

透射式光栅光谱仪摄谱性质的研究

李跃林 陈时胜 钱爱娣 王晓方 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 2018000)

提 要

本文从理论和实验上探讨了透射光栅的光栅参数和实验几何条件对于光栅的衍射效率、色散、光谱对称性及散射本底的影响, 对于这些摄谱性质的了解, 将有助于实验数据的分析。

关键词: 透射光栅光谱仪, 软 X 射线光谱。

一、引 言

透射式光栅光谱仪近年来在激光等离子体的研究中得到了广泛应用^[1~4], 一些实验室还将其应用于 X 射线激光的研究^[5]。

由于技术条件的限制, 要将光栅做到无缺陷是十分困难的事情, 实际使用中随机的偏差, 也会对实验结果造成不良影响。所以很多作者都对这些问题进行了理论和实验分析^[6~9]。

我们从 1986 年开始从事透射光栅谱仪的研制和使用^[10~13], 也发现光栅不均匀性会严重影响到其摄谱质量。本文将对在实验上遇到的一些问题, 进行分析, 以期在将来的实验中避免类似的问题。

二、透射光栅简介

图 1 给出了目前所使用的光栅的电子显微镜扫描图。这些光栅为金制无支撑的, 有 $\phi 55 \mu\text{m}$ 和 $\phi 25 \mu\text{m}$ 两种针孔规格, 光栅周期有 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 。针孔本身就具有成像能力, 加上光栅的色散就可以使我们得到空间分辨光谱, 或者光谱分辨的成像。针孔成像的好处是可以较为容易地避免由掠入射前置聚光元件带来的像散^[14]。

光栅的色散关系为 $d \sin \theta = m\lambda$, 其中 d 为光栅常数, λ 、 m 、 θ 分别为入射光波长、衍射级别和散射角; 如果像距 $L \gg y$, 则线色散 y 为,

$$y = mL\lambda/d. \quad (1)$$

其光谱分辨能力主要受到光源线度的影响:

$$\Delta\lambda_s = dS(\lambda)/mL, \quad (2)$$

式中 $S(\lambda)$ 为光源的大小。显然, 在几何条件相同时, 如果需要得到更高的光谱分辨能力, 就要采用具有更小的光栅常数的光栅。

透射光栅相对于目前广泛使用的反射光栅源来, 其优点就是具有较高的衍射效率, 其一

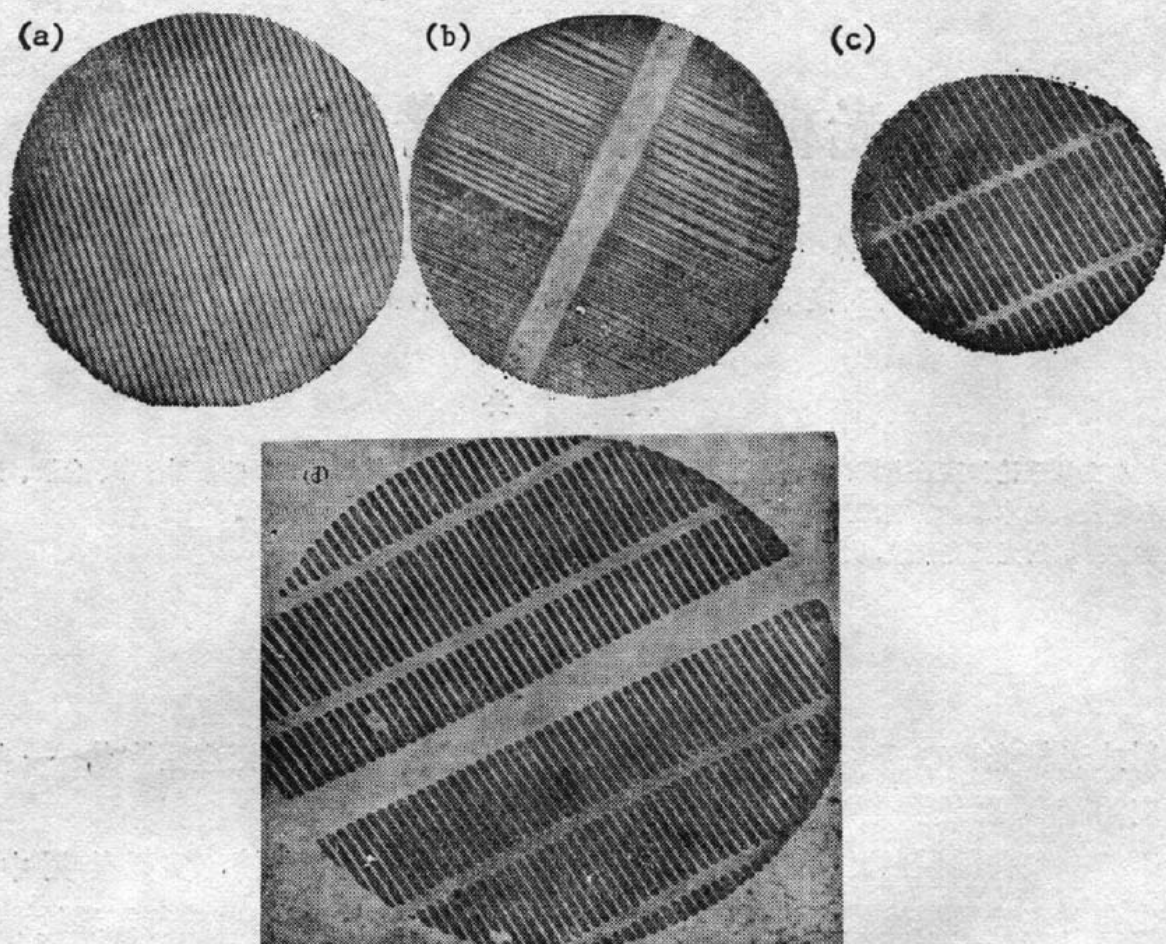


Fig. 1 SEM potographs of the pinhole transmission gratings.
 (a) 2000 l/mm, $\phi 25 \mu\text{m}$; (b) 2000 l/mm, $\phi 50 \mu\text{m}$;
 (c) 1000 l/mm, $\phi 25 \mu\text{m}$ and (d) 1000 l/mm, $\phi 50 \mu\text{m}$

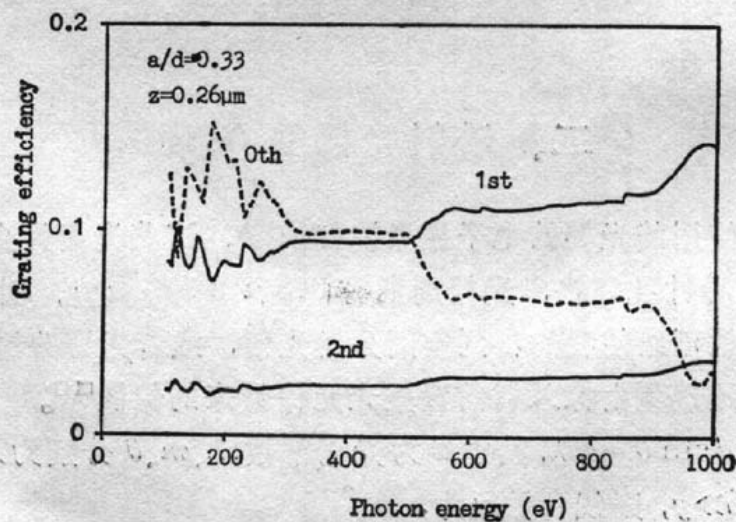


Fig. 2 A theoretical result of the grating efficiencies vs. photon energy
 级谱的效率高达10%。图2给出了用Schnopper公式^[7]计算的一个光栅在亚千电子伏区域内的衍射效率,在部分波段,一级效率甚至超过了10%。

三、光栅性质分析

1. 光栅缺陷对光栅性质的影响

标志光栅的参数除光栅常数 d 外,还有光栅条纹间距与光栅常数之比 a/d 和光栅刻纹

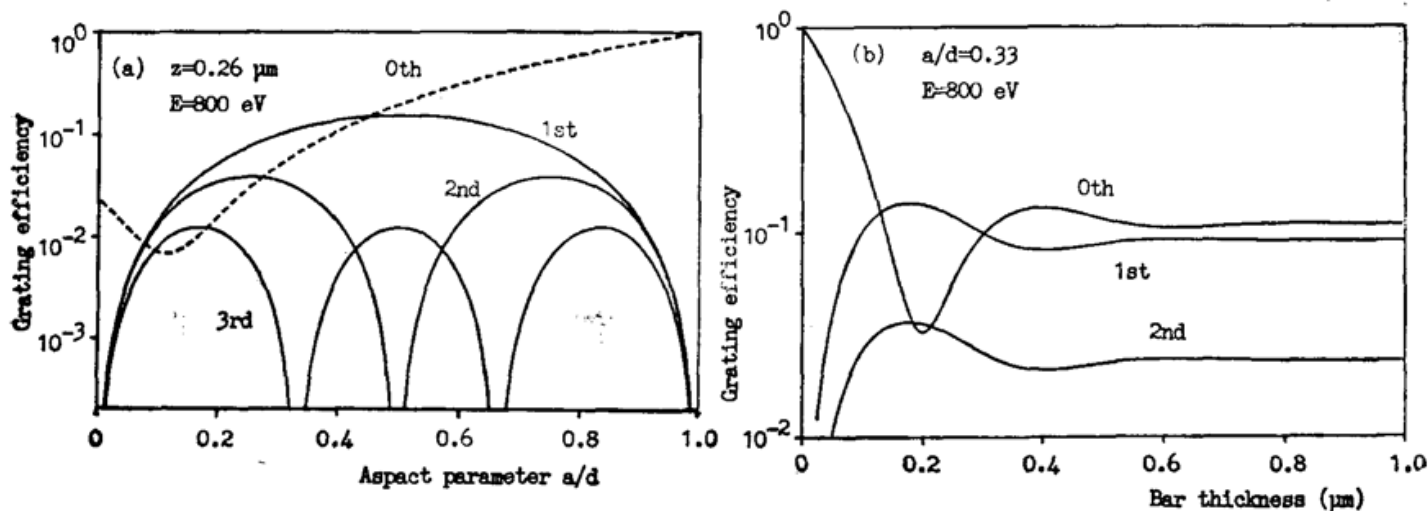


Fig. 3 Theoretical results of grating efficiencies vs. grating bar thickness and aspect ratio a/d

(a) Efficiencies vs. a/d ; (b) Efficiencies vs. bar thickness s

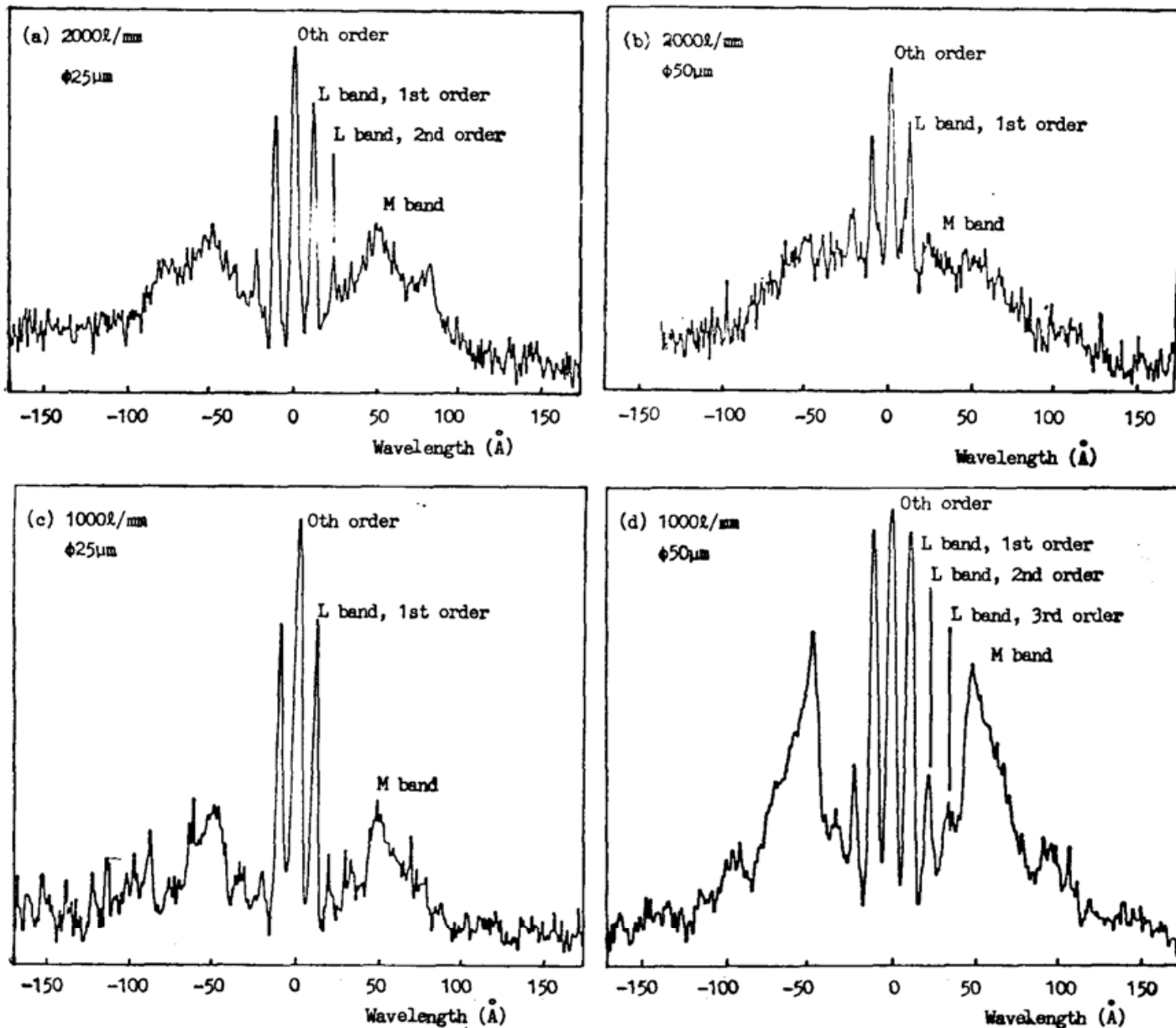


Fig. 4 Density traces of spectra from Cu-slab targets by the respective gratings in Fig. 1

The laser energy are (a) 6.7J; (b) 8.8J; and (c), (d) 10.3J, respectively

厚度 z 。作者曾用 Schnopper 公式对光栅参数进行过分析^[10], 图 3 给出了这样一组结果。从图 3 可以看出, 如果光栅条纹的宽度和厚度不均匀, 就会造成光谱强度失谐, 导致一级谱减弱甚至湮没, 高级谱在光谱中成为主要成分, 从而给分析造成困难。

然而在图 1(b) 中的光栅明显还具有光栅常数 d 的不均匀性, 这种不均匀性, 将使光谱外形被严重畸变。因为这时由于 d 有多个值, 按(1)式, 则同一入射光波将会有多个线射散, 其叠加结果是光谱外形被严重扭曲, 而原始色散位置上的衍射强度也大大削弱。由于激光等离子体发射非常丰富的软 X 射线, 其综合效果将是一张无法辨识的光谱图。

图 4(a)~(d) 给出了用图 1 中各相应光栅所拍摄的铜靶点聚焦激光等离子体的光谱。实验是在上海光学精密机械研究所六路高功率激光装置上进行的, 激光波长 $1.06 \mu\text{m}$, 功率密度 $\sim 10^4 \text{ Wcm}^{-2}$, 实验几何布局见图 5(b), 其中光栅光轴与靶面法向夹角为 37° 。图 4(a)、(b) 采用了 Kodak-101-01 软 X 光胶片, 图 4(c)、(d) 则是国产的软 X 光胶片, 且是对同一次打靶的记录, 打靶能量是(a)、(b)两枪的三倍左右。4 张光谱都由 Cu-L(11 \AA) 线谱和带状分布的 Cu-M(峰值在 49 \AA 处) 线谱组成。

图 4 所示的 4 张光谱图外形并不一样, 这一方面是由于采用的胶片不同。按 Henke 的标定结果^[15], Kodak 软片在整个软 X 光谱范围内有一平滑的响应, 因此我们认为(a)谱大致代表了光谱发射的强度分布。在(d)中高耸的 M 峰, 说明该种国产软片可能在该光谱区域有较好的响应。另一方面则是光栅不同。(a)、(d)中 L 峰有清楚的二级谱, (d)中还有三级谱, (c)中则基本看不到高级谱。由图 3(a)可知这是由于这些光栅 a/d 不同, 由实验分析得出的对应于(a)、(c)、(d)的 a/d 值为 0.33, 0.44, 0.41。由 M 带谱看来(a)的光栅由于光栅常数小, 因而有更好的光谱分辨。

与其余光谱不同的是(b)光谱的 M 带被基本抹平, 且在 L 峰与零级斑之间还多了一些较小的峰。(c)、(d)光谱由于缺乏定标律, 可以采用一般的近似: $I \propto T_B/T_S$ 。 T_B 、 T_S 分别是胶片上本底和信号的透射率。对 L 峰处理的结果给出 $I_a \approx 4I_c$ 。由于(d)光栅的接收截面是(c)的 4 倍, 说明该二光栅具有相近的一级衍射效率。对(a)、(b), 采用 Henke 的标定律^[15]:

$$I \propto \log\left(\frac{1.96}{1.96 - D}\right),$$

其中 D 为信号净黑度; 用激光能量归一之后, 有 $I_b \approx 1.5I_a$ 。假定(a)光栅一级衍射效率为 10%, 则(b)光栅效率只有 4%。实际上, 在零级和 L 峰之间的小峰导致了一级效率的降低, 也就是 Kishimoto 讨论过的由于光栅缺陷而造成的散射背景^[6]。相对于衍射效率, 他提出了散射常数。在无散射时, 光栅传输函数为:

$$G(y, \lambda) = \sum_m \eta_m h(\lambda) \delta\left(\frac{y}{m} - \lambda\right). \quad (3)$$

其中 η 、 h 分别是光栅效率和胶片响应。引入散射因子后, 则:

$$G(y, \lambda) = \sum_m \eta_m h(\lambda) \delta\left(\frac{x}{m} - \lambda\right) + \sum_m \frac{b_m}{\lambda} \Delta\left(\frac{\lambda}{m}, \frac{\lambda}{m-1}\right) h(\lambda), \quad \left. \begin{array}{l} \\ \Delta\left(\frac{\lambda}{m}, \frac{\lambda}{m-1}\right) = \begin{cases} 1 & \lambda/m \leq y \leq \lambda/m-1, \\ 0 & \text{其余。} \end{cases} \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\sum_m m \cdot \eta_m + \sum_m b_m = (a/d) [1 - (a/d)].$$

这里的 b 就是散射因子, 仍需由实验测得。若 $a/d=0.5$ 。由 $\sum \eta_m=0.04$ 我们得到 (b) 光谱 $\sum b_m \approx 0.2$ 。但实际分析中, 如果没有图 4(a) 作比较, 即使知道了散射常数, 对 (b) 光谱仍然难以进行分析。

2. 实验几何条件的影响

在图 4 的几张光谱图中, 可以看到其对于零级都有一定程度的不对称。特别在远离零级斑的长波处本底很不对称。这很可能是由于光栅平面与入射光线有一小夹角, 使光栅纹侧面成为反射平面, 将一部分入射光反射到光谱的一侧; 这种微小的倾斜无法在实验上定量测出, 却严重妨害对长波长光谱的分析。在倾角较大时, Tytchyn 发现光栅的色散也出现非对称, 并据此提出了将透射光栅作为测角计使用的构想。当然这种倾斜会造成阻塞效应^[8], 影响光栅的衍射效率。

近零级的非对称则与实验布局有关。图 5 给出了两种布局。在图 5(b) 的布局下, 由于等离子体的喷射, 在色散方面的成像就不对称。其效应可以在图 4(c)、(d) 中清楚地看到。但这种布局在线聚焦打靶时, 可以使空间和光谱分辨都得到保证。在点聚焦打靶时, 图 5(a) 的布局可以避免由于等离子体喷射而造成的成像不对称; 如果激光聚焦良好, 还可以提高光谱的分辨水平。

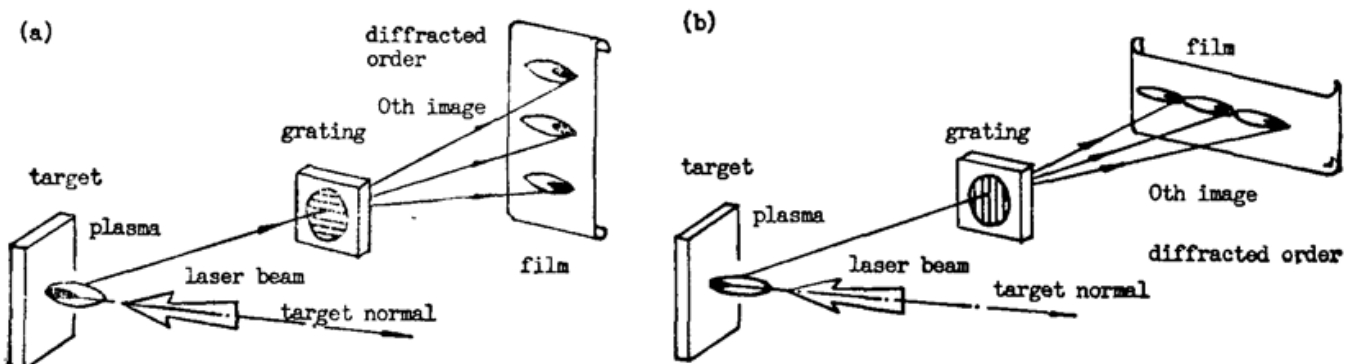


Fig. 5 Two geometry scheme of the experiments.

(a) grating bars in horizontal direction; (b) Grating bars in vertical direction

四、结 论

分析了透射式光栅参数缺陷和几何布局对其摄谱性质的影响, 这些性质包括其衍射效率、线色散、对称性和散射本底。这些分析将有助于继续发展和使用透射光栅谱仪。

参 考 文 献

- [1] N. M. Ceglio *et al.*; *Proc. SPIE*, 1981, Vol. 316, 134~141.
- [2] Y. Kato *et al.*; *Proc. SPIE*, 1986, Vol. 664, 151~160.
- [3] R. Sigel *et al.*; *Proc. SPIE*, 1987, Vol. 331, 73~83.
- [4] R. Fedosejevs *et al.*; *Proc. SPIE*, 1987, Vol. 688, 273~242.
- [5] N. M. Ceglio *et al.*; *Proc. SPIE*, 1986, 688 26~32.
- [6] T. Kishimoto; *MPQ Report*, 1985, **MPQ 108**, (Dec).
- [7] H. W. Schnopper *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 4 (Apr), 1088~1091.
- [8] R. Tatchyn, I. Lindu; *Nucl. Instrum & Meth.*, 1982, **195** (Jan), 163~173.
- [9] R. Tatchyn, I. Lindu; *ibid.*, 419~422.
- [10] 李跃林等;《光学学报》, 1989, **9**, No. 5 (May), 550~556.
- [11] Yao-Lin Li *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1990, **49**, No. 8 (Apr), 4528~4530.
- [12] 王晓方等;《物理学报》, 1990, **39**, No. 5 (May), 764~769.
- [13] 徐至展等;《中国激光》, 1989, **16**, No. 2 (Feb), 128.
- [14] K. P. Benemann, R. Lenzen *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 5 (May), 1425~1431.
- [15] B. L. Henke *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1984, **1**, No. 8 (Aug), 828~840.

Study of spectrographic properties of transmission gratings

LI YAOLIN, CHEN SHISHENG, QIAN AIDI, WANG XIAOFANG AND XU ZHIZHAN
 (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Academia, Shanghai 201800)

(Received 11 July 1990)

Abstract

In this paper, we give a insight of the spectrographics properties of transmission gratings. These properties such as diffraction efficiency, line dispersion, dispersion symmetry and scattering background are seriously influenced by the grating parameters and the geometry schemes of the experiments. The discussion given here will be profitable to analysis of the experimental data.

Key words: transmission grating spectrometer, soft X-ray spectroscopy.