R_2 |\sin \beta_2|}, \tag{3}$$

$$\sin \beta_2 = -\sin \alpha_2 + \frac{m \lambda}{\sigma_0}, \tag{4}$$

$$r_{s1} = r_{m1} + r_{m2} + |r_{s2}|. \tag{5}$$

3. 软 x 射线平场谱仪的优化分析

3.1. 光路函数方法

我们分别用光路函数和光线追踪程序对谱仪系统进行分析,并综合这两种方法,获得了谱仪的优化

参数. 光路函数的方法是 Harada 等人<sup>[13]</sup> ,在设计平场光栅时 ,采用的一种方法 .如图 2 ,平场光栅的光

路函数 ,可以表示为

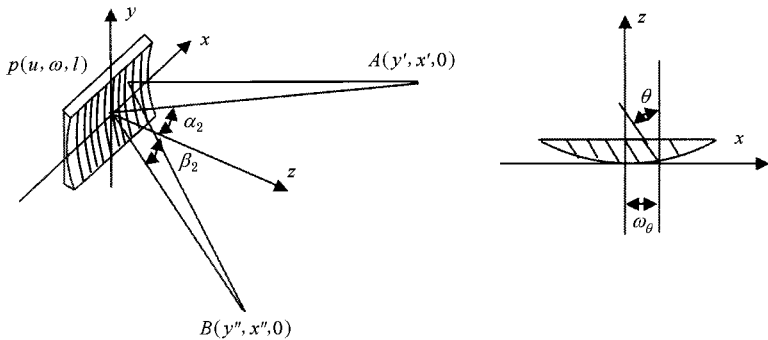


图 2 光栅示意图

$$F = Ap + pB + nm\lambda , \quad (6)$$

这里

$$n = \frac{1}{\sigma_0} \left( \omega_\theta + \frac{b_2}{R_2} \omega_\theta^2 + \frac{b_3}{R_2^2} \omega_\theta^3 + \frac{b_4}{R_2^3} \omega_\theta^4 \right) .$$

这样光路函数展开后为

$$\begin{aligned} F = & r + r + \omega F_{10} + \omega^2 F_{20} + l^2 F_{02} + \omega^3 F_{30} \\ & + \omega l^2 F_{12} + \omega^2 l^2 F_{22} + \omega^4 F_{40} \\ & + \omega^2 l^2 F_{22} + l^4 F_{04} + O(\omega^5) , \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $F_{ij}$  表示为

$$\begin{aligned} F_{10} = & -\sin\alpha_2 - \sin\beta_2 + \frac{m\lambda}{\sigma_0} , \\ F_{20} = & \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2\alpha_2}{r_{m2}} - \frac{\cos\alpha_2}{R_2} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2\beta_2}{r'_f} - \frac{\cos\beta_2}{R_2} \right) \\ & + \frac{m\lambda}{\sigma_0} \left[ \frac{1}{R_2} \left( b_2 - \frac{\tan\theta}{2} \right) \right] , \\ F_{02} = & \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{m2}} - \frac{\cos\alpha_2}{R_2} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r'_f} - \frac{\cos\beta_2}{R_2} \right) \\ & - \frac{m\lambda}{\sigma_0} \frac{\tan\theta}{2R_2} , \\ F_{30} = & \frac{1}{2} \frac{\sin\alpha_2}{r_{m2}} \left( \frac{1}{r_{m2}} - \frac{\cos\alpha_2}{R_2} \right) \\ & + \frac{1}{2} \frac{\sin\beta_2}{r'_f} \left( \frac{\cos^2\beta_2}{r'_f} - \frac{\cos\beta_2}{R_2} \right) \\ & + \frac{m\lambda}{\sigma_0} \frac{1}{R_2^2} (b_3 - b_2 \tan^2\theta) . \end{aligned} \quad (8)$$

由费马原理 ,光线方程须满足  $F_{ij} = 0$  .其中  $F_{10} = 0$  ,为光栅方程 , $F_{20}$  表示光线在焦平面的聚焦情况 , $F_{02}$  , $F_{30}$  分别与光栅的像散和慧差有关 .设计谱仪时不可能使所有的像差系数都为 0 ,通常先考虑满足焦平面的条件 ,即  $F_{20} = 0$  ,然后通过选择合适的控制参数  $b_3$  , $b_4$  ,可以尽量减小高阶像差 .如图 3

所示 ,入射距离为 237mm 时 ,焦平面上几种波长谱线的聚焦情况 ,可以看出为了能够测量 4—45nm 范围的谱线 ,平场光栅最佳入射角度为  $87^\circ$  ,光栅中心到焦平面的最佳距离为 235mm .

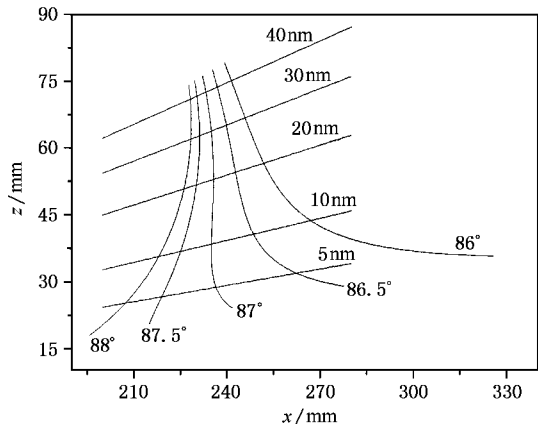


图 3 入射距离为 237mm、不同入射角几种波长在焦平面附近聚焦情况

虽然平场光栅在设计过程中考虑尽量使各个  $F_{ij} = 0$  ,以减小小像差 ,但实际的装配过程中 ,总难免有误差 ,李英骏等证明了不同的入射距离  $r_{m2}$  对光栅焦平面聚焦情况影响不大<sup>[14]</sup> .而不同的入射距离下 ,为了焦面达到平场 ,入射角要稍微地改变 ,系统的像散和慧差系数大小也相应地改变 .

轮胎镜 (超环面镜) 是一种特殊的 x 射线成像和聚焦镜 ,它具有子午面和弧矢面上不同的曲率半径 ,在子午面上和弧矢面上可以分别聚焦 ,其成像特征由 (1)(2) 式确定 .如图 1 .轮胎镜的几何方程可以由

$$\begin{aligned} k = & \frac{1}{2R_1} \omega^2 + \frac{1}{2\rho} l^2 + \frac{1}{4R_1^2 \rho} \omega^2 l^2 \\ & + \frac{1}{8R_1^3} \omega^3 + \frac{1}{8\rho^3} l^4 \end{aligned} \quad (9)$$

近似描述<sup>[15]</sup>. 轮胎镜的光路函数展开是很复杂的数学处理过程, 可以做类似于平场光栅光路函数的方法, 得到

$$\begin{aligned} F_{10} &= -\sin\alpha_1 - \sin\beta_1, \\ F_{20} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2\alpha_1}{r} - \frac{\cos\alpha_1}{R_1} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2\beta_1}{r_{ml}} - \frac{\cos\beta_1}{R_1} \right), \\ F_{02} &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos\alpha_2}{\rho} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{sl}} - \frac{\cos\beta_1}{\rho} \right), \\ F_{30} &= \frac{1}{2} \frac{\sin\alpha_1}{r} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos\alpha_2}{R_1} \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\sin\beta_1}{r_{sl}} \left( \frac{\cos^2\beta_1}{r_{sl}} - \frac{\cos\beta_1}{R_1} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $F_{20}$ ,  $F_{02}$  以及  $F_{30}$  分别与轮胎镜的子午面上焦线情况、弧矢面上焦线情况和轮胎镜所成像的慧差有关.

通过上面的分析得到了轮胎镜和光栅的光路函数描述, 光路函数对系统的成像特征和性能分析有着重要作用, 这也是进行光线追踪的前提. 我们将通过前面的讨论, 详细分析软 x 射线平场谱仪的光学系统结构, 通过光线追踪程序对结构参数进行优化.

### 3.2. 光线追踪

前面用光路函数方法分析了满足平场光栅的最佳入射条件和聚焦条件, 并通过类比的近似方法分析轮胎镜的光路函数. 从结构示意图可以看出, 由于在光栅前面增加了前置光学系统, 这样的软 x 射线谱仪是平面对称系统, 而不是旋转对称的, 还可以采用波前像差理论(wav-front aberration theory)分析系统的性能<sup>[8, 11, 12]</sup>, 这里我们做了波前像差理论与光线追踪结果的比较.

由于材料对 x 射线有着很强的吸收, x 射线成像系统的光学元件, 都采用掠入射方式. 掠入射方式存在一个截止角  $\theta_c^{[16]}$ , 由式  $\theta_c = 1.6 \times 10^5 \lambda \rho^{1/2}$  估计,  $\lambda$  为入射波长, 单位为 cm,  $\rho$  为材料密度, 单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ . 在软 x 射线波段, 掠入射角为  $1^\circ$ — $4^\circ$  范围时, 系统中轮胎镜和光栅对软 x 射线的反射率都是很高的, 所以我们假定光线服从反射和衍射定律, 不考虑像材料吸收这样边界条件的影响. 对于平场光栅的衍射, 不考虑光栅的衍射效率(即不考虑 0 级和高级衍射), 只考虑一级衍射. 通过轮胎镜和平场光栅的光路函数, 我们就可以得到光线的反射和衍射方程. 该光线追踪程序主要考虑以下几个方面: 第一, 在这里我们认为 x 射线源为点源, 其能量分布各向同性; 第二, x 射线源通过前置光学系统在狭缝处

所成像的形状以及狭缝尺度对谱线特征的影响; 第三, 在我们设计的光线追踪程序中, 考虑了点源在子午面和弧矢面上移动若干距离对成像面的影响, 进而分析对系统谱分辨和空间分辨的影响.

我们选择轮胎镜的掠入射角为  $3.7^\circ$ , 从源开始进行光线追踪. 谱仪系统中轮胎镜在子午面上相对于源的张角约为  $12\text{mrad}$ , 在弧矢面上相对于源的张角约为  $30\text{mrad}$ , 轮胎镜的接收立体角为  $3.6 \times 10^{-4} \text{sr}$ . 我们分别用随机数的方法在轮胎镜接收立体角内产生 5000 条光线, 光线在方向角内满足高斯分布. 追踪这些光线得到点源在子午面上源经过轮胎镜所成的像, 发现在狭缝处像是弯月状的, 如图 4, 所以在调整光路时, 应尽量使弯月状的像与狭缝相切(沿缝宽方向调节狭缝), 避免系统的散焦问题. 由 SHADOW 光线追踪程序, 可以发现线源在弧矢面上有所偏离时, 狭缝处的像变化不大<sup>[17, 18]</sup>. 狭缝的尺寸不仅影响谱线的谱分辨率, 而且进一步影响着系统的接收立体角. 由如图 4, 点源在狭缝处的像宽度不超过  $100\mu\text{m}$ , 在满足一定光通量的条件下, 可以采用不同尺寸的狭缝. 对于采用  $50\mu\text{m}$  狭缝的系统, 软 x 射线光通量约采用  $100\mu\text{m}$  狭缝系统的  $2/3$ , 狭缝影响的谱分辨可以提高一倍. 系统的谱分辨可以由  $\Delta\lambda = \sigma_0 S \cos\alpha_2 / (mr_m)$  估算, 对于  $S = 100\mu\text{m}$  的狭缝, 衍射级数  $m = 1$  时, 谱分辨为  $1.85 \times 10^{-2} \text{nm}$ , 可以看出减小狭缝宽度能够提高系统谱分辨. 关于光栅的谱分辨能力, 我们可以由  $d\lambda/dz = \sigma_0 \cos\beta_2 \sin^2\beta_2 / (mL)$  计算<sup>[11]</sup>. 对于  $10\text{nm}$  的谱线, 焦平面上的谱分辨为  $5.7 \times 10^{-3} \text{nm}$ . 因此在满足一定光通量的条件下, 为了狭缝影响的系统谱分辨能力与光栅分辨能力相匹配, 可以得到较合适的狭缝宽度约为  $30$ — $50\mu\text{m}$ .

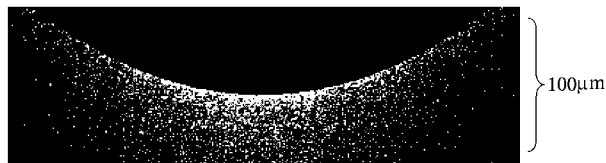


图 4 源在弧矢面内于狭缝处的像

我们选择的变栅距平场光栅刻线面积大小为  $50\text{mm} \times 30\text{mm}$ , 栅距变化范围为  $0.66$ — $0.99 \mu\text{m}$ , 表征线密度为  $1200/\text{mm}$ . 这样透过狭缝的光线入射到光栅的不同位置上, 光栅方程有所不同, 但影响不大. 光线追踪得到几条谱线在谱平面的像(图 5), 可以看出狭缝处像弯曲的影响是可以消除的. 通过光线

追踪还可以发现系统的空间分辨随波长变化不大，在测量范围内，当源位于设计位置时谱线空间分辨方向的 FWHM 为  $(35 \pm 4) \mu\text{m}$ 。可以通过光线追踪发现谱线宽度随波长有一定的变化，在系统消像散波

长 10nm 附近，谱线宽度约为  $10 \mu\text{m}$ ；当波长大于 30nm 时，由于弧矢面上的球差增大较快，谱线宽度也增大，但不超过  $20 \mu\text{m}$ 。由波前像差理论<sup>[8]</sup>，子午面上像的宽度（谱分辨方向）和弧矢面上像的长度（空

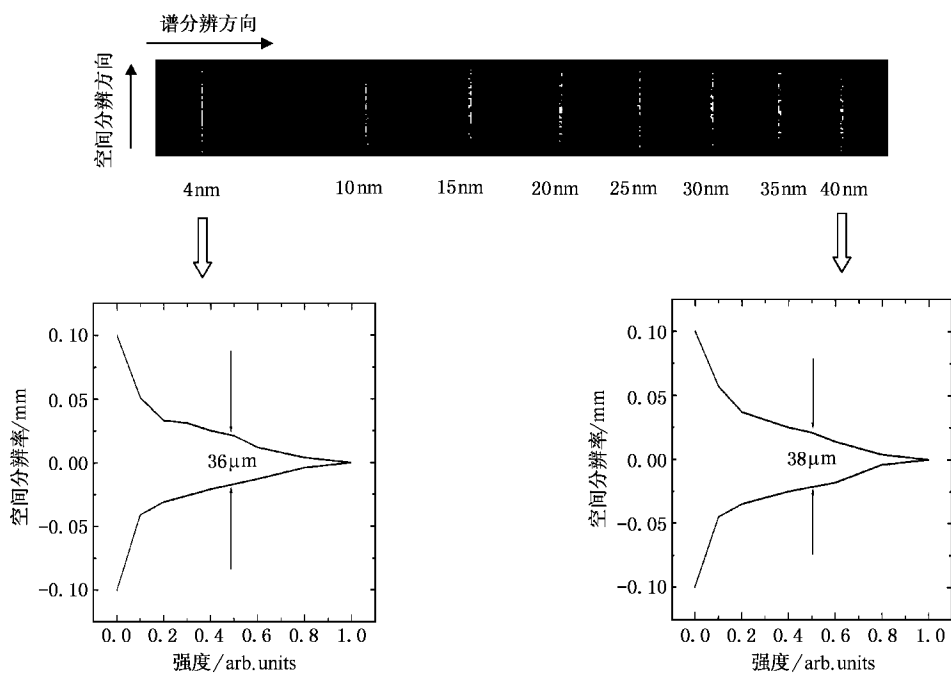


图 5 光线追踪得到典型谱线在焦平面的像和空间分辨方向的强度分布

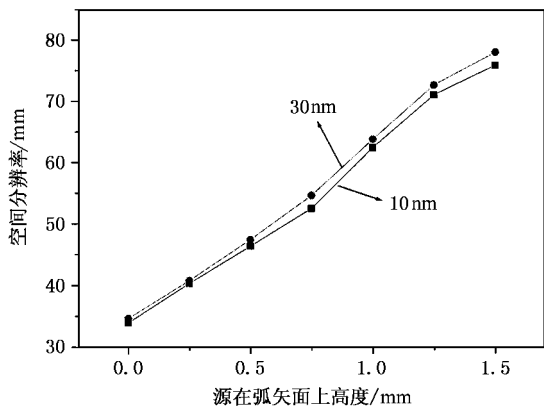


图 6 谱仪的空间分辨与源在弧矢面上的高度关系(狭缝宽度  $50 \mu\text{m}$ )

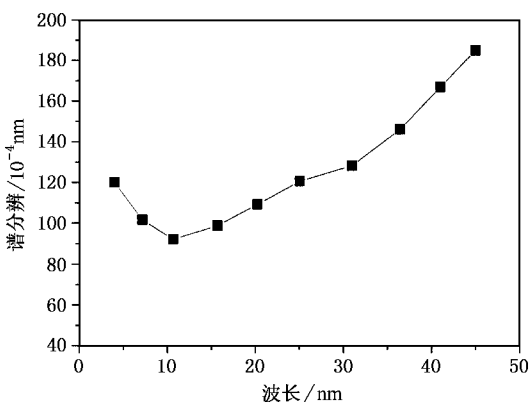


图 7 系统的谱分辨(狭缝宽度  $50 \mu\text{m}$ )

间分辨方向)，分别由式  $\Delta\xi'' = 3r'_f W_{300}/(2X_2 \sin\beta_2 \cos\beta_2)$  和  $\Delta\eta'' = -2r'_f W_{120}/Y_2$  计算， $X_2, Y_2$  分别为光栅对应系统出射光瞳的空间尺寸(该平场谱仪系统  $X_2 = 16.6 \text{mm}, Y_2 = 0.28 \text{mm}$ )，与我们用 SHADOW 光线追踪程序结果是一致的。实际上软 x 射线 CCD 测量到的谱线像与很多因素有关，包括狭

缝的尺寸、系统的像差、及 CCD 的像源大小。对于 10nm 的谱线， $50 \mu\text{m}$  狭缝像在谱平面的 FWHM 约为  $14 \mu\text{m}$ ，系统在 10nm 谱线位置的像差约为  $10 \mu\text{m}$ ，我们采用软 x 射线 CCD 的像源尺寸为  $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ ，所以系统实际测量到 10nm 谱线像在谱分辨方向的半高全宽应为  $21 \mu\text{m} \approx (14^2 + 10^2 + 13^2)^{1/2}$ ，对应的谱分

辨为  $1.16 \times 10^{-2} \text{ nm}$  ,这比理论值大了一些.

激光等离子体源是否偏离设计位置影响着系统的空间分辨、光通量和像差,实验过程中需要调节等离子体源与谱仪设计源的位置重合.我们通过光线追踪得到了源离开子午平面不同距离时,系统对 10nm 和 30nm 谱线的空间分辨(如图 6),以及源位于设计位置时系统的谱分辨(如图 7).通过光线追踪发现,只要源离开子午面不超过 1.5mm,在弧矢面内,沿着主光线方向移动距离不超过 20mm,离开垂直于主光线方向距离不超过  $80 \mu\text{m}$  时,透过狭缝的光线数减少不超过 30%,系统的空间分辨有一定的变化,但对谱分辨影响很小.

## 4. 结 论

本文详细讨论了由轮胎镜、狭缝、机械刻化平场光栅、软 x 射线 CCD 以及真空系统组成的软 x 射线平场光谱仪系统.由于该平场光谱仪的前置光学系统中轮胎镜具有子午面和弧矢面上不同的曲率半径,这样可以补偿掠入射造成的像散,实现软 x 射线源的空间分辨,而且增加了谱仪的接收立体角,大大提高了谱仪的摄谱范围.

通过光路函数以及光线追踪的方法对软 x 射线平场谱仪系统的优化过程,我们可以得到:

1. 系统在子午面上的放大倍数为  $r_{\text{ml}}/r = 0.255$  ,由于系统的  $r_{\text{sl}}$  变化小于 1%, $r_{\text{f}}$  的变化小于 4%,所以该平场谱仪系统空间分辨能力随波长变化较小.

2. 系统在弧矢面上放大倍数约为  $(r_{\text{sl}}/r) \times (r_{\text{sl}}/r_{\text{f}}) \approx 0.85$  ,弧矢面上的放大倍数影响源可以离开子午面最大距离<sup>[10,17,18]</sup>,所以这种结构减小了实验中对焦(等离子体源与谱仪系统设计的源重合调节)的难度.以前大多数平场谱仪结构采用  $r = r_{\text{ml}}$ <sup>[17,18]</sup> ,以减小狭缝处的像差,但这样会增加弧矢面上的像差.由于轮胎镜的刚性较强,采用  $r > r_{\text{ml}}$  的结构可以较好地设计超环面镜的子午面曲率半径.

3. 在测量范围内,当源离开子午面不超过 1.5mm 时,弧矢面内沿主光线移动距离不超过 20mm,垂直于主光线方向移动距离不超过  $80 \mu\text{m}$  ,谱分辨变化不大,谱线的空间分辨有一定的变化.

4. 该软 x 射线平场谱仪系统的测量范围为 4—45nm(光子能量范围 27.5—310eV),光谱分辨能力  $(\lambda/\Delta\lambda)$  大于 1000,采用  $50 \mu\text{m}$  狭缝的系统,在 10nm 谱分辨约为 0.0092nm.

[1] Zhang J. 1997 *Physics* **26** 643 (in Chinese) [张 杰 1997 物理 **26** 643]  
 [2] Zhang J *et al* 1997 *Science* **276** 1097  
 [3] McKenzie D E and Husson H S 1999 *Astrophysical Journal* **519** L000  
 [4] Luca Poletto and Glamplero Naletto 2001 *Opt. Eng.* **40** 178  
 [5] Tabak M *et al* 1994 *Phys. Plasmas* **5** 1966  
 [6] Li Y J *et al* 1998 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 409 (in Chinese) [李英骏等 1998 强激光与粒子束 **10** 409]  
 [7] Kita T *et al* 1983 *Appl. Opt.* **22** 512  
 [8] Chrisp M P 1983 *Appl. Opt.* **22** 1508  
 [9] Tondello G 1979 *Optica Acta* **26** 357

[10] Tondello G *et al* 1977 *Phys. Rev. A* **16** 1705  
 [11] Choi W *et al* 1997 *Appl. Opt.* **36** 1457  
 [12] Chrisp M P 1983 *Appl. Opt.* **22** 1519  
 [13] Harada T and Kita T 1980 *Appl. Opt.* **19** 3987  
 [14] Li Y J *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 863 (in Chinese) [李英骏等 2000 物理学报 **49** 863]  
 [15] Cocco D *et al* 2002 ray tracing lab  
 [16] Yoshimi Sakayyanagi 1976 *Optica Acta* **23** 1976  
 [17] Hyun-Joon Shin *et al* 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 4222  
 [18] Jaehoon Kim, Dong-Eon Kim 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 6062

# Optimization study of a soft x ray flat field spectrometer<sup>\*</sup>

Liu Yun-Quan   Zhang Jie   Chen Zheng-Lin   Peng Xiao-Yu

( *Laboratory of Optics of Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 ,China* )

( Received 20 May 2003 ; revised manuscript received 13 July 2003 )

## Abstract

Using ray tracing code and optical path function , optimization calculation is carried out on a grazing incidence soft x ray flat field spectrometer with toroidal mirror as prepositive optic system. We calculate the spectral and spatial resolution of the spectrometer system. The wave front aberration theory and ray tracing code indicate that the system has good spectral resolution (  $\lambda/\Delta\lambda$  ) better than 1000 and spatial resolution better than  $40\mu\text{m}$  in the spectrum range of 4—45nm.

**Keywords :** soft x ray flat field spectrometer , optical path function , ray tracing

**PACC :** 5270L , 4230

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 19974074 , 60108007 ) , and by National High Technology Inertial Confinement Fusion ( Grant No. 863-416 ) and the Special Foundation for State Major Basic Research of China ( Grant No. G1999075200 ).