

带超环面镜的掠入射光栅谱仪测试系统响应特性模拟分析

李跃林 陆培祥 李儒新 范品忠 陈时胜 张正泉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

指出了文献[1]在物理概念上和公式推导中的错误,并在订正了这些错误之后,考虑了实际的激光等离子体光源的几何尺度和线状等离子体的安排,对在复合泵浦 X 激光增益实验中所使用的带超环面镜 X 光中继元件的掠入射光栅谱仪系统进行了全面的模拟计算. 结果表明,作者所使用的带超环面镜的 X 光增益测试系统,其因离焦而导致的非线性效应是完全可以忽略的,系统的空间分辨能力的下降也是非常小的,从而否定了文献[1]中的结论,表明作者在 X 激光增益测量实验中所使用的带超环面镜 X 光中继元件的掠入射光栅谱仪系统是完全可以可靠的.

关键词 X 射线激光, X 射线光谱学, X 射线光学, 掠入射光栅谱仪, 超环面反射镜.

1 引 言

文献[1]采用了一种近似模型来模拟计算超环面镜 X 光中继系统的能量输运问题,对文中所给的系统几何参数和线状等离子体源,得出的结论是:1) 超环面镜 X 光中继系统因离焦会产生严重的非线性效应; 2) 这种非线性效应使带超环面镜的 X 光增益测试系统在特定的 X 射线激光实验安排下出现严重误差,从而导致假增益; 3) 离焦将使增益测试系统空间分辨能力严重下降.

实际上,带中继光学元件的掠入射光栅谱仪系统用于 X 射线激光增益测量在世界各国已非常普遍^[2~14],至今未见该种系统存在严重非线性的实验证据. 考虑了实际的激光等离子体光源的几何尺度和线状等离子体的安排,本文对在复合泵浦 X 激光增益实验中所使用的带超环面镜 X 光中继元件的掠入射光栅谱仪系统进行了模拟分析. 结果表明,作者所使用的带超环面镜的 X 光增益测试系统,其因离焦而导致的非线性效应是完全可以忽略的; 系统的空间分辨能力也不会有明显的下降.

首先,必须指出文献[1]是一篇错误的文单,除了将要指出的公式推导中的错误之外,在物理概念上也是不正确的. 体现在:

1) 采用 50 μm 空间分辨率的测试系统去分析空间尺度仅为 50 μm 的光源的空间分辨特性,这在物理上是不合理的,而且也脱离了实验研究中等离子体源宽度达毫米量级的实际情

况;

2) 采用不合理的实验排布,在改变激励等离子体柱长度时,使最短的等离子体柱离焦最严重,从而人为地造成测试系统对长度不同的等离子体柱测试条件的不一致;

3) 在讨论系统的空间分辨能力时,混淆了空间分辨能力和源弥散宽度这两个不同的物理概念.

此外文献[1]中公式推导也存在明显的错误,如:

(1) 文中(3)式和(4)式中的 $\sin(\phi/2)$, 应为 $\sin \phi/2$

(2) 文中(5)式中 $\sin \phi$, 应为 $\cos \phi$

在上述公式推导中,将(5)式中 $\sin \phi$ 推导为 $\cos \phi$, 是原则性的错误. 这样,文献[1]中(1)~(7)式的正确写法应该是:

$$\frac{1}{P_0 - \Delta P_l} + \frac{1}{P_0 + \Delta P_l} = \frac{2}{R \cos \phi} \quad (1) \quad \frac{1}{P_0 - \Delta P_l} + \frac{1}{\bar{P}_0 + \Delta \bar{P}_l} = \frac{2 \cos \phi}{\rho} \quad (2)$$

$$r_i^u = \rho \left(1 - \frac{P_0 + W_2 \sin \phi/2}{\bar{P}_r} \right) \quad (3) \quad r_i^p = \rho \left(1 - \frac{P_0 - W_2 \sin \phi/2}{\bar{P}_r} \right) \quad (4)$$

$$b_i = \frac{|\Delta P_l|}{P_0 + \Delta P_l} W_2 \cos \phi + P_0 b/P_0 \quad (5) \quad y^u = r_i^u + b_i/2 - [(r_i^u)^2 - x^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$y^p = r_i^p + b_i/2 - [(r_i^p)^2 - x^2]^{1/2} \quad (7)$$

根据以上订正之后的公式*,作者编制了计算程序.在计算方法上,文献[1]用投影加上离焦展宽来处理有限宽度的光源,作者则采用了更加准确的点源平移迭加法,对复合泵浦 X 激光增益实验中所使用的带超环面镜 X 射线中继元件的掠入射光栅光谱仪系统(几何参数列于表 1 中)进行了模拟分析.

Table 1 Parameters of grazing incidence grating spectrograph with toroidal mirror relay optics^[13,14]

system No.	A	B
objective distances P_0 (mm)	740	550
mirror-meridional image distance P'_0 (mm)	103.86	110.36
mirror-sagittal image distance \bar{P}'_0 (mm)	444	550
angle of incidence ϕ (°)	86.85	86.82
curvature radius in meridional plane of the mirror R (mm)	3315	3315
curvature radius in sagittal plane of the mirror ρ (mm)	30.5	30.5
length of the toroidal mirror w_2 (mm)	55	55
width of the toroidal mirror w_1 (mm)	30	30
width of the spectrograph slit h (mm)	0.02	0.02
perpendicular collection angle (mrad)	4.0	5.55
horizontal collection angle (mrad)	4.1	6.7
stereo-collection angle C_s ($\times 10^{-4}$ Sr.) ($b=150 \mu\text{m}$)	0.16	0.37

* 关于文献[1]中这些错误的详细的分析,请参考文献[15]

采用考察端面为线的线状光源展宽的方法,对于系统 A(对应于在 LF12[#] 激光装置上实验的几何参数)和系统 B(对应于在六路激光装置上实验的几何参数),分别计算了一长为 40 mm(系统 A)和 10 mm(系统 B)、 $a = 0, b = 150 \mu\text{m}$ (a, b 分别为光源在超环面镜弧矢面和子午面方向的尺度)的线状光源在谱仪成像面上的接收底片上形成的像的强度分布,结果表明其半高全宽均小于 $4 \mu\text{m}$,半能量宽度分别小于 $6 \mu\text{m}$ 和 $4 \mu\text{m}$,如图 1 所示.由此可见,在这种情况下都不会因离焦而使探测到的线状等离子体光源的空间分布有大的失真.因而在 X 射线激光增益实验中,系统的空间分辨本领完全适用于研究空间尺度为毫米量级的光源的空间特性.而文献[1]中用具有有限空间尺度的源在弥散之后的宽度作为系统的空间分辨能力,显然是错误的.

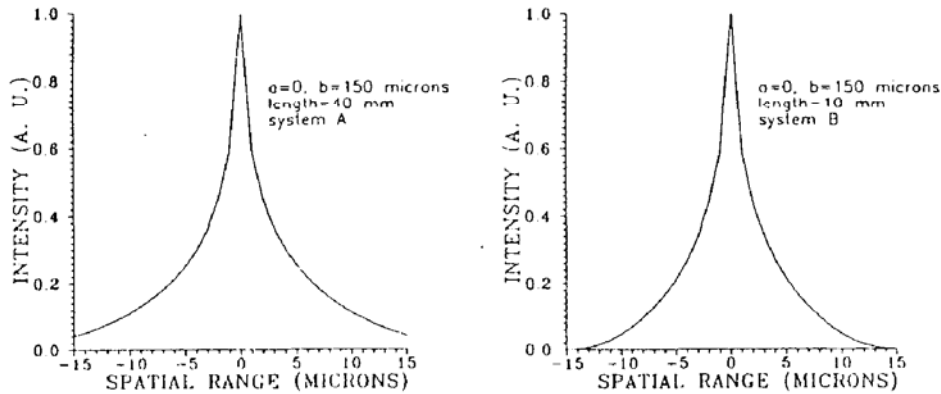


Fig. 1 Calculated spatial profile in image plane of the spectrograph for system A and B with $a=0$ and $b=150 \mu\text{m}$ line shaped sources; (a) system A, source length 40 mm; (b) system B, source length 10 mm

进一步的模拟分析也证明了这一事实.对于一个 $a=500 \mu\text{m}$ 强度分布为平顶状的光源,计算了用系统 A 测得的光源中心 $50 \mu\text{m}$ 内的发射强度对离焦量的依赖关系曲线,如图 2(a)所示.对系统 B 计算的相应结果示于图 2(b),与图 2(a)基本一致,因此,在以下的分析中,只计算了系统 A.特别要指出的是,图 2 中曲线都是采用了 $30 \mu\text{m}$ 扫描狭缝高度来处理记录胶片而计算得到的.可见,在由成像面到景深 $\pm 2 \text{cm}$ 的范围内,系统测得的强度并没有因离焦而受到明显的影响,即系统因离焦而导致的非线性效应是完全可以忽略的.

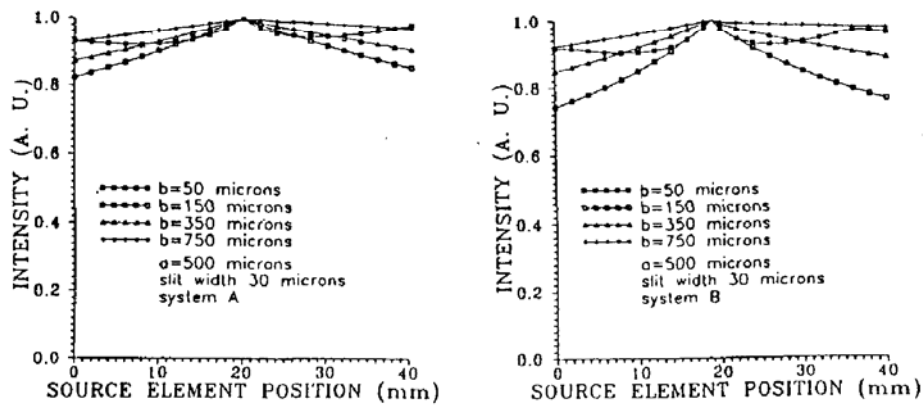


Fig. 2 Calculated intensity response on spectral film for a central $50 \mu\text{m}$ part of an $a=0.5 \text{mm}$ rectangular source as functions of the defocusing distance for system A and B

如图 3(a)所示的更接近于实际情况的一个空间光强分布为三角尖峰状的光源^[13],计算了系统 A 对三个不同空间位置在 $50 \mu\text{m}$ 范围内测量的强度对离焦量的依赖关系.图 3(b)给出

了对应于图 3(a)位置 2 的计算结果,而对图 3(a)位置 1 和 3 的计算结果则与图 2(a)完全一致. 显然,其非线性效应也是完全可以忽略的. 这里的计算中仍然采用了 $30\ \mu\text{m}$ 扫描狭缝高度来处理记录胶片.

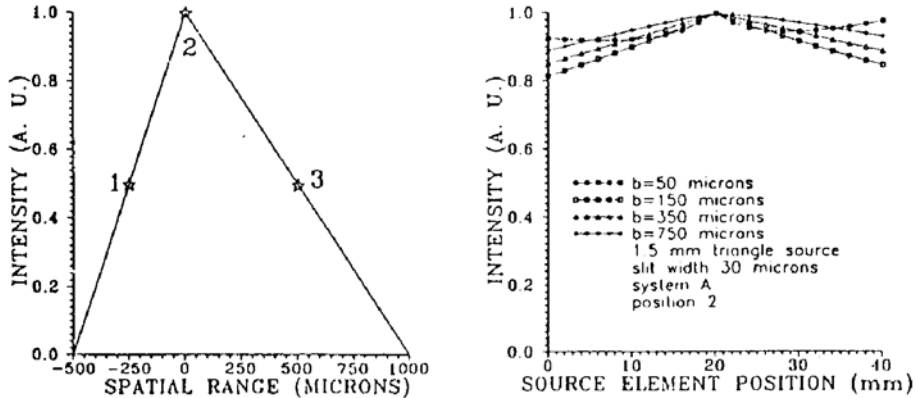


Fig. 3 Calculated intensity response on spectral film from a $50\ \mu\text{m}$ range of a triangular source as function of the defocusing distance (slit height of $30\ \mu\text{m}$) (a) spatial profile of the triangular source; (b) simulation result for position 2 in Fig. 3 (a)

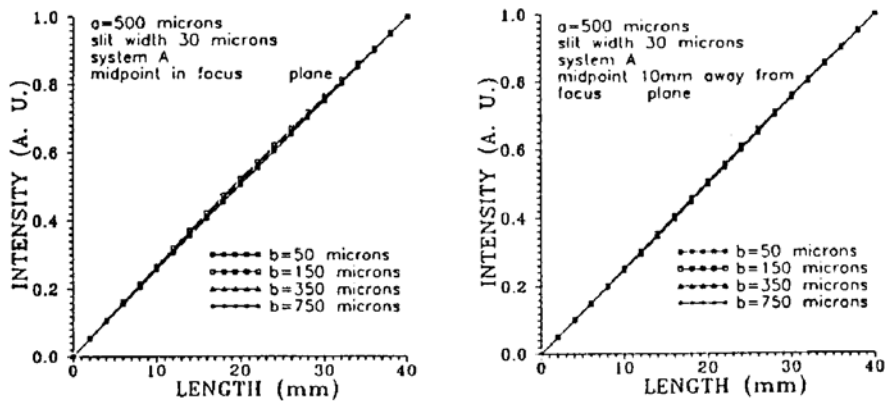


Fig. 4 Calculated integrated-intensity responses on spectral film for line shaped sources as functions of source length (system A). The midpoints of the line shaped sources are positioned in the focus plane of the spectrograph, and this arrangement is generally used in x-ray laser experiments. (a) the imaged wavelength is just the measured wavelength; (b) the imaging plane displaces $10\ \text{mm}$ caused by the difference between the imaged wavelength and the measured one

按图 2、图 3 所给的测量的发射强度对离焦量的依赖关系曲线,我们的带有超环面镜的 X 光增益测试系统因离焦而导致的非线性效应完全可以忽略的,在测量中由此而致的误差也是可以忽略的. 采用复合泵浦 X 射线激光增益实验中所使用的实验排布,即线状等离子体的中点恒置于测试系统的成像面上,对图 2(a)的曲线积分,得到了线状光源积分发射强度对线源长度的依赖关系曲线,示于图 4(a)中. 图 4(a)中的曲线已基本呈线性. 另外,如果实测波长与成像波长不同,使测试系统的成像面偏离标称成像面,按本文采用的实验排布,同时也积分得到了线状光源积分发射强度对线源长度的依赖关系曲线. 图 4(b)中给出了成像面偏离为 $1\ \text{cm}$ 时的计算结果;图中所示的曲线仍基本呈线性. 图 4 的计算表明,由于带有超环面镜的 X 光增益测试系统的景深很长,在测量中由此而导致的误差完全可以忽略;即使在相应于实测波长的成像面偏离标称成像面的情况下也是如此. 所以,测量中是不可能出现假增益的.

综上所述,在我们的复合泵浦 X 激光增益实验中的使用参数条件下,带有超环面镜的掠入射光栅谱仪在作为 X 激光增益测试系统时,其因离焦而导致的非线性效应是完全可以忽略的,从而在增益测量中由此导致的误差是完全可以忽略的.因此,我们的复合泵浦 X 激光增益实验中的增益测量结果是完全可靠的.

参 考 文 献

- [1] Lin Zunqi, Zhang Huihuang Ren Jun *et al.*, Analysis of optical energy transportation on toroidal mirror X-ray relay optics, *Chinese Journal of Lasers(E. E)*, 1992, 1(2): 149~158
- [2] C. H. Skinner, D. Kim, D. Voorhees *et al.*, Development of small scale soft-X-ray laser: aspect of data interpretation. *J. Opt. Soc. Am. (b)*, 1990, 17: 2042
- [3] Y. Kato, K. Hazuma, K. Yamakawa *et al.*, Explosive-mode short wavelength recombination Balmer- α laser, in *X-ray Lasers 1990*, ed. by G. J. Tallents, IOP Publishing Ltd., 1991, PP. 1~8
- [4] C. J. Keane, N. M. Ceglio, B. J. MacGowan *et al.*, Soft x-ray laser source development and applications experiments at Lawrence Livermore National Laboratory, *J. Phys. B: Atom. Mol. Opt. Phys.*, 1989, 22: 3342~3362
- [5] C. J. Keane, D. L. Matthews, M. D. Rosen *et al.*, Soft-x-ray amplification in a laser produced strontium plasma. *Phys. Rev. A*, 1990, 42(4): 2327~2339
- [6] S. A. Whelan, C. J. Keane, B. J. MacGowan *et al.* Spatially resolved x-ray laser spectra and demonstration of gain in Nickel-like systems. *Proc. SPIE*, 1987, 831: 275~282
- [7] D. Naccache, A. Decoster, S. Jacquemot *et al.*, Amplification of soft x-ray in Ne-like germanium ions created by 0.53 μm laser light, *Phys. Rev. (A)*, 1990, 42(5): 3027~3033
- [8] D. Naccache, J. L. Bourgade, P. Combis *et al.*, Review of the soft-X-ray laser research at CEL-V, *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(2): 493~499
- [9] D. Kim, C. H. Skinner, A. Wouters *et al.*, Toward shorter wavelength for soft x-ray laser based on Li-like ions, *Proc. SPIE*, 1988, 875: 20~31
- [10] D. Kim, C. H. Skinner, A. Wouters *et al.*, Soft-X-ray amplication in lithiumlike Al VI [15.4 nm] and Si V [12.9 nm], *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, 6(1): 115~124
- [11] T. Hara, Y. Aoyagi, Compact soft-X-ray laser, *Laser Research(Japan)*, 1990, 18(11): 871~878
- [12] A. Carillon, G. Jamelot, A. Klisnick *et al.*, Experimental device for X-UV gain measurement using interferential mirror, fast time resolved detection and on-line data processing, *Proc. SPIE*, 1987, 688: 12~16
- [13] Xu Zhizhan, Zhang Zhengquan, Fan Pinzhong *et al.*, Soft X-ray amplification by Li-like Al¹⁰⁺ and Si¹¹⁺ ions in recomnination plasmas, *Appl. Phys. B*, 1990, B50(3): 147~151
- [14] 徐至展,范品忠,张正泉等,复合泵浦类锂硅离子软 X 射线激光, *中国科学*, (A 辑), 1991, 34(4): 414~423
- [15] Fan Pinzhong, Zhang Zhengquan *et al.*, Some serious mistakes in the paper titled Analysis of optical energy transportation on toroidal mirror x-ray relay opticas, *Chinese Journal of Lasers(E. E.)*, 1992, 1(5): 447~479

Simulation and analysis of characteristics of grazing incidence grating spectrograph with pre-toroidal mirrors

LI Yaolin LU Peixiang LI Ruxin FAN Pinzhong

CHEN Shisheng ZHANG Zhengquan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 7 October 1992)

Abstract

This paper pointed some errors in physical concepts and formula deduction in the reference [1]. Correcting those errors and considering the real experimental geometry and the scales of laser plasma sources, we have performed a systematic simulation for the characteristics of the grazing incidence grating spectrograph with toroidal mirror X-ray relay optics which has been used in X-ray laser experiments for gain measurements. It is shown that the nonlinear effects of the spectrograph in optical energy transportation caused by defocusing is negligible, and so is the related defect in spatial resolution of the spectrograph.

Key words X-ray laser, X-ray spectroscopy, X-ray optics, grazing incidence grating spectrograph, toroidal mirror.