

非点光源情况下平场光栅的成像研究 *

李英骏¹⁾ 杨建伦²⁾ 张 杰¹⁾

¹⁾(中国科学院物理研究所 北京 100080)

²⁾(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 成都 610003)

(1999 年 9 月 21 日收到 ;1999 年 10 月 28 日收到修改稿)

用光路追踪程序对具有一定尺度的光源通过变栅距凹面光栅后的成像情况进行了研究. 证明了对于非点光源, 在特定的实验安排下, 其焦面仍可以在一个平面内, 同时给出了对于不同入射距离的非点光源形成平焦面的波长范围. 结果还表明, 当光源尺度与入射距离之比小于 1:1000 时, 光源尺度的变化对焦面位置没有实质性的影响.

PACC : 0765 ; 0785 ; 4230

计算结果进行了总结.

1 引 言

随着强场物理^[1]、ICF^[2]和 X 射线激光^[3]等研究的进一步发展, 高温、高密度激光等离子体中许多相互作用机制的研究需要从实验中得到更多的激光等离子体的相关参数, 而来自于高温、高密度等离子体中的 X 射线谱提供了许多有关等离子体的重要信息^[4,5]. 在 X 射线谱的测量中, 掠入射平场谱仪由于其所具有的优势已成为 X 射线谱测量中一个重要的工具.

目前的掠入射软 X 射线平场谱仪, 由于入射狭缝的存在而大大降低了 X 射线的接收效率. 对此, 李英骏、张杰等^[6]已提出了通过取消入射狭缝来提高谱仪接收效率的方案, 并用几何光学近似的方法计算了取消入射狭缝后掠入射软 X 射线平场谱仪接收效率的提高值, 但是, 由于该文主要是对谱仪入射距离可变性进行了较深入的研究, 因此, 对于取消入射狭缝后光源尺度大小对于平焦面的影响和焦线宽度对成像的影响等并未做深入讨论. 本文从光路函数出发, 设计了一个光源尺度大小可变的变栅距凹面光栅光路追踪程序, 并以激光等离子体 X 射线发光源的典型尺度为条件, 计算了对应于不同入射距离和不同入射角情况下的聚焦曲线, 为今后的掠入射平场谱仪的设计提供了参数. 本文还讨论了光源尺度与入射距离之比对聚焦曲线的影响. 最后对

2 基本方程

利用 Harada 等^[7]的光路函数结果, 我们感兴趣的是光谱方向的聚焦条件. 因此, 只需对光路函数中与此有关的 F_{10} 和 F_{20} 项进行讨论. F_{10} 与 F_{20} 可以被表示为

$$F_{10} = C_{10} + [(m\lambda Y\sigma_0)M_{10}], \quad (1)$$

$$F_{20} = C_{20} + [(m\lambda Y\sigma_0)M_{20}]. \quad (2)$$

这里, C_{10} 和 C_{20} 是与传统等间距直线刻线相关的项, 而 M_{10} 和 M_{20} 是与变间距曲线刻线相关的像差修正项, σ_0 是光栅的刻线标称栅距. C_{ij} , C_{ij}' , M_{ij} 和 M_{ij}' 的直接表达式分别为

$$C_{10} = -\sin\alpha - \sin\beta, \quad (3)$$

$$M_{10} = 1, \quad (4)$$

$$C_{20} = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} \right) \quad (5)$$

$$M_{20} = \frac{1}{R} \left(b_2 - \frac{\tan\theta}{2} \right). \quad (6)$$

其中, r 为入射狭缝到光栅中心的距离; R 为光栅的曲率半径; r' 为光栅中心到平焦面的距离. 由以上各式不难看出: F_{10} 与光栅的色散有关, 将 C_{10} 和 M_{10} 代入, 可得

$$\sigma_0(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda, \quad (7)$$

即为通用的光栅色散关系, 而 F_{20} 与曲率半径、光源

* 国家自然科学基金(批准号 :1974074), 国家高技术研究发展计划和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(批准号 :99JS77.2.1ZK3301) 资助的课题.

到光栅中心的距离、成像点到光栅中心的距离、入射角及衍射角有关,为光谱方向的聚焦条件项; M_{20} 与光栅的刻线参数 θ 和 b_2 有关,对于一定的光栅其为固定值.在利用像差校正凹面光栅设计平场摄谱仪时,为了获得完整的点聚焦成像,必须满足以下条件:

$$\frac{\partial F}{\partial w} = 0, \frac{\partial F}{\partial l} = 0,$$

即

$$F_{ij} = 0. \quad (8)$$

在以上公式和要求条件的基础上,通过光路追踪程序对几种情况进行了计算.

3 计算结果和讨论

3.1 非点光源条件对聚焦曲面的影响

由于目前软 X 射线波段使用的凹面变栅距光栅主要是标称栅距 $\sigma_0 = (1/1200) \text{ mm}$, $M_{20} = 20/R$ 和 $R = 5649 \text{ mm}$ 的凹面变栅距光栅.因此,以此种光栅的基本参数为条件,我们计算了对应于不同入射距离、不同入射角的光谱方向聚焦曲线.对于光源尺度为 $300 \mu\text{m}$ 的典型情况,在入射距离 r 从 100 mm 到 1000 mm 的范围,得到了对应于不同入射角的聚焦曲线,其中入射距离 r 为 100 mm , 300 mm 和 1000 mm 的情况,如图 1 所示.

由图 1 可以看到,当光源不再视为点光源而具有一定的尺度时,在一定波段范围之内聚焦曲线的平焦场还是同样存在的,只是其测量波段范围和平场的坐标位置与点光源时有所不同而已.对于入射距离分别为 100 mm , 300 mm , 500 mm 和 1000 mm 情况下的不同平焦场的位置和入射角见表 1.

表 1 $R = 5649 \text{ mm}$, $\sigma_0 = (1/1200) \text{ mm}$ 的光栅对于不同入射距离形成平焦场的有关参数

r/mm	100	300	500	1000				
$\Delta\lambda/\text{nm}$	10— 40	25— 45	20— 35	10— 20	25— 40	20— 35	25— 40	15— 35
y/mm	234	229.5	232.8	239	230	233.2	230.1	233
$\alpha/(\text{°})$	2	2.5	3	3.5	3	3.5	3.5	4

由表 1 可见,虽然对于不同的入射距离,平焦场所对应的入射角和到光栅中心的距离有所不同.但是,在 100 mm — 1000 mm 的入射范围内,平焦场到光栅中心的距离 y 的变化差值在 5 mm 内改变.由

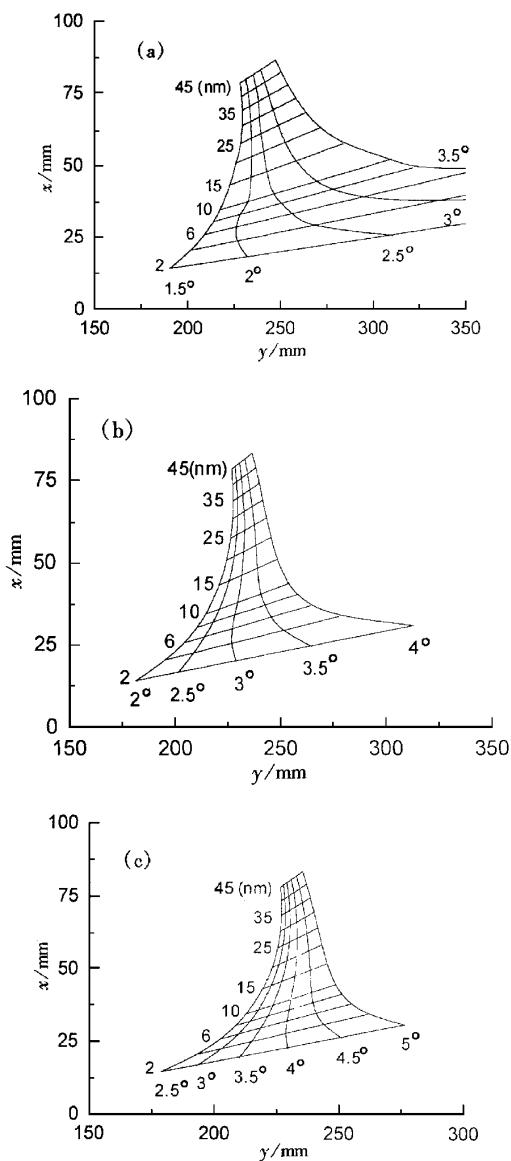


图 1 1200 槽/mm , $R = 5649 \text{ mm}$ 的机械刻线像差校正凹面光栅对于不同入射距离在光谱方向的聚焦曲线 (a) 入射距离 r 为 100 mm (b) 入射距离 r 为 300 mm (c) 入射距离 r 为 1000 mm

此可见,对于曲率半径 R 一定的光栅,当取消入射狭缝后,即使入射距离的变化距离很大时,所对应的平焦场到光栅中心的垂直距离 y 和入射角 α 的变化并不大,这就可以忽略由于入射距离 y 和入射角 α 的变化太大给光谱仪设计带来的诸多不便.而且,由数据分析可知,对于所要求的测量波长,总可以找到与之相对应的处于平焦场的波段范围,只是由于可测波段范围一般较窄,很难设计成宽摄谱范围的通用型平场光栅谱仪.但若采用可变入射距离的平焦场设计,则谱仪的适用性有望得到大大的提高.

3.2 非点光源条件下光源尺度对成像的影响

为了研究具有一定光斑尺度的光源对光栅成像的影响,我们计算了对应上述同样条件下聚焦曲线 上光谱方向焦线宽度随不同入射角的变化关系,见图2。

若以焦线宽度小于 $100 \mu\text{m}$ 为焦线可以被使用的基本条件的话,由图2可以看出,在入射距离为 100 mm 的情况下,入射角为 1.5° 时,只有从 30 nm 至 45 nm 的焦线宽度是满足条件的;而对于 2° 以上的情况,则从 5 nm 至 45 nm 的焦线宽度都是不满足

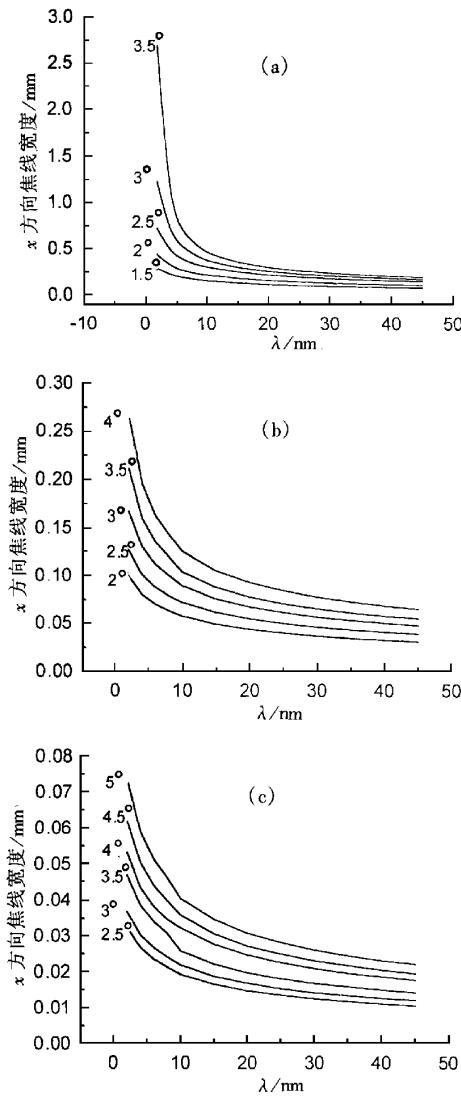


图2 1200槽/mm, $R = 5649 \text{ mm}$ 的机械刻线像差校正凹面光栅随不同波长在光谱方向焦线的宽度 (a)入射距离 r 为 100 mm (b)入射距离 r 为 300 mm (c)入射距离 r 为 1000 mm

条件的。对于入射距离为 300 mm 的情况,入射角为 2° 时,从 2 nm 至 45 nm 的焦线宽度都是满足条件的。到了入射角为 2.5° 时,就只有从 5 nm 至 45 nm 的焦线宽度满足条件了;而到了入射角为 4° 的情况时,就只有从 20 nm 至 45 nm 的焦线宽度是满足条件的了。对于入射距离为 1000 mm 的情况,在我们所计算的入射角度内,所有的焦线宽度都是满足条件的,且焦线宽度最大只有 $70 \mu\text{m}$ 。可见,在入射距离和入射角一定的情况下,焦线宽度随着波长的增加而变窄。进一步分析可得,在入射角一定的情况下,焦线宽度随着入射距离的增加而变窄;而在入射

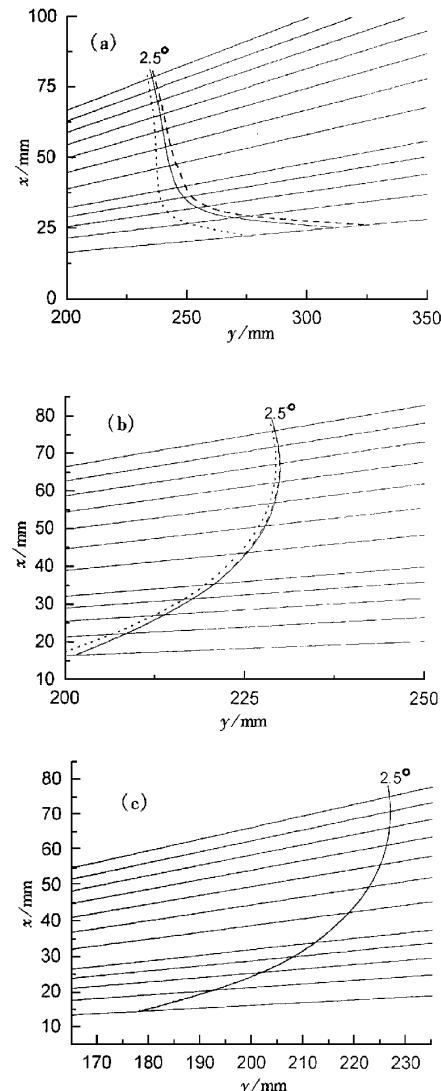


图3 同样条件下,不同尺度的光源在光谱方向的聚 焦曲线 (a)入射距离 r 为 100 mm ,光源尺度为 $100 \mu\text{m}$ (b)入射距离 r 为 300 mm ,光源尺度为 $300 \mu\text{m}$; (c)入射距离 r 为 1000 mm ,光源尺度为 $1000 \mu\text{m}$

距离一定的情况下,焦线宽度随着入射角的减小而变窄。因此,在谱仪的设计中,对于我们感兴趣的较短波长光谱的测量,可采用增加入射距离和降低入射角的方法来提高成像的灵敏度。

3.3 对于不同的入射距离情况下光源尺度对聚焦曲线的影响

为了考察光源尺度对聚焦曲线的影响,我们对于光源尺度分别为 $100 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$ 和 $1000 \mu\text{m}$ 的情况,计算了入射距离分别为 100 mm 、 300 mm 和 1000 mm ,入射角度为 2.5° 时的聚焦曲线,并进行了比较,见图 3。

如图 3 所示,对于入射距离为 100 mm 的情况,对于光源尺度为 $100 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$ 和 $1000 \mu\text{m}$ 三种情况的三条聚焦曲面的不同是明显的,即光源尺度的不同对于聚焦曲线的影响是很大的;对于入射距离为 300 mm 的情况,则对应于光源尺度为 $100 \mu\text{m}$ 和 $300 \mu\text{m}$ 两种情况的聚焦曲线已基本重合,只有光源尺度为 $1000 \mu\text{m}$ 情况的聚焦曲线与前两者有差异,可以看出 $300 \mu\text{m}$ 的光源尺度与 300 mm 的入射距离之比为 $1:1000$,而到了入射距离为 1000 mm 的情况,对应于光源尺度为 $100 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$ 和 $1000 \mu\text{m}$ 三种情况的三条聚焦曲线已全部重合。经过对多种不同条件下的计算可得出结论:当光源尺度与入射距离之比大于 $1:1000$ 时,不同光源尺度对于聚焦曲线的影响是明显的,即不同光源尺度对实验测量是有影响的,而当光源尺度与入射距离之比等于和小于 $1:1000$ 时,光源尺度的大小对于聚焦曲线的影响可以忽略,也就是说,此时的光源可以看作是点光源。因此,在谱仪的使用中,若光源的尺度是基本不变的,则光源尺度对谱仪成像的影响是可以不考虑的。而若所产生光源大小的稳定性并不好,则必须考虑光源尺度对谱仪成像的影响,进而考虑使用光源尺度与入射距离之比等于和小于 $1:1000$ 的标准。

4 结 论

通过以上的计算和分析可见:

1. 在光栅一定的情况下,对于要求的测量波段范围,总可以找到与之相对应的平焦场,使平场成像成为可能。

2. 在谱仪的设计中,对于感兴趣的较短波长光谱的测量,可采用增加入射距离和减小入射角的方法来提高成像的灵敏度。

3. 只要满足光源尺度与入射距离之比大于 $1:1000$,则光源尺度的大小对于聚焦曲线的影响可以忽略。而在实际的激光等离子体实验测量当中,光源尺度与入射距离的 $1:1000$ 之比的条件是非常容易被满足的。而且,若能保证光源的尺度大小基本不变,则 $1:1000$ 的条件也是可以不必考虑的。

以上结果表明,取消入射狭缝后非点光源条件下掠入射平均谱仪的设计在原理上是可行的,并且这种设计大大提高了谱仪的接收效率并改善了其适用性。

- [1] J. Zhang, *Physics*, **26**(1997), 643 (in Chinese) [张杰, *物理*, **26**(1997), 643].
- [2] R. P. Drake, K. S. Bradley, S. H. Batha *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 3157.
- [3] J. Zhang, A. G. MacPhee, J. Lin, E. Wolfrum, R. Smith, C. Danson, M. H. Key, C. L. S. Lewis, D. Neely, J. Nilsen, G. J. Pert, G. J. Tallents, J. S. Wark, *Science*, **276**(1997), 1097.
- [4] P. J. Warwick, C. L. S. Lewis, M. P. Kalachnikov, P. V. Nickles, M. Schnurer, A. Behjat, A. Demir, G. J. Tallents, D. Neely, E. Wolfrum, *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**(1998), 1808.
- [5] P. Z. Fan, Z. Q. Zhang, J. Z. Zhou, R. S. Jin, Z. Z. Xu, X. Guo, *Acta Optical Sinica*, **12**(1992), 169 (in Chinese) [范品忠等, *光学学报*, **12**(1992), 169].
- [6] Y. J. Li, J. Zhang, H. S. Peng, Q. R. Zhang, *High Power Laser and Particle Beams*, **10**(1998), 409 (in Chinese) [李英骏等, *强激光与粒子束*, **10**(1998), 409].
- [7] T. Harada, T. Kita, *Appl. Opt.*, **19**(1980), 3987.

IMAGING STUDY OF FLAT-FIELD GRATINGS FOR NON-POINT LIGHT SOURCE^{*}

LI YING-JUN¹⁾ YANG JIAN-LUN²⁾ ZHANG JIE¹⁾

¹⁾ *Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China*

²⁾ *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003, China*

(Received 21 September 1999; revised manuscript received 28 October 1999)

ABSTRACT

Using a ray-tracing code, the imaging process of non-point light sources through a concave grating has been studied. It is demonstrated that under specially designed conditions, a plane spectrum can be formed for non-point light sources. The positions for the plane spectrum have been derived for the sources at different distance from the grating. A criterion has been defined under which the effects of variation of the source-size on the focal plane can be neglected.

PACC : 0765 ; 0785 ; 4230

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19974074).