

软 X 光消像散谱仪

周正良 倪元龙 顾 援 王世绩

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

提要 用柱面镜和球面镜组成的消像散系统,配上平焦场光栅谱仪,制作了一台理论分辨能力 25 μm ,放大 5 倍的一维消像散谱仪,用它对类 Ne 锗软 X 光激光的增益区进行了测量,得到了与理论相符的结果。

关键词 消像散,光栅谱仪,X 光激光,增益区空间分布

1 引言

在 X 光激光的实验研究中,增益区的空间分布对理解软 X 光激光的产生和传播是相当重要的。它的测量值可直接与理论计算结果比较,校核计算程序,并可结合光束发散角的测量值估算 X 光激光的横模数即空间相干性。

目前,X 光激光的波长都处在 3~30 nm 的软 X 光光谱区。对这一波段,材料表面的正入射反射率都很低,一般用凹球面掠入射光栅谱仪测量^[1]。但这种谱仪有严重的像散,即点源在记录面上形成一条线段。要获得一维无像散单色像必须使用辅助光学元件。

采用柱面镜和球面镜组合,配合平焦场谱仪^[2],我们制作了一台放大 5 倍的一维消像散谱仪。它与现有的同类谱仪类似^[3],但采用了较高放大倍数,以适合对厚度为 100 μm 左右的类氖锗软 X 光激光增益区的测量。

2 结构和原理

消像散谱仪由柱面镜、球面镜、狭缝、光栅和记录元件组成。图 1 是总体光路图。对掠入射凹面镜,子午面与弧矢面的聚焦点是不一样的^[4]。在只考虑凹面光栅本身的情况下,为使波长为 λ 的软 X 光在弧矢面内聚焦,源点离光栅的距离 R_r (物距) 满足如下方程

$$1/R_r + 1/R_\lambda = (\cos\alpha + \cos\beta)/R_0 \quad (1)$$

其中 R_λ 为波长 λ 的单色像点离光栅中心距离(像距), R_0 为光栅曲率半径, α 为入射角, β 为衍射角。对平焦场谱仪, $\alpha = 87^\circ$, $R_0 = 5\,649\text{ nm}$,名义光栅常数 $d = 1/1\,200\text{ mm}$,狭缝离光栅距离 237 mm,焦面垂直于过光栅中心的切面,距光栅中心 235 mm,由此可得 $R_\lambda = 235 / \sin\beta$ 。对波长为 $\lambda = 23.6\text{ nm}$ 的激光线, $\beta = 76^\circ$ 。计算给出 R_r 为负值,表明需要在弧矢面内射入会聚的光束。

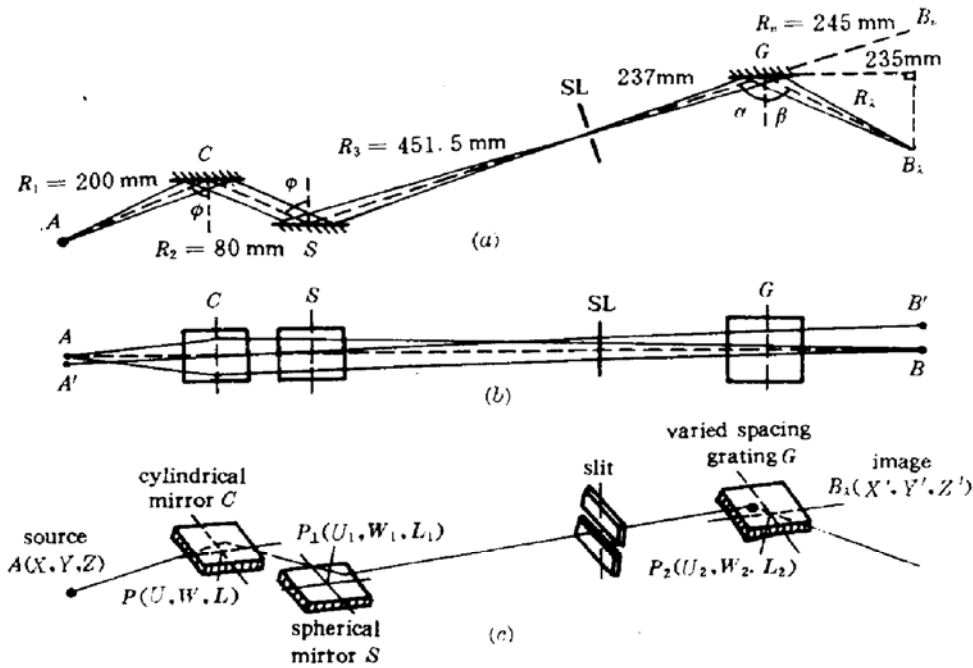


Fig. 1 Schematic diagram of the stigmatic spectrometer

(a) View on the meridional plane; (b) View on the sagittal plane; (c) Coordinate system for calculation of light path

这样,按逐级成像法,柱面镜和球面镜系统应满足如下方程:

$$1/R_1 + 1/(R_2 + R_i) = 2\cos\phi/\rho \quad (2)$$

$$-1/R_i + 1/(R_3 - 237 - R_r) = 2\cos\phi/R \quad (3)$$

其中 ρ 和 R 分别为柱面镜和球面镜半径, ϕ 为入射角, R_i 为柱面镜在弧矢面内所成像至球面镜的距离(在球面镜之后,所以在式(3)中取负号), R_1 为源点至柱面镜距离, R_2 为柱面镜至球面镜距离, R_3 为球面镜至狭缝距离。

为使谱仪有足够高的集光能力,在子午面内源点经球面镜后应会聚在狭缝上,即满足如下方程

$$1/(R_1 + R_2) + 1/R_3 = 2/R\cos\phi \quad (4)$$

系统的放大倍数为

$$M = \frac{R_2 + R_i}{R_1} \cdot \frac{R_3 + 237 - R_r}{R_i} \cdot \frac{R_i}{|R_r|} \quad (5)$$

按(1)~(5)式,在选定放大倍数 M 及 R_1, R_2 和掠入射角 $\phi \sim 85^\circ$ 后便可决定各光学元件参数。

上面给出的是近轴光线的成像公式。光学系统都是存在像差的,我们采用光学追迹法^[5]进行了计算。图 1(c) 为所取坐标系。 $A(X, Y, Z), B_1(X', Y', Z')$ 分别为源点和波长为 λ 的单色像点, P 和 P_1 为柱面镜和球面镜上的任一点, P_2 为离光栅中心第 n 个条纹上的任一点,总光程为

$$F(W, W_1, W_2, L, L_1, L_2, Z, Z') = \langle AP \rangle + \langle PP_1 \rangle + \langle P_1P_2 \rangle + \langle P_2B_1 \rangle + nm\lambda \quad (6)$$

符号 $\langle \rangle$ 表示两点之间的距离, $nm\lambda$ 为光栅衍射产生的附加光程, m 为衍射级数。

根据费马原理,光线应沿使光程为极值的轨迹进行,即必须满足

$$\frac{\partial F}{\partial W} = \frac{\partial F}{\partial W_1} = \frac{\partial F}{\partial W_2} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial L} = \frac{\partial F}{\partial L_1} = \frac{\partial F}{\partial L_2} = 0 \quad (8)$$

由上面两个公式可推导光线经过各反射镜时的相互位置关系及所成像的像差。主要计算

结果为：1) 狭缝上的像在沿狭缝长度方向呈双曲线形，中间窄，两头宽。这表明狭缝中间单位面积光强比两头要大。由于源区不同点对狭缝像各点光强的贡献不同，而有限宽的狭缝只能截取中间很少一部分，所以必须适当限制光束的入射口径；2) 对谱仪焦面上的单色像，源点离轴越远，像差越大，并且，放大倍数越大，像差低于某一确定值的成像范围就越小。

表 1 为消像散谱仪的设计参数。它的集光能力较强，在传输过程中源与像的光强分布基本对应，光谱分辨能力约为 0.01 nm，光轴上点源的空间分辨能力为 25 μm ；分辨能力在 35 μm 左右的成像范围是 300 μm 。

Table 1 Optical parameters of the stigmatic spectrometer

Angle of incidence ϕ	85.22°	Source-cylindrical mirror distance R_1	200 mm
Radius of cylindrical mirror ρ	28 mm	Cylindrical mirror-spherical mirror distance R_2	80 mm
Radius of spherical mirror R	4150 mm	Spherical mirror-entrance slit distance R_3	451.5 mm
Aperture in horizontal direction Ω_H	5 mrad	Magnification M	5
Aperture in vertical direction Ω_V	5 mrad		

3 实验装置和结果

消像散谱仪首次应用于反射镜双程放大类 Ne 锗软 X 光激光实验^[6]。谱仪由两部分组成，一是柱面镜和球面镜组成的消像散系统，柱面镜前装有控制入射光强的铝衰减膜和限制进光口径的光阑。它用光学方法调整好^[2]，放在实验靶室内；二是平焦场光栅谱仪，它安放在靶室外接的真空室中。实验在“神光”装置上进行，输出的波长 1.05 nm，能量约 600 J，脉宽 1 ns 的驱动激光经线聚焦后辐照平面厚锗靶，靶面功率密度 $\sim 1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 。图 2 是实验排布示意图。消像散谱仪对波长 23.2 和 23.6 nm 的类氦锗软 X 光激光增益区进行靶法线方向的一维成像记录。谱仪光轴落在靶法线与激光焦线组成的平面内。由于软 X 光激光在厚锗靶产生的等离子体中有严重的折射，谱仪光轴与激光焦线预先调好 12 mrad 的夹角，并瞄准第 2 块靶的靶面前 120 μm 处，以便对增益区中心成像。

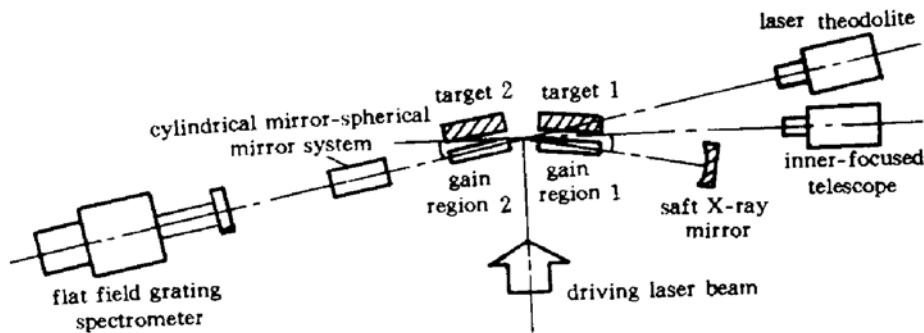


Fig. 2 Experimental arrangement

图 3 给出靶长 (14+14) mm 的双靶实验结果，此两靶内端间距 1 mm，与焦线偏成 4.5 mrad 夹角。(a) 是所拍谱片，(b) 是沿谱线宽度方向黑度扫描曲线，(c) 是由黑度推算出的强度分布曲线。由图测出波长 23.2 nm 软 X 光激光增益区的半强度全宽为 132 μm 。从图 3 (a) 的自发辐射谱和连续谱可看到起始靶面位置，增益区峰值强度处离开靶面 120 μm 。

图 4 是 (14+14) mm 靶加上软 X 光反射镜的结果。凹面反射镜曲率半径 80 mm，安放在

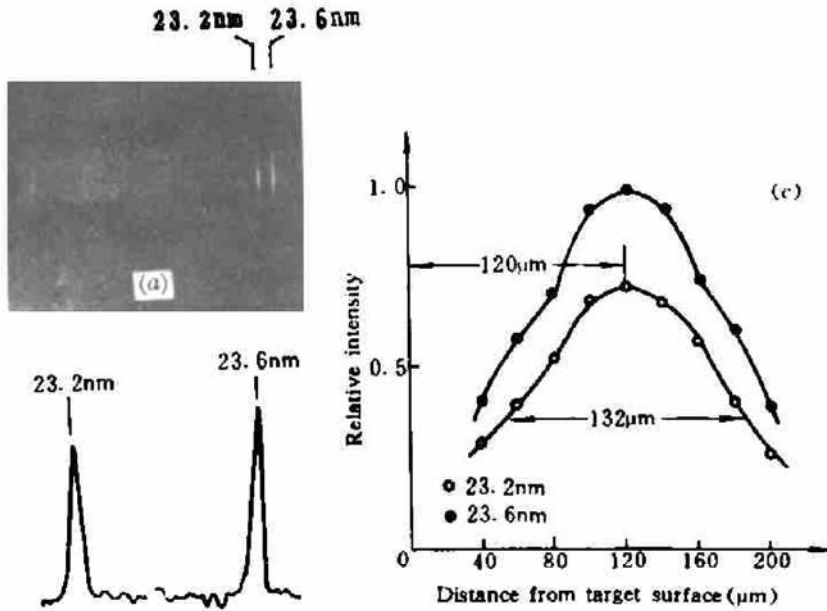


Fig. 3 Experimental result of double Ge target at length (11+11) mm

(a) spectrogram; (b) microdensitometric trace; (c) intensity distribution

离靶 1 外端 30 mm 处, 反射镜光轴与焦线成 13.5 mrad 角, 瞄准靶 1 前 120 μm 处。由于经双程放大后的指数增长及折射影响, 增益区半强度全宽减小为 108 μm。并且, 由于 23.2 nm 线的增益系数大, 它的强度超过 23.6 nm 线的强度, 与双靶无反射镜时的结果相反。

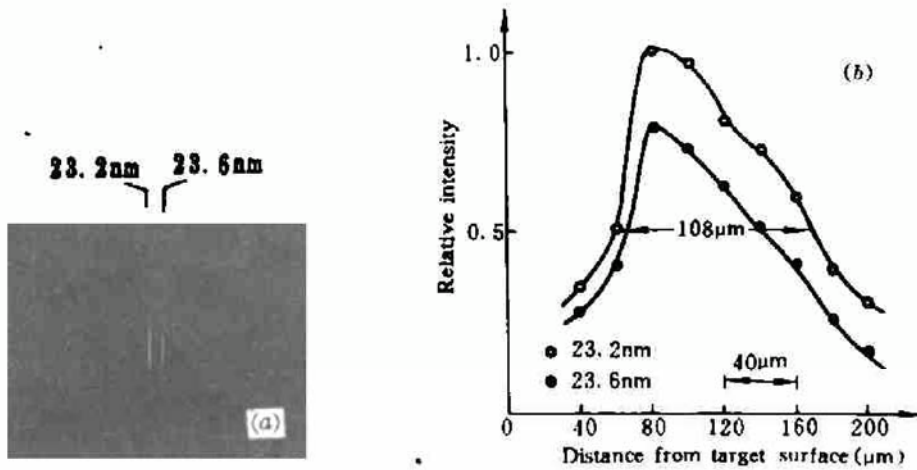


Fig. 4 Experimental result of the double Ge target at length (11+11) mm with a soft X-ray mirror

(a) spectrogram; (b) intensity distribution

以上测量数据与用 JB19 程序计算的理论结果符合得较好^[7]。

从增益区的线度并结合实验测定的软 X 光激光的发散角^[6]可估计软 X 光激光的横模数^[8]。假定等离子体膨胀方向和线焦宽度方向的厚度相同, 横模数为

$$N = (\theta \times a / \lambda)^2 \quad (9)$$

其中 θ 为发散角 (mrad), a 为等离子体宽度 (μm), λ 为波长 (nm)。表 2 给出双靶和加反射镜后双靶软 X 光激光的性能参数。可见加反射镜后横模数明显减少即空间相干性有很大提高。

Table 2 Parameters soft X-ray laser

Parameters for target	Width in traverse direction	Divergence of beam	Number of traverse mode
Double target	132 μm	12.5 mrad	5000
Double target with a mirror	108 μm	3.5 mrad	260

4 结 论

柱面镜和球面镜组成的消像散系统,具有结构灵活、制作简易的优点。配合平焦场谱仪,可对较宽的软 X 光波段范围进行消像散记录。并且像畸变小、空间分辨能力高,容易制成较高放大倍数,很适合 100 μm 左右的激光等离子体的空间分辨研究。用它测量了类氦锗 X 光激光的增益区,获得了与理论计算相一致的结果。

这一仪器还需改进,主要是反射镜的光洁度不够,影响测量精度。另外,还需实测谱仪的放大倍数和空间分辨率,并配上软 X 光扫描相机进行时间分辨测量。

参 考 文 献

- 1 Tatsuo Harada *et al.*. *Appl. Opt.*, 1980, **22**(4): 512
- 2 倪元龙等. 强激光与粒子束, 1991, **3**(2): 242
- 3 范品忠等. 光学学报, 1992, **12**(2): 118
- 4 G. Tondello *et al.*. *Opt. Acta*, 1979, **26**(3): 357
- 5 T. Namioka. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49**(5): 446
- 6 王世绩等. 待发表
- 7 张国平等. 强激光与粒子束, 1990, **2**(3): 298
- 8 Richard A London. *Physics Fluids*, 1988, **31**(1): 184

A Soft X-ray Stigmatic Spectrometer

Zhou Zhengliang Ni Yuanlong Gu Yuan Wang Shiji

(Shanghai Institute of Laser and Plasma, Shanghai 201800)

Abstract Using cylindrical mirror and spherical mirror as a focusing system, we have made a one dimensional stigmatic spectrometer, with spatial resolution better than 25 μm and 5 times amplifications. The Ne-like Ge X-ray laser amplification region was measured by using it, and the results agree with the theoretical calculations.

Key words stigmatic, grating spectrometer, X-ray laser amplification region's spatial distributions