

基于移位双光栅色散元件的X射线谱仪研制

易涛 王传珂 杨进文 朱效立 谢常青 刘慎业

Investigation into the design and diffraction efficiency of shifted dual transmission grating

Yi Tao Wang Chuan-Ke Yang Jin-Wen Zhu Xiao-Li Xie Chang-Qing Liu Shen-Ye

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 165201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.165201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.165201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲辐射成像绝对测量方法研究

Absolute measurement of pulsed radiation imaging

物理学报.2013, 62(22): 225203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.225203>

相位型波带板应用于大尺度X射线源成像的分析与模拟

Analysis of imaging an extended X-ray source by using a Fresnel phase zone plate

物理学报.2013, 62(1): 015208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.015208>

神光II激光装置黑腔辐射温度定量研究

Quantitative study of radiation temperature for gold hohlraum on SG-II laser facility

物理学报.2011, 60(5): 055207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.055207>

X射线连续谱法诊断铝丝阵Z箍缩等离子体温度

X-ray continuum spectra for diagnosing plasma temperature in aluminum wire array Z-pinches

物理学报.2011, 60(4): 045211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.045211>

高动态范围激光等离子体诊断系统及其在惯性约束聚变实验中的应用

High dynamic range imaging and application to laser-plasma diagnostics in inertial confinement fusion (ICF) experiment

物理学报.2011, 60(4): 045212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.045212>

基于移位双光栅色散元件的X射线谱仪研制*

易涛¹⁾ 王传珂^{1)2)†} 杨进文¹⁾³⁾ 朱效立⁴⁾ 谢常青⁴⁾ 刘慎业¹⁾

1)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2)(中国工程物理研究院惯约实施管理中心, 绵阳 621900)

3)(电子科技大学能源科学与工程学院, 成都 611731)

4)(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2016年5月3日收到; 2016年6月7日收到修改稿)

本文针对激光等离子体X射线诊断的需求, 设计开发了移位双光栅X射线谱仪. 该谱仪采用高线对密度和低线对密度的两种光栅组成移位双光栅作为核心衍射组件, 高密度光栅能够提高中、高能区(1000—5000 eV)的能谱分辨率, 低密度光栅能够满足低能区(100—1000 eV)测量的能谱分辨率要求, 控制了低能区谱线的分布空间, 保证足够的测量范围. 两种光栅相互配合实现了谱仪整体性能提升. 本文提出了移位双光栅X射线谱仪结构设计方法和参数指标, 完成了移位双光栅X射线谱仪的集成调试和实验应用, 获得了时间分辨的X光谱实验数据, 测谱范围0.1—5.0 keV, 谱分辨0.04 nm, 时间分辨好于30 ps. 移位双光栅X射线谱仪可以最大程度地利用记录面的长度, 实现高时间分辨和宽谱X射线测量.

关键词: 移位双透射光栅谱仪, 惯性约束聚变, 衍射效率, 时间分辨光谱

PACS: 52.70.La, 61.05.cp, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.65.165201

1 引言

在ICF物理实验中, 激光与黑腔相互作用产生的X射线为连续宽光谱, 既包含了低能段X射线(100—1000 eV), 又包含了中、高能段的X射线(1000—5000 eV), 实现宽光谱X射线诊断对ICF物理实验设计十分重要^[1,2]. 在X射线光谱诊断测量中, 光栅是重要的能谱分析元件. 低线对密度光栅一般用于诊断测量低能段(100—1000 eV) X射线的发射, 光谱分辨较好. 但低线对密度光栅用于中、高能段(1000—5000 eV) X射线测量时, 谱分辨较差, 无法满足精密物理实验的需求. 高线对密度光栅一般用于诊断测量中、高能段X射线的发射, 光谱分辨好, 且测量低能段区域时由于色散距离较

大, 针对这个特点, 研究人员尝试利用两块不同线密度的光栅来同时记录X射线谱^[3]. 然而对于时间分辨的测量仪器而言, 其有限的记录面积使得测量的谱范围受到限制.

为了解决时间分辨测量宽X射线光谱的问题, 研究人员尝试采用两台配备有不同线密度光栅的X射线谱仪, 对不同能谱范围X射线信息进行诊断, 如图1所示. 由于实验排布和仪器体积的限制, 两台谱仪无法安装在同一位置, 只能安装在空间对称的不同方位进行测量. 在实际打靶过程中, 由于每一束激光的能量并不是完全相同的, 存在一定的不确定度, 因此即使在对称的空间方位, X射线信息实际上并不完全相同. 同时采用两台X射线光栅谱仪, 不可避免地会增加实验复杂程度, 增加实验人员的工作量.

* 国家自然科学基金(批准号: 11405158, 11435011)和核废物与环境安全国防重点学科实验室开放基金(批准号: 13zxnk06)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wck1981@caep.cn

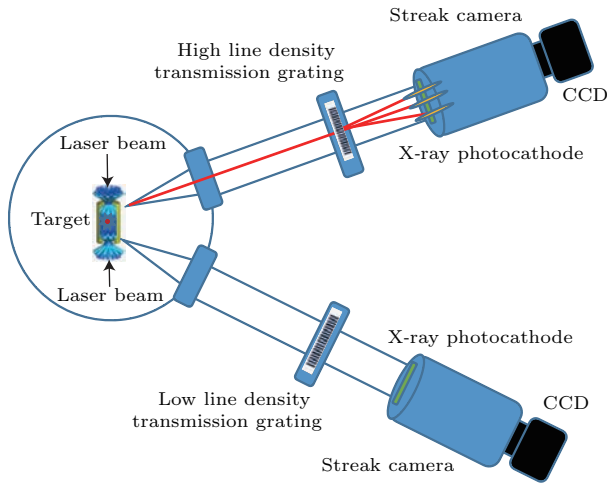


图1 (网刊彩色) 两台不同线密度的光栅谱仪测量不同能段的X射线信息

Fig. 1. (color online) The schematic diagram of two grating spectrometers with different linear density testing X-ray with diverse energy.

本文提出了一种基于移位双光栅色散元件的X射线谱仪. 该谱仪利用移位双光栅取代传统单光栅作为X射线色散元件^[4-6], 移位双光栅是由高线对密度和低线对密度的两种光栅组成的复合衍射组件. 其基本思想是: 使用高线对密度和低线对密度的两种光栅组成移位双光栅作为谱仪的衍射组件, 高密度光栅能够提高中、高能区的能谱分辨率, 低密度光栅足够满足低能区测量的能谱分辨率要求, 控制了低能区谱线的分布空间, 保证有限记录空间内记录更宽的X射线光谱范围. 同时, 研究人

员可以根据需求设计基于单级衍射光栅的移位双光栅^[7], 与平响应光阴极相配合^[8,9], 实现X射线谱仪整体性能提升.

2 移位双光栅X射线谱仪的工作原理

移位双光栅X射线谱仪是一种具有高谱分辨与宽谱测量范围的透射光栅谱仪, 其结构图如图2所示. 包括入射狭缝、移位双光栅、条纹相机以及条纹相机相匹配的移位狭缝和光阴极. 物体发出的X射线通过入射狭缝, 经移位双光栅色散, 形成两个分辨率不同的光谱, 两光谱在空间上移位, 经过条纹相机前的光阴极狭缝, 挡除多余光谱, 即可在条纹相机上获得高时空分辨、宽范围的X射线光谱.

入射狭缝元件(图2中①)固定于移位双光栅元件前面, 入射狭缝元件上刻有狭缝A和狭缝B. 狭缝A的长度大于低线对密度光栅的长度, 中心与低线对密度光栅的中心在 z 方向重合; 狭缝B的长度大于高线对密度光栅的长度, 中心与高线对密度光栅的中心在 z 方向重合. 狭缝A和狭缝B的宽度均为 w , 狭缝宽度与光栅谱仪谱分辨率有关.

图3给出了移位双光栅X射线谱仪诊断的两种布局方式. 方式A, 采用移位双光栅、条纹相机、CCD耦合组成移位双光栅时空分辨谱仪, 平行移位光栅可以实现宽谱测量和较高的空间分辨, 结合

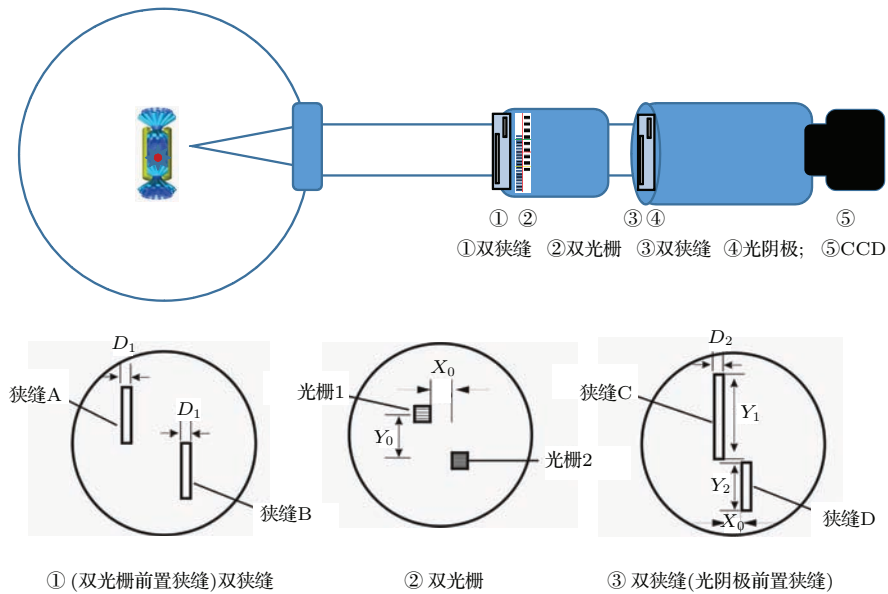


图2 (网刊彩色) 移位双光栅X射线谱仪结构组成

Fig. 2. (color online) Structural components of the shifted dual transmission grating spectrometer.

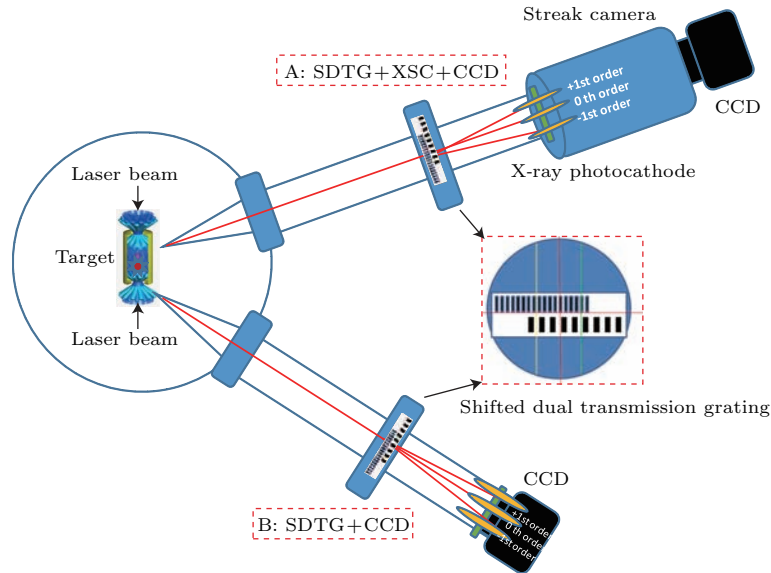


图3 (网刊彩色) 移位双光栅谱仪测量宽谱 X 射线信息

Fig. 3. (color online) The schematic diagram of a shifted dual transmission grating spectrometer testing wideband X-ray.

条纹相机的高时间分辨, 就可以获得具有较高空间分辨和较高时间分辨的宽谱 X 射线信息. 方式 B, 采用移位光栅和 CCD 直接耦合, 可以获得具有较高空间分辨的宽谱 X 射线信息, 但没有时间分辨.

移位双光栅元件(图 2 中②)包含低线对密度光栅和高线对密度光栅. 低线对密度光栅线对密度一般选择 1000—2000/mm; 高线对密度光栅线对密度一般选择 2000—5000/mm. 低线对密度光栅和高线对密度光栅内侧边缘在 x 方向相距距离 X_0 , 其值大小由所测光谱宽度决定; 低线对密度光栅和高线对密度光栅中心在 y 方向相距距离 Y_0 , 其值大小由所测光谱范围及光谱分辨率决定. 低线对密度光栅用来测量低能段软 X 射线区域, 高线对密度光栅用来测量中能段软 X 射线区域. 低线对密度光栅所测量的最短和最长波长分别为 λ_3 和 λ_4 , 高线对密度光栅所测量的最短和最长波长分别为 λ_1 和 λ_2 . 光谱分辨率的公式如下:

$$\Delta\lambda = d\left(\frac{s + D_1}{L_1} + \frac{D_1}{L_2}\right), \quad (1)$$

式中 d 是光栅周期, s 是 X 射线源的光斑尺寸, L_1 是入射光到双狭缝之间的距离, L_2 是双狭缝到记录面之间的距离.

光阴极狭缝(图 2 中③)固定于光阴极元件前, 上刻有两个长度不同、宽度相等的狭缝 C 和狭缝 D. 狭缝 C 底端与狭缝 D 顶端在 y 方向对称, 狭缝 D 底端中心与高线对密度光栅中心在 z 方向重合. 狭缝 C 和狭缝 D 宽度均为 D_2 . 狭缝 C 长度为 Y_1 , 狭缝 D

长度为 Y_2 . 狭缝 C 与狭缝 D 内侧边缘在 x 方向相距距离 X_0 . 光阴极狭缝可减小光栅色散光的干扰, 挡除多余的光谱, 为获得时间分辨光谱的关键器件. 同时, 光阴极狭缝宽度取值大小可决定条纹相机的分辨率, 取值范围为 100—300 μm .

移位双光栅 X 射线谱仪几何光路图如图 4 所示. 光阴极(图 2 中④)紧贴于光阴极狭缝后且覆盖光阴极狭缝. 长度值是 $Y_1 + Y_2$, 宽度值等于 $2D_2 + X_0$. X 射线源的入射波长 λ 在光阴极上的色散关系可表示为

$$\frac{dy}{d\lambda} = \frac{mL_2}{d}, \quad (2)$$

式中 m 为光栅衍射级数. 则光阴极上色散的波长 Y 可表示为

$$Y = \frac{L_2}{d_1}(\lambda_4 - \lambda_2) + \frac{L_2}{d_2}\lambda_2, \quad (3)$$

式中 d_1 为低线对密度光栅的周期, d_2 为高线对密度光栅的周期. 其中第一项为狭缝 C 的长度 Y_1 , 第二项为狭缝 D 的长度 Y_2 . Y 为光阴极的长度, 故 $Y = Y_1 + Y_2$.

此光栅谱仪的能谱分辨本领 $\lambda/\Delta\lambda$ 为

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \begin{cases} \frac{\lambda}{d_1\left(\frac{s + D_1}{L_1} + \frac{D_1}{L_2}\right)}, & \lambda_2 \leq \lambda \leq \lambda_4, \\ \frac{\lambda}{d_2\left(\frac{s + D_1}{L_1} + \frac{D_1}{L_2}\right)}, & \lambda_0 < \lambda < \lambda_2. \end{cases} \quad (4)$$

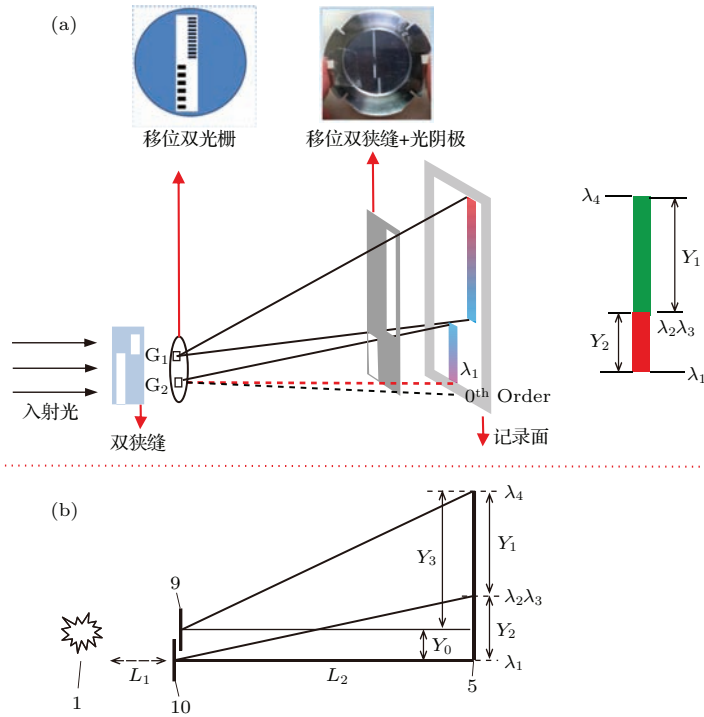


图4 (网刊彩色) 移位双光栅 X 射线谱仪几何光路图

Fig. 4. (color online) Geometric optical path diagram of the SDTG spectrometer.

3 移位双光栅 X 射线谱仪的参数设计

3.1 移位双光栅 X 射线谱仪的设计原则

X 射线谱仪的参数设计需满足以下原则: 首先, 谱仪的能谱测量范围应覆盖实验需要测量的全部 X 射线能区, 在 ICF 物理实验中该范围一般为 100—5000 eV (12.4—0.248 nm); 其次, 为了使高密度光栅和低密度光栅对能谱分辨本领有一个平稳的过渡, 选取光栅的能谱分辨本领((4)式)为 10, 当能谱分辨本领低于 10 时, 选取高线对密度光栅测量, 能谱分辨本领高于 10 时, 选用低线对密度光栅测量; 最后, 由于最终的时空分辨谱图由 X 射线条纹相机记录, 所以, 光谱经光栅色散后经光阴极记录的长度不能超过光阴极大小 (30 mm). 根据以上设计原则, 由 (3) 式和 (4) 式可以得光栅谱仪的设计参数.

$$\frac{\lambda_2}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_2}{d\left(\frac{s+a}{L_1} + \frac{a}{L_2}\right)} \geq 10, \quad (5)$$

$$\frac{L_2}{d_1}(\lambda_4 - \lambda_2) + \frac{L_2}{d_2}\lambda_2 \leq 30 \text{ mm}, \quad (6)$$

式中, a 为入射狭缝宽度.

X 射线谱仪的参数设计中, 光阴极前置狭缝的设计十分重要. 入射光经移位双光栅(图 5(a)

所示)色散后, 在光阴极狭缝前形成两条衍射光带(图 5(b)所示). 由于条纹相机光阴极是高灵敏度诊断仪器, 两条衍射光带图像会发生串扰或干扰的情况. 设计如图 5(c)所示的光阴极狭缝, 可减小两块光栅色散光的互相干扰, 挡除多余的光谱, 提高信噪比. 最终在光阴极上保留实验需要的衍射图样(图 5(d)所示). 两段光谱拼接, 即为移位双光栅 X 射线谱仪可诊断的光谱范围.

3.2 移位双光栅 X 射线谱仪的设计参数

基于移位双光栅 SDTG-1(黑白光栅 + 黑白光栅)进行 X 射线谱仪的参数设计, 两种移位光栅的技术参数如表 1 所列, X 射线谱仪技术参数如表 2 所列.

表 1 两种移位光栅的技术参数

Table 1. Technical parameters of two kinds of shifted grating.

参数	G ₁ (2000 lines/mm)	G ₂ (5000 lines/mm)
测谱范围/keV	0.1—1.09	1.09—5
能谱分辨	10—109	5—25
谱分辨率/nm	0.11	0.05
光栅面积	3 × 0.5	3 × 0.5
时间分辨/ps	10	10
记录长度/mm	23.9	6

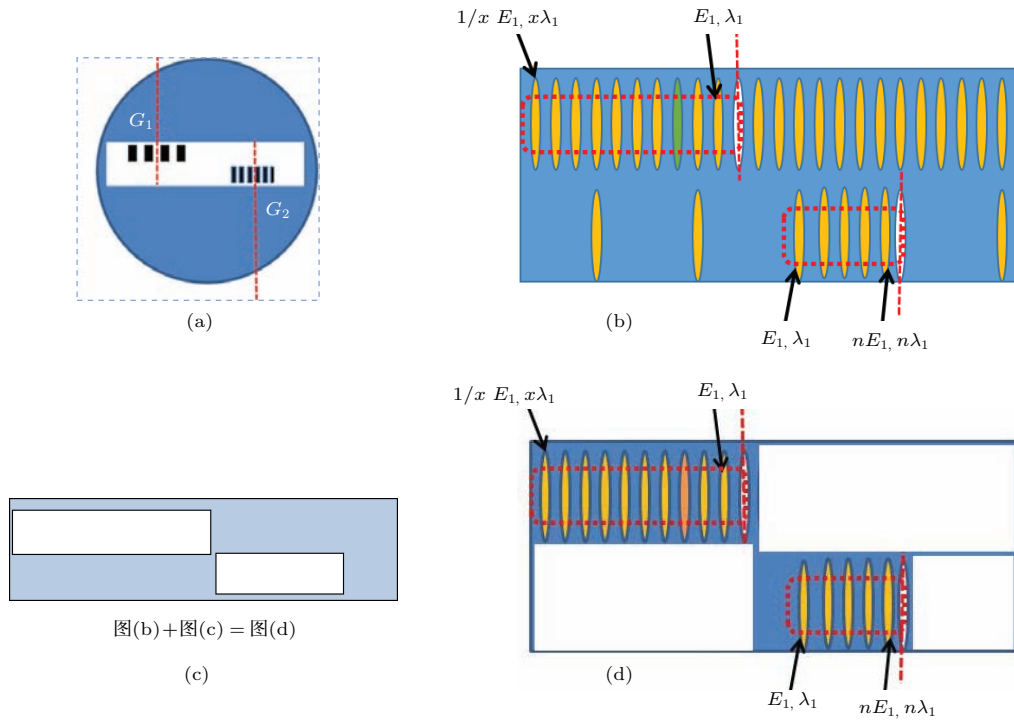


图5 (网刊彩色) 移位双光栅在光阴极上的衍射图像 (a) 移位双光栅; (b) 双光栅衍射图像; (c) 光阴极前置双狭缝; (d) 光阴极上的图像

Fig. 5. (color online) Diffraction images on the photocathode of the shifted dual transmission grating; (a) Shifted dual transmission grating; (b) the photocathode of the dual grating; (c) front-loading double slits on the photocathode; (d) images on the photocathode.

表2 基于两种移位光栅的X射线谱仪技术参数
Table 2. Technical parameters of X-ray spectrometers based on two shifted grating.

参数	要求
光源尺寸 $S_1/\mu\text{m}$	100
狭缝 A/B 宽度 $D_1/\mu\text{m}$	100
光源-光栅 L_1/mm	1500
光栅-阴极 L_2/mm	≤ 1069
光栅垂直间距 X_0/mm	1
光栅平行移位 Y_0/mm	3.5
最小波长 λ_1/nm	0.248 (5 keV)
衔接波长 $\lambda_2/\lambda_3/\text{nm}$	1.14 (1.09 keV)
最大波长 λ_4/nm	12.4 (0.1 keV)

测量能区要求覆盖 100—5000 eV (12.4—0.248 nm), 因此. $\lambda_1 = 0.248 \text{ nm}$, $\lambda_4 = 12.4 \text{ nm}$. 选取双光栅前置狭缝宽度 $D_1 = 100 \mu\text{m}$, X 射线源宽度 $S = 100 \mu\text{m}$, $L_1 = 100 \mu\text{m}$. 同时为了使低线对密度光栅和高线对密度光栅 10 对能谱分辨本领有一个平稳的过渡, 在 λ_2 处选取能谱分辨本领 10.

可得优化距离 $L_2 \leq 1069 \text{ mm}$, 进一步求的优化后的 $\lambda_2 = 1.14 \text{ nm}$ (约 1.09 keV).

通过计算可以得到 2000 线对密度光栅的所测谱范围为 0.1—1.09 keV, 能谱分辨本领 10—109, 谱分辨率为 0.11 nm; 5000 线对密度光栅的所测谱范围为 1.09—5 keV, 能谱分辨本领 5—25, 谱分辨率为 0.05 nm. 2000 线对密度光栅在光阴极上的色散长度 $Y_1 = 23.9 \text{ mm}$; 5000 线对密度光栅在光阴极上的色散长度 $Y_2 = 6 \text{ mm}$. 2000 线对密度光栅和 5000 线对密度光栅垂直相距距离 $Y_0 = 3.5 \text{ mm}$, 水平相距距离 $X_0 = 1 \text{ mm}$.

4 基于神光-III 原型装置的谱仪标定实验

4.1 移位双光栅和双狭缝阴极的标定

在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的神光 III 原型装置上, 对基于移位双光栅 SDTG-1 (黑白光栅 + 黑白光栅) 的 X 射线谱仪进行应用实验. 神光 III 原型装置位于中国工程

物理研究院激光聚变研究中心. 主要设计指标为激光束数八束(一套 4×2 束组), 输出能量为 $1.2 \text{ kJ}/1 \text{ ns}/0.35 \mu\text{m}/\text{束}$ 和 $1.8 \text{ kJ}/3 \text{ ns}/0.35 \mu\text{m}/\text{束}$, 脉冲波形 $1.0\text{--}3.0 \text{ ns}$, 光束发散角小于 $70 \mu\text{rad}$, 能够进行八束对打和八束并打, 以满足不同类型物理实验的打靶要求.

实验选用“指向调节机构+3000 mm 长度飞行管道+光栅腔+记录腔”的配置结构, 记录腔带真空泵组, 时间积分集成调试选用IP 成像板作为记录设备, 时间分辨集成调试选用条纹相机作为记录设备, 实验布局如图 6 所示.

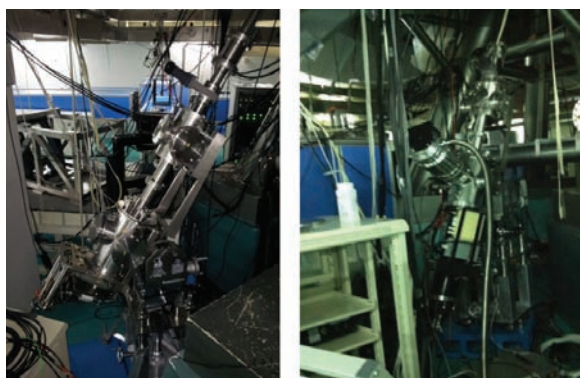


图 6 神光 III 原型靶场集成调试(左为时间积分调试; 右为时间分辨调试)

Fig. 6. Integrated debugging at SG-III prototype (left, time integral debugging; right, time-resolved debugging).

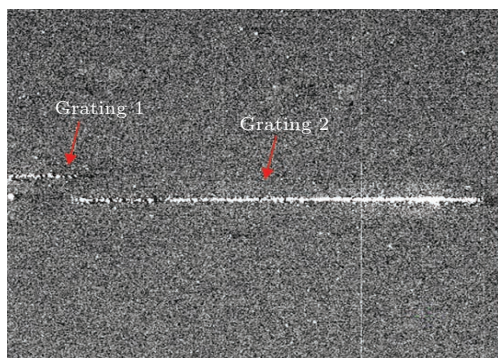


图 7 移位双光栅和双狭缝阴极的标定

Fig. 7. Calibration of the shifted dual transmission grating and double slit cathode.

首先对 X 射线条纹相机的狭缝阴极进行考核. 实验中, 八路激光辐照塑料球靶, 采用移位双光栅+双狭缝阴极+条纹相机的系统配置对实验产生的 X 射线光谱进行记录, 实验结果如图 7 所示. 由图可以看出, 移位双光栅 X 射线谱仪光路瞄准较为准确, 瞄准方案实施有效, 两个光栅的衍射谱线分

别准确地记录到相应区域的光阴极上, 实现了对 X 射线谱的分段测量.

4.2 移位双光栅 X 射线谱仪时间积分测试

时间积分测试在流体力学不稳定性实验中完成. 实验布局如图 8 所示. 带有扰动样品的黑腔靶法线沿上下方向放置, 上下各四束激光注入腔靶. 一路激光照射 Ti 背光靶, 产生的 X 射线背光对扰动样品进行照相, 并被对面的针孔条纹相机记录. 移位双光栅 X 射线谱仪安装在靶球下方. 实验测量结果如图 9 和图 10 所示. 其中两个光栅的谱线清晰可见, 获取了相应的谱线, 两个光栅的谱线提取结果见图 9 所示.

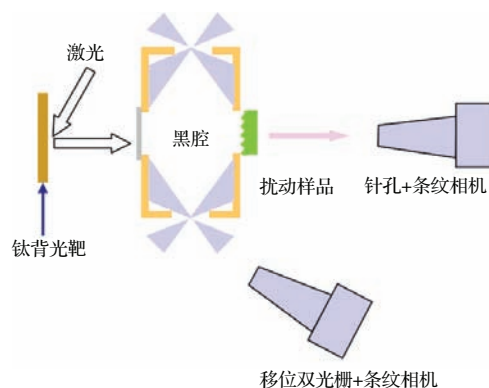


图 8 神光 III 原型流体力学不稳定性实验布局

Fig. 8. Experiment arrangement of hydrodynamic instability at SG-III prototype.

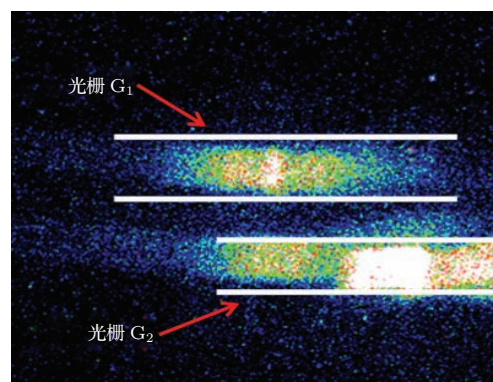


图 9 (网刊彩色) 移位双光栅 X 射线谱仪时间积分测试结果(未加成像狭缝)

Fig. 9. (color online) The time integral results captured by the SDTG spectrometer (without imaging slit).

流体力学不稳定性与混合研究实验中测量的主要为金 M 带, 是金原子 M 壳层电子被强激光剥离掉一部分后, 处在激发态的电子跳回基态时辐射的 X 光, 其光子能区主要为 $1.8\text{--}3.6 \text{ keV}$, 波

长范围0.3—0.7 nm, 根据实验结果计算, 光栅的平均能谱分辨率为0.04 nm, 光栅1的测谱范围1—5 keV, 光栅2的测谱范围0.1—1 keV, 整体测谱范围0.1—5 keV, 谱分辨和测谱范围达到技术要求.

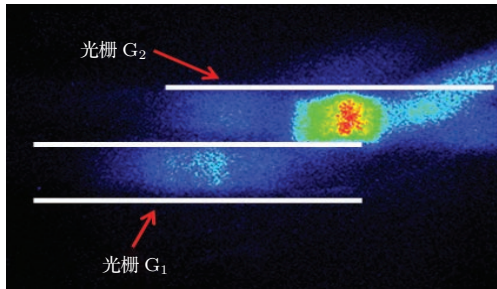


图10 (网刊彩色) 移位双光栅 X 射线谱仪时间积分测试结果(加成像狭缝)

Fig. 10. (color online) The time integral results captured by the SDTG spectrometer (with imaging slit).

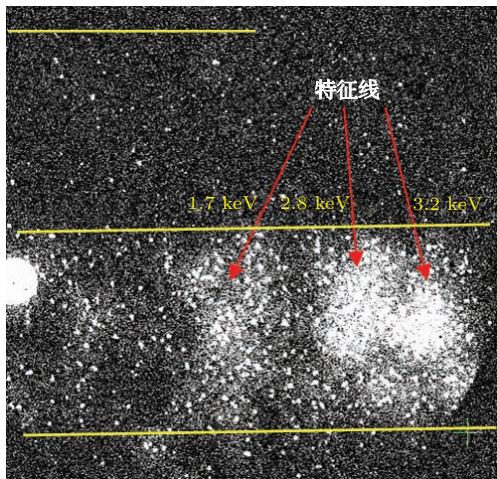


图11 (网刊彩色) 移位双光栅 X 射线谱仪记录的时间分辨光谱

Fig. 11. (color online) Time-resolved spectrum recorded by the SDTG spectrometer.

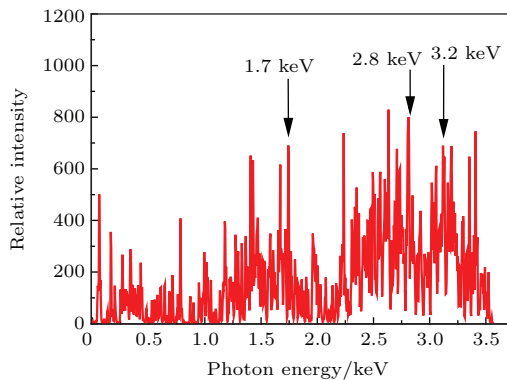


图12 时间分辨测量谱解谱结果

Fig. 12. Spectrum-decomposition results of the time-resolved measurements.

时间分辨图像测量在内爆物理实验中搭车完成, 实验中采用掺 Ar 和 Cl 的玻璃球靶, 其中 Ar 的类氦特征谱线 3.1 keV, Cl 的特征谱线 2.8 keV, Si(玻璃) 特征线 1.7 keV. 选用条纹相机, 时间分辨 28 ps, 优于 30 ps. 三个特征谱线均大于 1 keV, 因此由 5000 线对光栅获取谱线, 实验结果如图 11 所示. 可以看到三个明显的特征谱线, 均在 5000 线对光栅一侧, 与实验设计一致. 对实验信号进行处理可以得到谱线图, 如图 12 所示.

5 结 论

基于两种不同的移位光栅, 设计了移位双光栅 X 射线谱仪, 给出了设计原则和参数要求. 完成了移位双光栅 X 射线谱仪的机械设计和瞄准方案设计. 在神光 III 原型装置上完成了谱仪的应用测试, 获得了时间分辨的 X 光谱实验数据, 测谱范围 0.1—5.0 keV, 谱分辨 0.04 nm, 时间分辨好于 30 ps.

参考文献

- [1] Eagleton R T, James S F 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3969
- [2] Yang J M, Ding Y N, Zhang W H, Zhang J Y, Zheng Z J 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4268
- [3] Kumar D, Clayton D J, Parman M, Stutman D, Tritz K 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10E511
- [4] Wang B Q, Wang C K, Yi T, Li T S, Li J, Zhu X L, Xie C Q, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2015 *Acta Phot. Sin.* **44** 1030003 (in Chinese) [王保清, 王传珂, 易涛, 李廷帅, 李晋, 朱效立, 谢常青, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤 2015 光子学报 **44** 1030003]
- [5] He K, Yi T, Liu S Y, Niu J B, Chen B Q, Zhu X L 2014 *Micronanoelect. Technol.* **51** 381 (in Chinese) [何宽, 易涛, 刘慎业, 牛洁斌, 陈宝钦, 朱效立 2014 微纳电子技术 **51** 381]
- [6] Ma J, Xie C Q, Ye T C, Liu M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2564 (in Chinese) [马杰, 谢常青, 叶甜春, 刘明 2010 物理学报 **59** 2564]
- [7] Kuang L, Cao L, Zhu X, Wu S, Wang Z, Wang C, Liu S, Jiang S, Ding Y, Xie C, Zheng J 2011 *J. Opt. Lett.* **36** 3954
- [8] Wang C K, Wang B Q, Yi T, Fan Q P, Kuang L Y, Li J, Li T S, Zhu X L, Liu S Y, Jiang G 2016 *J. Mod. Opt.* **63** 261
- [9] Wang B Q, Yi T, Wang C K, Zhu X L, Li T S, Li J, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2016 *Plasma Sci. Technol.* **18** 781

Investigation into the design and diffraction efficiency of shifted dual transmission grating*

Yi Tao¹⁾ Wang Chuan-Ke^{1)2)†} Yang Jin-Wen¹⁾³⁾ Zhu Xiao-Li⁴⁾
Xie Chang-Qing⁴⁾ Liu Shen-Ye¹⁾

1) (Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (Management Center of Inertial Confinement, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

3) (School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

4) (Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 3 May 2016; revised manuscript received 7 June 2016)

Abstract

In inertial confined fusion (ICF) experiments, the temporal evolution of X-ray spectrum can provide important diagnostic information such as electron temperature and density on laser-plasma interaction. Accurate diagnostic requires a wide range of X-ray spectrum from several hundred eV to kilo eV to be measured with high temporal resolution. For traditional single grating spectrometer coupled with streak cameras, the limited recording length of streak cameras severely restricts measured X-ray spectral range in one laser shot. Here we design a shifted dual transmission grating (SDTG) spectrometer for laser-produced plasma X-ray diagnostics in ICF experiments which can provide wide-range X-ray spectrum measurement from 100 eV to 5 keV with high temporal and spectral resolution. This SDTG spectrometer comprises two X-ray gratings: one with high line density and the other with low line density. The high line density grating is used to measure X-ray spectrum from 1000 eV to 5000 eV and the low line density grating measures X-ray spectrum from 100 eV to 1000 eV respectively. These two kinds of X-ray gratings are arranged in a plane with their centers shifted by a certain distance. A shifted double slit component is designed according to the spatial positions of the two gratings and set in front of the photocathode in the streak camera to ensure that two sets of X-ray spectra by two shifted gratings are projected on the photocathode without overlapping. This novel SDTG-based X-ray spectrometer can take the most of recording panel space, offering a path to realize a high resolution and broad spectral ranges in diagnosing soft X-rays. In this paper, the design method and the technical data of the SDTG-based X-ray spectrometer are given. The SDTG-based X-ray spectrometer is integrated, debugged and used to measure X-ray pulse at SG-III prototype facility located in Laser Fusion Research Center of Chinese Academy of Engineering Physics. The time integral results are captured by the SDTG spectrometer in the ICF fluid RT experiments and time-resolved spectra are recorded in indirect drive implosion experiment. Experimental results show the SDTG-based X-ray spectrometer can capture X-ray spectrum ranging from 0.1 keV to 5 keV, with a spectral resolution of 0.04 nm and a temporal resolution of better than 30 ps. By fully utilizing limited recording length, the SDTG-based X-ray spectrometer can realize a wide range temporal X-ray spectrum measurement with enough spectral resolution and temporal resolution. This SDTG spectrometer is a good temporal X-ray diagnostic tool for ICF experiments and other high energy density physics experiments.

Keywords: shifted dual transmission grating spectrometer, inertial confined fusion, diffraction efficiency, time-resolved spectrum

PACS: 52.70.La, 61.05.cp, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.65.165201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11405158, 11435011) and the Open Fund of Fundamental Science on Nuclear Wastes and Environmental Safety Laboratory, China (Grant No. 13zxnk06).

† Corresponding author. E-mail: wck1981@caep.cn