

高效透射光栅谱仪的初步研究

刘亚青 李儒新 高泉兰 范品忠

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 描述了一种新型透射光栅谱仪的结构和初步的实验结果。该谱仪由掠入射前置光学系统和大面积透射光栅组成, 初步实验表明有可能研制成高效、高分辨的透射光栅谱仪。

关键词 透射光栅, 掠入射光学

1 引言

越来越多的实验室正在或已经建立了各种台式超短脉冲激光装置, 这种激光装置的脉宽一般为几百飞秒, 能量为几百毫焦耳。此激光装置虽然功率极高, 但由于持续时间太短, 仍属于低能激光系统。因此, 这种装置产生的激光等离子体的发射也是很弱的。为获得超短脉冲激光等离子体所发出的光谱, 一般采用多次曝光方法, 要积累成百上千个激光打靶脉冲才能获得可以处理的曝光底片, 因此谱仪的效率对于超短脉冲激光等离子体光谱研究就变得非常主要了。一台软 X 光谱仪, 由于色散元件不同, 而各有其优缺点。以凹面等间距反射式光栅为色散元件的掠入射光栅谱仪, 其光谱分辨率很高, 但衍射效率很低^[1,2], 且焦面是曲面, 这不利于谱仪和新一代探测器(如 MCP, CCD)等的连接, 而变间距反射式凹面光栅能使平场谱仪的效率很高, 但高阶谱和一级谱相比衍射效率也不低, 这使得光谱重叠严重^[3], 不利于光谱分析。另外, 以上两种谱仪的调整也非常复杂, 双晶谱仪虽然分辨率极高, 但摄谱范围太小且效率非常低^[4]。而透射光栅不但其一级谱比高级谱的衍射效率高许多^[5], 而且只要 $a/d = 1/2$, 就可以使偶级光谱完全消失^[6], 使光谱分析更方便。另外, 从调整角度看, 透射光栅谱仪调节比较方便, 所以采用透射光栅作为色散元件来研制高效软 X 光谱仪是很理想的。目前广泛采用的针孔透射光栅谱仪由于入射光的收集角太小限制了谱仪的效率, 而且由于实际利用的光栅刻槽总数太少使得光谱分辨率太低^[7], 加狭缝的大面积透射光栅谱仪也存在这些问题。而本文描述的加掠入射前置球面镜的大面积透射光栅谱仪的结构和初步实验表明, 此谱仪的集光效率被提高, 且由于充分利用光栅总刻槽数有可能提高光谱分辨率, 为将来研制高效率、高分辨率的透射光栅谱仪, 适应超短脉冲激光与物质相互作用光谱诊断需要作准备。

2 基本概念

在介绍谱仪之前, 首先定义几个基本概念:

2.1 入射光接收角

对狭缝透射光栅谱仪是指狭缝对光源的张角 $\beta = a/s_1$, 其中 a 为狭缝的宽度, s_1 为光源到狭缝的距离。对加前置球面镜的大面积透射光栅谱仪则是指球面镜对光源的有效张角(即能被光栅利用的那部分光):

$$\beta = b \times \cos(\gamma)/s_2 \quad (1)$$

其中 b 是透过光栅的那部分光在球面镜上的宽度, s_2 是光源到球面镜中心的距离, $\cos(\gamma)$ 是光源对球面镜中心的入射角。

2.2 光谱分辨率

光栅在理想情况下, 最小能分辨的波长间隔为

$$\Delta\lambda = \lambda/kN \quad (2)$$

其中 k 是衍射级数, N 是总的刻槽数, 总的刻槽数越多, 谱仪的光谱分辨能力就越大, 但在实际情况中还要考虑源加宽对光谱分辨的影响。根据图 1 中本谱仪的尺寸, 源加宽对光谱分辨的影响为

$$\Delta\lambda' = d \times (\sin\alpha' - \sin\alpha) \quad (3)$$

其中

$$\sin\alpha = \lambda_0/d + \sin\theta_0$$

而 α' 由

$$\frac{198 \times \sin(\alpha - \theta_0)/\sin(85.431 + \theta_0 - \alpha) + S'}{\sin(\alpha' - \theta_0)} = \frac{198}{\sin(85.431 + \theta_0 - \alpha')}$$

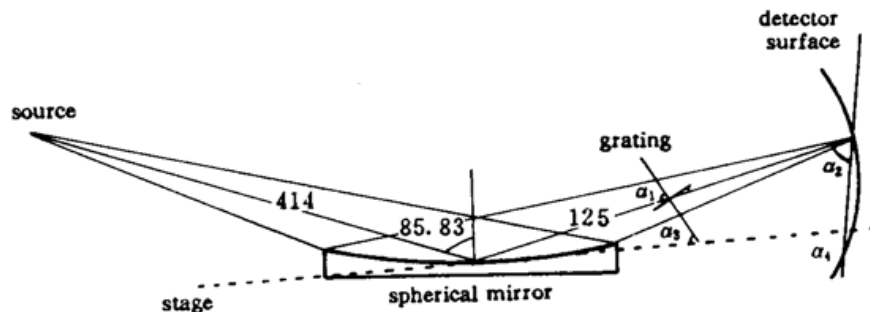


Fig. 1 Schematic diagram of the ray path ($\alpha_1 = 87.464^\circ$, $\alpha_2 = 85.431^\circ$, $\alpha_3 = 83.5^\circ$, $\alpha_4 = 89.395^\circ$)

求得, 其中 s' 是波长为 λ_0 的光谱在底片上的像宽度, d 是光栅间距, θ_0 是零级相对于光栅法线的夹角, α 是 λ_0 的一级光谱对光栅法线的理想夹角, α' 是考虑 S' 时 λ_0 的一级光谱对光栅法线的夹角, 这里没有考虑球面镜成像的像差因素。

3 谱仪的结构和参数

这台谱仪是由前置球面镜作为集光和光谱聚焦元件, 大面积透射光栅作为色散元件, 5FW 软 X 光底片作为接收元件的谱仪。

完整的子午面光路图如图 1 所示, X 光源是由激光等离子体发出的, 宽为 $100 \mu\text{m}$, 经半径为 5000 mm 的球面镜和透射光栅成一个缩小像 ($1.28 : 1$) 于焦面上。此谱仪不需要加狭缝, 也不需要加针孔, 其成像的好坏除了受球面镜掠入射成像的像差影响之外, 由于透射光栅的色散使底片平面和焦面不相重合, 且对于不同的波长离焦的程度不同, 因此在底片上不同波长的像

宽度不同,其数值关系 $S'(\lambda)$ 如图 2 所示。知道了底片上像的宽度 s' ,就可具体计算源加宽对光谱分辨的影响。

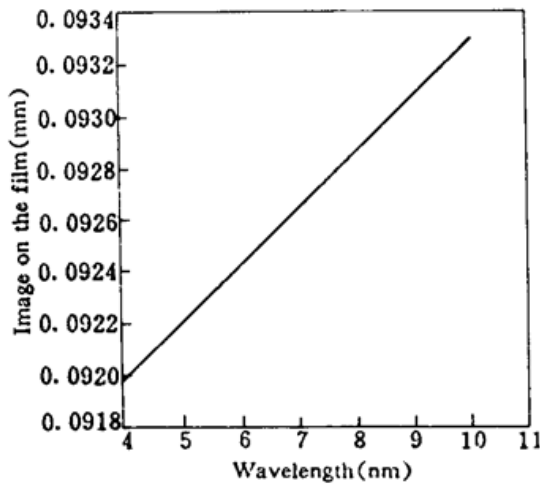


Fig. 2 The width of spectral lines (mm) in the film versus wavelength

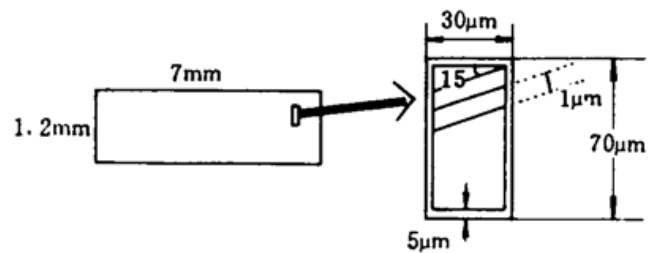


Fig. 3 Schematic diagram of the transmitting grating

如图 3 所示,谱仪所用的大面积透射光栅的有效面积是 $1.2 \times 7 = 8.4 \text{ mm}^2$,其中无支撑部份是长、宽分别为 $70 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ 的长方形,其间是间距为 $1 \mu\text{m}$ 的刻槽,且刻槽和支撑架的短边 ($30 \mu\text{m}$) 成 15° 倾角,支撑架的宽度为了 $5 \mu\text{m}$,整个光栅是用金箔光刻而成的。

另外,根据文献[7]给出的公式

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{u^2 \sin(a/d \times m \times \pi)^2}{m^2 \sin(a/d \times u \times \pi)^2} \quad (4)$$

只要测得某一波长除零级以外的任何两级谱线强度之比,就可得到 a/d 的数值。如果还能知道光栅的厚度,那么此透射光栅的衍射效率就可由文献[5]所述方法计算而得。

用球面镜作为收集 X 光的元件,可大大提高收集角,从而提高谱仪的效率,以适应超短脉冲激光打靶的实验研究。如图 1 所示,光源离镜子中心 414 mm ,且成 85.83° 角入射,由于光栅在垂直主光线方向的有效宽度为 1.1988 mm ,并距球面镜 125 mm ,因此球面镜在子午面上的有效长度为 28.06 mm ,其相对于光源的收集角约为 4.93 mrad 。此谱仪比处于同一位置,用同一光栅加上 $50 \mu\text{m}$ 的狭缝透射光栅谱仪的收集角大了约 40 倍,因此效率也就提高 40 倍。另外,还可以调节镜子的半径,以及物距、入射角、光栅的位置,使此谱仪的分辨率和集光效率达到最佳组合。

在本文所描述的谱仪中,其光栅在理想情况下,根据公式(2)一级谱在 4.0 nm 处,最小可分辨开的波长为 $\Delta\lambda = 4/120 \text{ nm}$ ($N = 1200$)。另一方面,在波长为 4.0 nm 附近,由于源加宽的影响,计算得 $\Delta\lambda' = 4.7 \text{ nm}$ 。由此看出,源加宽对光谱分辨的影响很严重。如能减小源的宽度,那么大面积透射光栅谱仪的光谱分辨率就可以大幅度提高。

4 实验与结果分析

实验是在上海光机所 115" 高功率激光装置上进行的。以激光等离子体发出的 X 光作为光源,波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 脉宽约为 200 ps ,输出能量为 $4 \sim 7 \text{ J}$ 的驱动激光经 f/l 的非球面透镜聚

焦在表面抛光的铜块状靶上,实验布置图如图 4 所示,整个系统处于 7.98×10^{-2} Pa 的真空系统中。

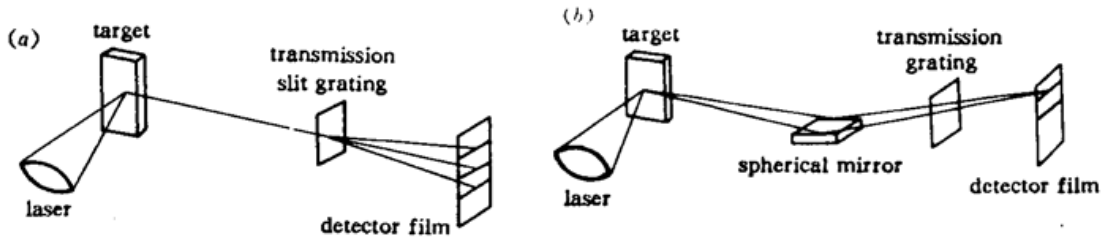


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup: slit transmitting grating spectrograph (a) and grazing transmitting grating spectrograph (b)

实验一〔图 4(a)〕是为了确定光栅常数 a/d 。在光栅前加一个 $30 \mu\text{m}$ 的狭缝,设计成一个狭缝透射光栅谱仪,在轴向接收铜等离子体的 X 光光谱。其中打靶能量累积 17.9 J 的光谱及黑度扫描图如图 5 所示。由于 5FW 软 X 光底片在波长为 1.1 nm 附近没有被定标过,但在这里铜的二级以上 K 带光谱强度较弱,黑度不超过 0.5 ,所以可用 $I_3/I_2 = D_3/D_2$ 近似。于是根据实验结果,以及公式(4)得 $a/d = 0.57$ 或 0.43 。根据 a/d 和衍射效率的关系得出结论,用此光栅摄谱,其二级谱和高级谱的衍射效率比较弱。

实验二〔图 4(b)〕是本文重点描述的加球面镜的大面积透射光栅谱仪在轴向接收铜等离子体的 X 光光谱的实验。经能量为 6.7 J 的激光打靶,其光谱和黑度扫描图如图 6 所示。从实验结果可以看出:

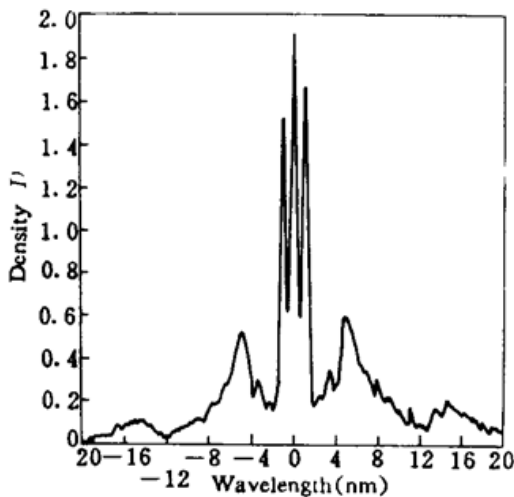


Fig. 5 Typical Cu spectral microdensitometer trace of the slit transmitting grating spectrograph

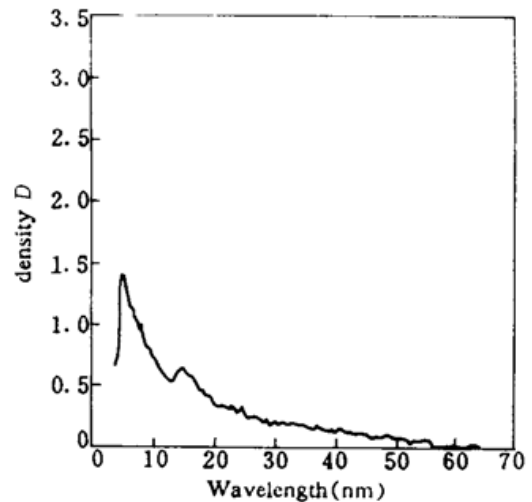


Fig. 6 Typical Cu spectral microdensitometer trace of the grazing transmitting grating spectrograph

(1) 由于此谱仪的入射光收集角较大,所以在底片上接收到的 5.0 nm 左右波段的 X 光光谱黑度可达到 1.4 ,比实验一中能量累积至 17.9 J 时的同一波段处的黑度 (< 0.6) 要高许多,这有利于超短脉冲激光打靶的 X 光弱发射的接收。

(2) 由于光源相对于球面镜的入射角不够大,所以 $< 4.0 \text{ nm}$ 的谱线被截止掉了。如果改用表面镀镍的球面镜,那么只要入射角为 86.14° ,波长为 1.8 nm 的谱线其反射率可达到 0.9977 ,于是谱仪的截止波长可向短波长推进。

(3) 从图 6 的 $D(\lambda)$ 图中可以看出, 由于此谱仪的结构参数不够理想, 使得源加宽的影响严重, 从而谱线的光谱分辨率不高, 只有缩小源加宽的影响, 才能充分利用大面积透射光栅的刻槽数多的优点来提高谱仪的光谱分辨率。

5 结 论

以一个球面镜作为集光和聚焦元件的大面积透射光栅谱仪由于入射光的收集角增大, 因此谱仪的效率得到明显的提高, 这有利于超短脉冲激光与物质相互作用所发射的弱 X 光的诊断, 但源加宽使光谱分辨率得不到提高。另外, 由于球面镜的入射角不够大, 影响了谱仪的摄谱范围。如果增大球面镜的曲率半径, 使光源对球面镜成缩小倍数更大的像, 同时又保证像距不至于太小, 从而使光谱色散足够大, 这样有望研制成效率和分辨率都高的大面积透射光栅谱仪。

致谢 作者衷心感谢 115[#] 高功率激光装置运行组的陆海鹤高工及其全体工作人员的帮助。

参 考 文 献

- 1 L. Garifo *et. al.*. Grazing incidence spectrograph-monochromator with a focusing toroidal mirror. *Appl. Opt.*, 1979, 18: 1900
- 2 U. Teubner *et. al.*. Detailed study of the effect of a short prepulse on soft X-ray spectra generated by a high-intensity KiF laser pulse. *Appl. Phys. B*, 1992, 54: 493
- 3 W. Schwanda *et. al.*. Characterization of a flat-field grazing-incidence XUV spectrometer. *Journal of X-ray Science and Technology*, 1993, 4: 8~17
- 4 A. A. Hauer *et. al.*. High-resolution X-ray spectroscopic diagnostics of laser-heated and ICF plasmas. *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(1): 3~48
- 5 H. W. Schnopper *et. al.*. Diffraction grating transmission efficiencies for XUV and soft X-rays. *Appl. Opt.*, 1977, 16(4): 1088
- 6 李跃林等. 透射式光栅光谱仪摄谱性质的研究. *光学学报*, 1991, 11(2): 105
- 7 王晓方等. X 射线透射光栅谱仪用于激光等离子体辐射特性的研究. (1) 实验研究. *中国激光*, 1990, 17(7): 407

Preliminary Study on a High-efficiency Transmission Grating Spectrograph

Liu Yaqing Li Ruxin Gao Quanlan Fan Pinzong

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

Abstract The schematic of a novel transmission grating spectrograph and the preliminary experimental results are described. This spectrograph is composed of a grazing-incidence optical system and a transmission grating. The experimental results show that it is possible to construct a transmission grating spectrograph of high-efficiency and high spectral resolution.

Key words transmission grating, grazing-incidence optics