

# 线状等离子体测量中的晶体谱仪及其在 X 射线激光实验中的应用

孙 岚 韩申生 徐至展 张正泉 范品忠

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

本文讨论了两适用于 X 射线激光实验的聚焦型弯晶谱仪和针孔晶体谱仪. 给出了弯晶谱仪的设计参数, 以及针孔晶体谱仪在实验中摄得的线状 Mg 和  $\text{CaF}_2$  等离子体空间分辨谱; 分析了晶体谱仪在 X 射线激光实验中的应用.

**关键词** 弯晶谱仪, 针孔, 罗兰圆, X 射线, 谱分辨率.

## 1 引 言

在 X 射线激光的研究中, 由于其特殊的等离子体形状——大纵横比的线状结构, 使平晶谱仪的应用受到很大的限制, 在有些情况下, 无法同时得到高的谱分辨率; 空间分辨率和灵敏度. 特别是在利用 X 射线谱进行激光等离子体的参数诊断中, 由于灵敏度低和源加宽的影响, 使掺杂等诊断技术的应用受到很大的限制, 还使得一些对诊断十分重要的伴线、互组合线、共振线及其谱线形状不易分辨, 给等离子体的参数诊断工作带来了很大的困难, 影响了对其中物理过程的深入了解和研究. 一种解决方法是利用弯晶谱仪代替平晶谱仪<sup>[1]</sup>. 另一种方法是在平晶谱仪的基础上作一改进以消除源加宽的影响. 这两种方法均能提高谱分辨率, 因此, 特别适合于 X 射线激光的光谱研究.

## 2 聚焦型弯晶谱仪的设计

聚焦型弯晶谱仪由于其灵敏度高且谱分辨率与源尺度无关等特点, 是一种特别适合于 X 射线激光研究的诊断工具. 通过将激光等离子体适当偏离罗兰(Rowland)圆, 即可克服凹晶谱仪摄谱范围狭窄的问题. 还可以利用此种谱仪拍摄激光等离子体介质的二维单色像. 配以条纹相机, 即可同时对其中一线谱进行时空演化过程的实验研究.

继苏联之后, 美国、加拿大等国相继开展了聚焦型弯晶谱仪的研究工作<sup>[2,3]</sup>, 主要着眼于提高谱仪的分辨率并进行激光等离子体的二维单色成像实验.

传统的弯晶谱仪形式一般有三种, 即 Johann 型、Johansson 型和 Hamos 型. 其中 Johansson 型弯晶谱仪是 Johann 型的改进型, 只是将谱仪的工作晶体经研磨而与罗兰圆相切. 图 1 为 Johann 型弯晶谱仪的工作原理图. 激光打靶产生的 X 射线入射到晶体表面, 按照布拉格反射

原理被反射后, 聚焦在半径为  $R/2$  的罗兰圆上. 在 Johann 型弯晶谱仪中, 源  $S$  的位置如图 1 所示, 可分成两种. 1) 在罗兰圆内, 不同波长的 X 射线聚焦在罗兰圆的不同位置, 将胶片置于该圆上进行探测, 便能得到高分辨率的 X 射线光谱成像. 谱仪的分辨率主要由谱仪的聚焦能力、晶体的几何参数及其本身的分辨率、和探测器(胶片)的测量位置所决定. 2) 在罗兰圆上或圆外, 谱仪仅能得到在罗兰圆上的源  $S'$  或通过罗兰圆周上的针孔、波长为  $\lambda$  的谱线, 形成 X 射线的单色成像. 这对于研究 X 射线增益区域的均匀性十分有利. 若同时有两个谱仪分别置于不同的位置, 便能得到两种不同波长的 X 射线单色成像, 因此可利用谱线强度比的方法测得其等离子体温度, 等等.

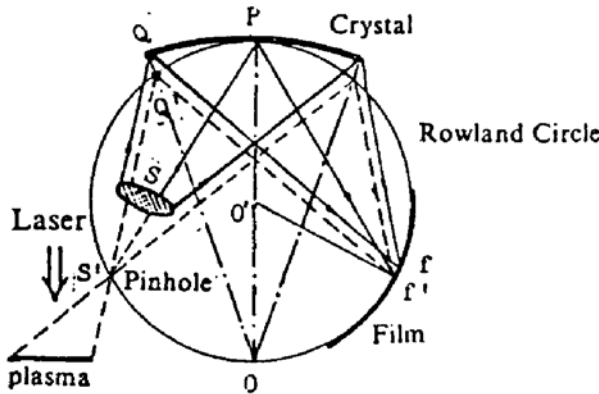


Fig. 1 Focusing and imaging properties of the Johann geometry

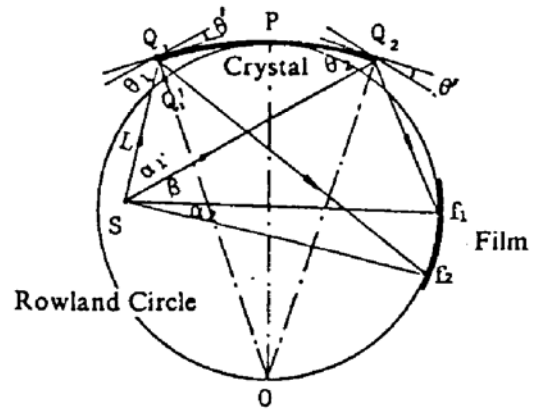


Fig. 2 Configuration used for high resolution spectroscopy of a focusing bent crystal spectrometer

为了高分辨地测量激光等离子体发射的 X 射线, 同时利用等离子体存在空间广延的优势, 设计了一种适用于 LF12<sup>#</sup> 高功率激光装置真空靶室的聚焦型弯晶谱仪. 为了得到足够高的谱分辨率, 探测器设计成弯型置于罗兰圆上, 其曲率半径与晶体曲率半径之比为 1 : 2. 谱仪被尽量设计成灵活小巧, 以便于在有限的靶室空间内安装调试. 如图 2 所示, 从  $S$  源产生的 X 射线分别以  $\theta_1$  和  $\theta_2$  入射到晶体两端, 由于  $Q$  和  $Q'$  近似重合, 光线  $SQ$  和  $SQ'$  经晶体均近似以相同的角度反射. 然而, 由于晶体与罗兰圆的曲率半径不一致, 实际入射和近似入射光线之间存在一角度差  $\theta'$ , 而  $\text{tg } \theta' = \sin [(\alpha_1 - \theta_1 + \theta_2)/2] / \{2 - \cos [(\alpha_1 - \theta_1 + \theta_2)/2]\}$ . 其中,  $\theta_1, \theta_2$  分别为入射到晶体上最大和最小布拉格角,  $\alpha_1$  为靶对晶体的张角. 图中  $\alpha_2$  为靶对胶片的张角,  $\beta$  为靶对晶体与胶片之间间隔的张角. 晶体和罗兰圆相切于  $P$  点,  $L$  为靶至晶体的最短距离. 晶体曲率半径为  $R$ . 真空靶室内径为  $R_7$ . 考虑胶片在靶室内的临界位置, 谱仪在真空靶室内的约束条件为

$$L \sin 2\theta_1 \leq R_7 \sin [2\theta_1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \beta)] \tag{1}$$

此外, 由谱仪的几何结构可得到关系式,

$$\left. \begin{aligned} L \sin \alpha_1 &= R \cos (\alpha_1 - \theta_1) - R \cos \theta_2, \\ L^2 - 2RL \sin \theta_1 + R^2 \sin^2 \theta_2 &= R^2 \left[ \frac{\cos \theta_1 - \cos \alpha_1 \cos \theta_2}{\sin \alpha_1} \right]^2, \\ \sin \beta \cdot [\cos \theta_1 - \cos (\alpha_1 + \theta_2)] &= \sin (2\theta_2 - \beta) \sin (\theta_2 - \theta'), \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

晶体长度  $L_c = R(\alpha_1 - \theta_1 + \theta_2)$ , 胶片长度  $L_f = 4R(\theta_1 - \theta_2 + \theta' - \alpha/2)$ . 真空靶室及探测器(胶片)尺寸, 以及不同晶体的特性和弯制工艺, 对晶体的选择均有一定影响. 晶体的弯曲程度和长度的选择对谱仪的一些特征参量也起着举足轻重的作用. 谱仪的能量分辨率将由以下几个方面的因素决定并有如下的关系:

$$1) \quad \text{晶体长度的因素} \quad (\lambda/\Delta\lambda)_L = 8(R/L_C)^2 \text{tg}^2 \theta_B. \quad (3)$$

$$2) \quad \text{晶体高度的因素} \quad (\lambda/\Delta\lambda)_h = 8(R/h)^2 \sin^2 \theta_B. \quad (4)$$

$$3) \quad \text{晶体固有衍射分布的因素(即晶格缺陷的影响)} \quad (\lambda/\Delta\lambda)_\omega = \text{tg} \theta_B/\omega. \quad (5)$$

$$4) \quad \text{探测器位置分辨的因素} \quad (\lambda/\Delta\lambda)_D = (R/\Delta x) \sin \theta_B \text{tg} \theta_B. \quad (6)$$

$$5) \quad \text{谱仪聚焦性能的因素(由于 X 射线入射点 } \theta \text{ 和 } \theta' \text{ 近似重合而引起的)}$$

$$(\lambda/\Delta\lambda)_F = (R/\Delta Q) \text{tg}^2 \theta_B, \quad (7)$$

式中  $h$  为晶体的高度,  $\omega$  为晶体衍射摇摆曲线的半高全宽,  $\Delta x$  是探测器最小位置分辨象元的几何宽度. 由上述关系式可知, 改变晶体的几何参数可以改变谱仪分辨率. 然而晶体的固有属性是不可改变的, 故晶体谱仪的极限能量分辨率将主要由谱仪的聚焦能力决定. 表 1 列出了谱仪

Table 1. Parameters of the bent crystal spectrometer design

$R$	$L$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta$	$L_C$	$L_F$	$\Delta\theta$	$\lambda/\Delta\lambda$
1200	60	16.	13.4	3.34	4.27	21.08	15.49	54.40	2.60	3952.5
		17.	12.6	5.74	6.02	18.74	29.00	91.28	4.36	1279.7
		18.	14.9	3.86	4.49	23.97	16.10	64.72	3.09	4696.0
		19.	12.0	9.64	8.59	15.92	54.33	147.53	7.05	462.9
		20.	15.9	5.08	5.30	25.60	20.01	86.38	4.12	3813.4
		23.	16.8	7.54	7.08	26.88	28.32	129.56	6.19	2587.6
1200	100	24.	17.5	7.86	7.27	28.22	28.34	136.19	6.50	2842.7
		16.	12.5	6.14	5.24	15.09	55.17	73.37	3.50	311.3
		17.	12.5	8.08	5.95	14.14	75.47	93.56	4.47	189.1
		20.	15.9	6.06	5.16	22.07	40.96	85.84	4.10	909.4
		21.	17.0	5.76	4.89	24.36	36.17	84.43	4.03	1296.8
		22.	17.8	5.89	4.87	25.98	35.22	88.19	4.21	1516.7
1000	60	23.	16.3	9.97	7.26	21.25	68.43	140.38	6.71	443.5
		24.	16.6	11.0	7.83	21.38	75.05	155.80	7.44	405.7
		25.	20.7	5.64	4.29	32.06	28.67	89.44	4.27	3047.1
		16.	12.5	4.93	5.98	17.78	25.25	60.84	3.49	1031.9
		17.	14.0	4.04	5.34	21.12	18.14	52.38	3.00	2272.2
		18.	13.8	5.66	6.46	20.21	26.15	72.67	4.16	1235.1
1000	100	19.	12.4	9.75	8.90	15.50	54.22	115.92	6.64	322.8
		20.	15.9	5.32	6.13	24.53	21.11	71.76	4.11	2377.3
		21.	16.2	6.16	6.71	24.95	24.02	83.40	4.78	2041.6
		22.	17.5	5.71	6.30	27.64	20.57	79.12	4.53	3088.3
		23.	17.0	7.59	7.71	26.20	28.30	104.08	5.96	1792.9
		24.	18.0	7.50	7.59	28.26	26.40	104.50	5.99	2275.9
800	60	25.	19.5	6.81	6.96	31.44	22.04	96.75	5.54	3580.5
		16.	12.6	7.29	5.86	13.32	68.58	58.64	3.36	140.0
		17.	12.8	9.84	6.31	12.03	98.53	72.89	4.19	77.1
		18.	13.2	11.3	6.66	11.92	113.26	83.38	4.80	66.0
		19.	15.6	5.77	5.74	20.07	40.41	60.19	3.45	581.1
		21.	16.4	7.54	6.57	20.91	50.92	80.55	4.62	454.9
800	100	22.	17.9	6.28	5.93	24.54	37.86	71.78	4.11	911.4
		23.	16.7	10.5	7.93	20.08	72.19	110.56	6.34	276.8
		24.	16.9	11.8	8.53	19.96	80.94	123.95	7.11	242.3
		16.	11.8	7.17	7.59	13.93	41.75	58.28	4.18	241.6
		17.	13.9	4.61	6.51	19.39	21.17	43.13	3.09	1067.7
		18.	13.6	6.84	7.80	17.69	33.36	62.06	4.45	485.8
800	60	20.	15.8	5.87	7.34	22.77	23.74	58.22	4.17	1202.5
		21.	16.3	6.51	7.77	23.54	25.60	65.27	4.67	1151.3
		23.	14.8	12.3	11.2	18.03	57.98	113.94	8.17	274.6
		24.	17.6	8.64	9.23	25.48	31.74	88.87	6.37	1007.8
		25.	19.3	7.50	8.42	29.29	24.84	79.91	5.72	1805.0
		800	100	16.	13.3	9.05	5.96	11.46	89.32	36.77
17.	13.9			10.8	6.10	11.23	107.97	42.81	3.10	41.2
18.	15.2			5.99	6.55	17.33	44.40	39.23	2.81	274.1
19.	15.3			8.34	7.13	16.10	64.66	51.73	3.71	145.3
21.	18.3			4.70	6.24	24.07	27.55	38.01	2.72	994.8
22.	16.5			11.8	8.36	16.55	88.97	76.11	5.47	105.8
800	100	23.	17.1	12.4	8.75	17.38	89.50	82.80	5.95	115.4
		24.	19.9	6.69	7.17	26.38	36.47	56.87	4.07	763.3

设计的一些典型参数. 数值计算表明: 谱仪的几何参数, 包括靶-晶体的距离  $L$  和晶体曲率半径  $R$ , 对谱仪分辨率及其摄谱范围影响很大. 若  $L$  不变,  $R$  较大, 摄谱范围略大, 谱仪分辨率也较大, 晶体长度要求略短而胶片长度略长; 若  $R$  不变, 靶离晶体越近 ( $L$  越小), 谱仪分辨率则越大, 晶体长度略短, 胶片略长. 由此可知, 谱仪的设计必须考虑到上述诸多因素, 方能在实验中得到清晰可靠的光谱成像.

### 3 针孔晶体谱仪

本文所示的新型 X 射线晶体谱仪, 是在传统的平晶谱仪之前放置一个针孔 (针孔直径视所需分辨率而定), 如图 3 所示. 线状等离子体长度为  $D = \overline{AB}$ ,  $AB$  中心点至针孔的水平距离为  $x$ , 针孔至  $AB$  的距离为  $H$ . 针孔晶体谱仪最大和最小的布拉格反射角分别为

$$\begin{aligned} \theta_{\max} &= \text{tg}^{-1} [(x + D/2)/H] - \alpha, \\ \theta_{\min} &= \text{tg}^{-1} [(x - D/2)/H] - \alpha, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为晶体在垂直方向的倾斜度. 由 (8) 式可以获得针孔晶体谱仪的波长测量范围. 光谱分辨率可以由平晶谱仪的分辨率公式  $\lambda/\Delta\lambda = (L/d) \text{tg} \theta_B$

决定. 其中  $L$  为针孔与底片沿光线方向的距离,  $d$  为针孔直径. 谱仪的空间分辨率便为

$$\Delta x = d(1 + \mu/L), \quad (9)$$

式中  $\mu$  为激光辐射点至针孔的距离. 由于线状等离子体上不同的辐射点及这些点至针孔的距离不同, 谱仪的空间分辨率也不同. 等离子体两端的空间分辨率之比为

$$\eta = \frac{L + \sqrt{H^2 + (x + D/2)^2}}{L + \sqrt{H^2 + (x - D/2)^2}}. \quad (10)$$

实验中由一些特定参数可得  $\eta \sim 1.06$ , 因此, 上述空间分辨率的差异可以忽略不计.

X 射线入射到晶体的能量功率密度正比于针孔截面, 在线状等离子体中, 有效的针孔截面积为  $\pi d^2 \cos \theta_B$ , 那么两条光谱线的功率密度归一化为  $I' = I \pi d^2 \cos \theta_B = I \pi d^2 \sqrt{1 - (\lambda/t)^2}$  ( $t$  为晶格常数. 对于相邻的谱线, 不同的针孔有效截面积即对应于不同的谱线位置. 图 4 和图 5(a) 是针孔晶体谱仪 (TAP 晶体) 拍摄到的线状 Mg 等离子体空间分辨谱及其离靶面不同位置的黑度扫描径迹. 图 5(b) 是所拍摄到的线状  $\text{CaF}_2$  等离子体的黑度扫描径迹. 其中针孔直径为  $50 \mu\text{m}$ , 焦线长度为  $10 \text{ mm}$ . 入射激光波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 脉宽分别为  $900 \text{ ps}$  和  $650 \text{ ps}$ , 能量均为  $600 \text{ J}$ . 由源加宽决定的光谱分辨率  $\lambda/\Delta\lambda \geq 700$ .

针孔晶体谱仪测量 X 射线辐射的一个关键问题是沿焦线方向等离子体介质的均匀性. 这是因为等离子体沿焦线方向的不同位置在谱仪记录底片上产生不同波长的 X 射线, 如果其介质不均匀, 那么产生的谱线容易造成粒子数反转的假象. 此外, 焦线方向上大尺度的非均匀性也是实现自发辐射发射放大主要障碍之一. 在上海光机所 LF12<sup>号</sup> 高功率激光装置中, 激光通

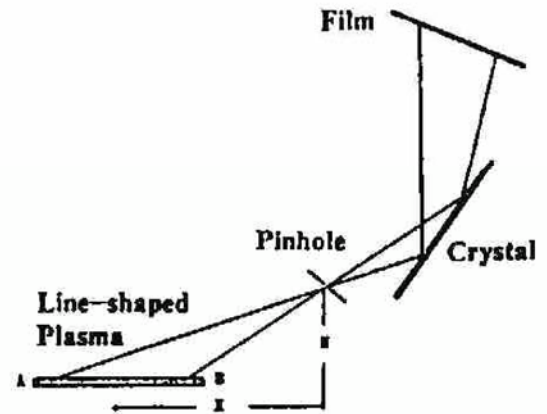


Fig. 3 Experimental setup for the pinhole crystal spectrometer

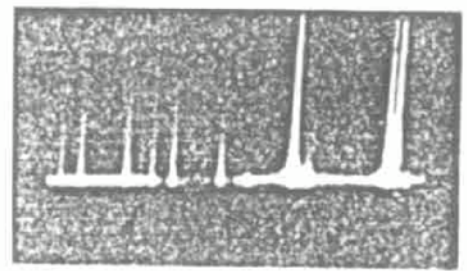


Fig. 4 Space-resolved spectrum of a line-shaped Mg plasma

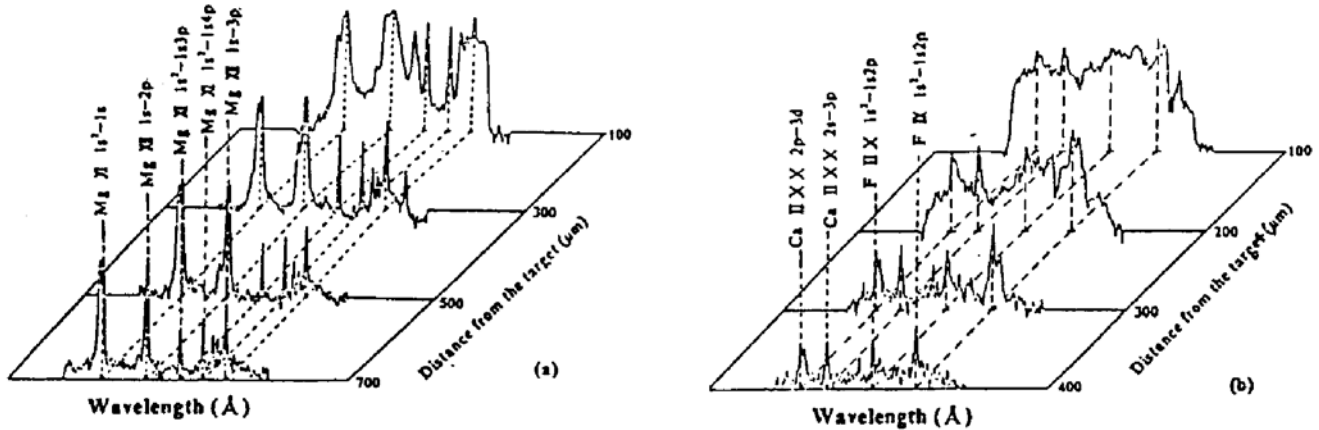


Fig. 5 The distributions of the densitograms of (a) a line-shaped Mg plasma and (b) a line-shaped CaF plasma, as a function of the distance from the target surface

过一非球面透镜( $f/1.7$ )与一柱面透镜阵列辐照在靶面形成一条  $20(12) \text{ mm} \times 120 \mu\text{m}$  的焦线,经测量激光辐照在该焦线上的非均匀性在 5% 以内,所产生的等离子体焦线的非均匀性测得小于 20%<sup>[4]</sup>. 此外,与同类实验点状等离子体光谱相比,靶面上等离子体焦线的均匀性可以直接从连续谱的能量分布得到,或比较对称放置的两个针孔晶体谱仪测得的谱线. 另外,利用多次曝光技术和将不同打靶束次的实验数据取平均值的方法,也可以消除线状等离子体沿焦线方向涨落的影响.

#### 4 晶体谱仪在 X 射线激光实验中的应用

与针孔晶体谱仪相比,弯晶谱仪由于其晶体的弯曲在一定程度上对晶体质量有所影响,所以,针孔晶体谱仪的谱分辨率大于弯晶谱仪的谱分辨率是可能的. 因此,弯晶谱仪可以着眼于激光等离子体的二维单色成像实验,研究 X 射线激光增益区域的等离子体均匀性. 二维单色成像还是有用的诊断测量工具,与条纹相机相连,还可以同时对某一线谱进行时空演化过程的实验研究.

针孔晶体谱仪在 X 射线激光实验中可以有如下应用: 1) 检验不同打靶束次在自发辐射发射增益测量中的重复性; 2) 获得有关自发辐射发射增益的测量,研究上下激光能级间的粒子数反转; 3) 进行等离子体参数诊断,如电子温度,电子密度,以及电离分布等. 在泵浦激光脉冲期间,这些参数均可以从谱的伴线或连续辐射分布推得. 另外,利用时间选通的方法<sup>[6]</sup>,针孔晶体谱仪还可获得时空分辨谱. 利用傅里叶自重卷积的解谱方法,可以将谱线中叠加的成份区分开来,从而提高谱仪对谱线精细结构的识别. 这一方法虽然不能改善晶体本身的分辨能力,却很大程度上能够帮助辨别谱线的细致成份.

#### 参 考 文 献

- [1] M. A. Blokhin, *Methods of X-ray Spectroscopic Research*, Ed. by M. A. S. Ross, (Pergamon, Press Inc. New York 1965), 169~185
- [2] B. Yaakobi, T. Boehly, P. Audebert, Focusing X-ray spectrograph for laser fusion studies. *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, 61(7): 1915~1919

- [3] J. C. Kieffer *et al.*, Monochromatic X-ray imaging of a laser produced plasma. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(20) : 4333~4336
- [4] Wang Xiaofang, Xu Zhizhan *et al.*, Evolution of spectrally discriminated spatial uniformity of line-shaped plasmas. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(25) : 2901~2903
- [5] H. Azechi *et al.*, Multifrequency X-ray backlighting of laser-imploded targets. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(11) : 998~1000
- [6] R. S. Thoe, Laser program annual report-UCRL 50021-86 (Lawrence Livermore National Laboratory 3-85), 1986

## Crystal spectrometers in line-shaped plasma measurement and their applications in experimental X-ray laser investigation

Sun Lan      Han Shensheng      Xu Zhizhan  
Zhang Zhenquan      Fan Finzhong

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

(Received 16 October 1992)

### Abstract

We describe a focusing bent crystal spectrometer (BCS) and a pinhole crystal spectrometer (PCS) for X-ray laser experimental study at the high power laser facility LF12<sup>#</sup> of SIOFM. As the improvement of flat crystal spectrometer, the PCS and BCS can be used as a high spectral resolution device, and to get a high quality monochromatic X-ray imaging of an extend laser-produced plasma. Numerical calculations of the BCS' s configuration are presented, with focus on obtaining broader spectrum range and higher spectral resolution. And the possible applications of the crystal spectrometers are demonstrated.

**Key words** bent crystal spectrometer, pinhole, Rowland circle, X-ray laser, spectral resolution.