

doi: 10.3788/gzxb20154410.1030003

错位双光栅色散元件设计及衍射效率研究

王保清^{1,2}, 王传珂^{2,3}, 易涛², 李廷帅¹, 李晋², 朱效立⁴,
谢常青⁴, 刘慎业², 江少恩², 丁永坤²

(1 电子科技大学 能源科学与工程学院, 成都 611731)

(2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

(3 中国工程物理研究院 惯约实施管理中心, 四川 绵阳 621900)

(4 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘要:设计了一种错位双光栅色散元件,与条纹相机耦合实现了 0.1~5 keV 范围 X 射线时间分辨谱的测量.该色散元件由 2 000 lp/mm 和 5 000 lp/mm 两块子光栅在空间错位排布而成,低密度光栅测量低能段软 X 射线(100~1 000 eV),高密度光栅测量中能段软 X 射线(1 000~5 000 eV),通过空间错位实现能谱拼接.在同步辐射源上使用单色能点对其进行标定,获得了错位双光栅衍射效率的实验结果.根据光栅的结构特性,结合标定结果与严格耦合波分析理论,计算得到了 100~5 000 eV 能区光栅的绝对衍射效率曲线,并给出了错位双光栅的解谱方法.该错位双光栅能够有效提升透射光栅谱仪的性能,为高温等离子体诊断提供宽谱 X 射线时间分辨谱定量测量.

关键词:错位双光栅;实验标定;衍射效率;时间分辨谱;激光等离子体诊断

中图分类号:TL817

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)10-1030003-5

Investigation into the Design and Diffraction Efficiency of Shifted Dual Transmission Grating

WANG Bao-qing^{1,2}, WANG Chuan-ke^{2,3}, YI Tao², LI Ting-shuai¹, LI Jin²,
ZHU Xiao-li⁴, XIE Chang-qing⁴, LIU Shen-ye², JIANG Shao-en², DING Yong-kun²

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

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

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

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

Abstract: A Shifted Dual Transmission Grating (SDTG) component has been designed and fabricated in this work, a range of 0.1~5keV time-resolved spectrum can be recorded when the SDTG coupled with a streak camera. This SDTG is composed of 2000 lines/mm and 5000 lines/mm sub transmission grating which shifted with a certain distance. One of this sub grating is designed to measure the soft X-ray spectrum in 100~1000eV photon energy while the other measures 1000~5000eV photon energy. This space-shifted grating can sufficiently use the limited recorded panel to obtain a spliced time-resolved spectrum in streak camera. In this paper, The SDTG component is calibrated to get the diffraction efficiencies on Beijing synchrotron radiation facility, and the related efficiencies was achieved. According to the structure parameter of this grating, the absolutely diffraction efficiency value was eventually obtained in combination the experimental values with the rigorous coupled-wave anlysis, meanwhile a method is discussed to unfold the source spectrum from the obtained efficiency. This SDTG component

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11405158、11435011)资助

第一作者:王保清(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为 X 射线诊断技术. Email:wangbaoqing001@gmail.com

导师(通讯作者):王传珂(1981-),男,高级工程师,主要研究方向为激光聚变诊断技术. Email:wck1981@caep.cn

收稿日期:2015-05-15;录用日期:2015-07-02

can improve the performance of the spectrometer, and may become an outstanding device to precisely measure x-ray spectra in the diagnostics of laser-produced plasma.

Key words: Shifted dual transmission grating; Experimental calibration; Diffraction efficiency; Time-resolved spectrum; Diagnostics of laser-produced plasma

OCIS Codes: 300.6500; 230.1950; 120.7000; 050.1960; 280.5395

0 引言

在惯性约束聚变中,激光与靶相互作用会产生大量的软 X 射线,通过测量软 X 射线时间分辨谱,可以获得高温等离子体的电子温度、电子密度、压缩体积比等关键参量及其时间演变过程,为物理实验提供重要诊断信息^[1-3].在软 X 射线能谱测量中,透射光栅是一个重要的色散元件,具有色散性好,结构简单,易于制造的优点,已广泛应用于惯性约束聚变实验和天体物理中^[4-6].测谱范围和谱分辨率是软 X 射线时间分辨谱测量中关注的重要指标,然而人们利用单个透射光栅与条纹相机耦合进行软 X 射线时间分辨谱测量时,由于相机记录长度的限制,测谱范围和谱分辨率难以同时兼顾.使用高线对密度光栅可提高测量光谱的空间分辨率,但由于光谱占用的空间尺寸增加,在相机记录长度有限的情况下,导致测谱范围被缩小.

本文设计了一种错位双光栅(Shifted Dual Transmission Grating, SDTG),能够有效解决软 X 射线时间分辨谱测量时测谱范围和谱分辨率相互制约的问题,与时间分辨设备耦合,能够实现高时间分辨的宽谱 X 射线测量.错位双光栅将线对数分别为 2 000 和 5 000 lp/mm 的光栅错位排布在一块光栅元件上,两光栅分别对不同能段 X 光谱进行测量,这种设计能够同时提高软 X 射线时间分辨谱的测谱范围和谱分辨率.在北京同步辐射源上,利用能点为 200~1 600 eV 的 X 射线源,对所设计的双光栅色散元件进行实验标定,并与严格耦合波分析理论相结合,得到错位双光栅衍射效率曲线,并讨论了错位双光栅用于软 X 射线时间分辨谱光测量的解谱方法,为光谱定量测量提供依据.

1 元件设计

一般来说,低线对密度光栅在测量低能段软 X 射线区域(100~1 000 eV),谱分辨较好,而对于中能段软 X 射线区域(1 000~5 000 eV)的测量,谱分辨较差;高线对密度光栅测量中能区域谱分辨好,而测量低能软 X 射线区域谱分辨极高,由于条纹相机的记录面空间尺寸限制了光谱的空间尺寸,单纯使用高线对密度光栅会使记录的空间谱范围受到限制.错位双光栅通过空间错位,合理分配条纹相机的记录面空间,在所测谱范围内,实现高谱分辨测量.

错位结构的设计是该色散元件实现软 X 射线时间分辨测量的关键,也是错位双光栅与传统的双光栅器

件的最大差异.例如中物院杨家敏等^[7]提出的双光栅,采用两块低密度光栅沿光轴方向布置,对 X 射线进行两次色散,提高了光谱分辨率. Deepak Kumar 等^[8]将线对数分别为 1 000 lp/mm 和 5 000 lp/mm 的两个单光栅平行排布同时测量软 X 射线光谱,由于色散分布空间大,只能采用大面积的成像板记录时间积分谱,不适用于时间分辨谱测量.

错位双光栅由 2 000 lp/mm 和 5 000 lp/mm 两块子光栅在空间错位排布而成,低密度光栅测量低能段软 X 射线(100~1 000 eV),高密度光栅测量中能段软 X 射线(1 000~5 000 eV),通过空间错位实现能谱拼接,充分利用条纹相机的有限记录长度实现时间分辨谱测量.这样,在保证使用 2 000 lp/mm 光栅所测谱范围(0.1~5 keV)的基础上,使用 5 000 lp/mm 光栅提高 1 000~5 000 eV 能段的谱分辨率,整体提高谱仪平均谱分辨.

错位双光栅设计图如图 1(a),其中 G_1 为低线对密度光栅, G_2 为高线对密度光栅, X、Y 分别表示两光栅在水平和垂直方向错位的距离.图 1(b)为错位双光栅分光原理图.激光与靶材相互作用产生的低能段软 X 射线(100~1 000 eV)通过 2 000 lp/mm 光栅测量,中能段软 X 射线(1 000~5 000 eV)则通过 5 000 lp/mm 光栅测量,耦合条纹相机,并在其光阴极前加入匹配的双狭缝,则可以获得高时空分辨、宽范围的拼接光谱.

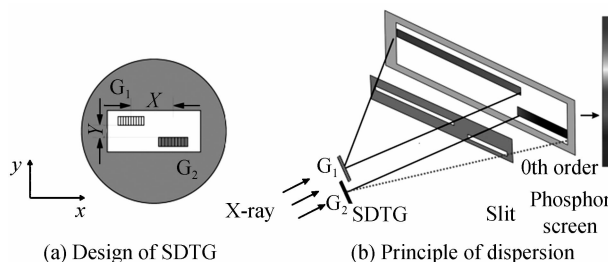


图 1 错位双光栅设计及分光原理

Fig. 1 Schematics of the shifted dual transmission grating

根据条纹相机光阴极结构,光栅在 Y 轴方向错位不影响 CCD 对光谱的记录,其记录的光谱与单光栅光谱谱形相同,如图 1(b). X 轴方向错位大小可影响光栅 G_1 和 G_2 可记录的光谱范围.根据布拉格关系,两光栅中心水平距离 X 值的大小可根据波长在记录面上的色散关系来确定.方程表示为

$$\frac{dy}{d\lambda} = \frac{mL}{d} \quad (1)$$

式中 y 为色散波长在记录面上的位置, λ 为入射波长,

m 为衍射级数, L 为光栅与记录面的距离, d 为光栅周期. 若光栅 G_2 所记录的最长波长为 λ_2 , 光栅周期为 d_2 , 则 X 的值可表示为

$$X = L\lambda_2 \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) \quad (2)$$

Y 值大小由色散谱宽度决定, 其值大小可根据光栅与记录面距离来确定.

2 光栅参量及实验标定

光栅设计参量见表 1^[9], 控制光栅的占空比, 可有效减小甚至消除二级衍射^[10-11], 本文设计的 5 000 lp/mm 光栅其周期 200 nm, 光栅栅线宽度 100 nm, 占空比 0.5. 通过图 2(a) 扫描电镜图片可以看出制作的光栅与理论设计略有偏差. 两光栅均采用材料金制作, 在实际的制作过程中, 会有金属或化学杂质附着在光栅栅

线上, 这些因素都会对各级衍射产生影响. 为增大光栅的有效面积, 使 2 000 lp/mm 光栅可以实现自支撑, 在其表面加入了加强筋; 对于 5000 lp/mm 光栅, 则在底部加入 1~4 μm 聚酰亚胺薄膜. 加强筋和聚酰亚胺薄膜保证了光栅结构的稳定性, 但同样对各级衍射产生影响, 在分析光栅衍射效率时, 需要将其考虑进去.

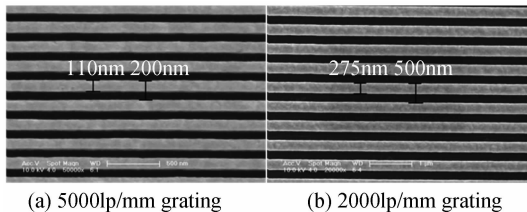


图 2 光栅扫描电镜图

Fig. 2 Testing results of structure for the SDTG

表 1 双光栅色散元件设计参量

Table 1 Structural parameters of SDTG

Grating	Line density/(lines/mm)	Period/nm	Width/nm	Thickness/nm	Area/mm ²	Substrate
G_1	2 000	500	275	385	1×1	Titanium gridding
G_2	5 000	200	110	385	1×1	polyimide

实验标定是在北京同步辐射实验室 4B7B 束线站 (80~1 600 eV) 上进行的, 采用多个单色能点进行标定, 记录介质采用普林斯顿仪器生产的 PIXIS-XO 2048B CCD 探测器. 实验布局如图 3. 标定靶室主要有滤片、快门、样品台组成, 靶室后面法兰口连接 CCD 探测器, 用来记录采集到的图像. 其中样品台是专为双光栅设计的, 通过控制样品台上的支架, 可以调节光栅的上下位置; 控制样品台上的螺丝, 可以调节光栅的左右位置, 这样可以保证在不取出光栅的情况下, 同一单色光同时标定光栅和狭缝.

需单独标定. 单位时间下光栅的各级衍射强度与狭缝强度积分的比值, 即为所求得的绝对衍射效率.

3 实验结果分析

3.1 结构参量分析

根据图 3 布局得到衍射分布, 图 4 给出了错位双光栅在 1 000 eV 单色光辐照下获得的零级归一化衍射强度积分图谱. 由图可以看出, 两块光栅均可清晰地观察到四级衍射峰, 表明其具有良好的色散特性. 由于软 X 射线具有较强的金属穿透能力, 光栅发生了相位调制^[13], 使得两块光栅的零级衍射峰强度均比一级衍射峰要低.

本文设计的两光栅占空比均为 0.5, 通过标量衍射理论分析, 可以消除偶数级次衍射. 由图 4 可以看出两光栅均存在二级衍射, 这是由光栅在制作过程中产生的偏差及 X 射线透过金后的衍射造成. 2 000 lp/mm

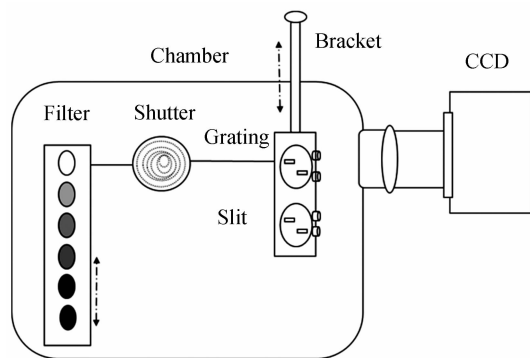
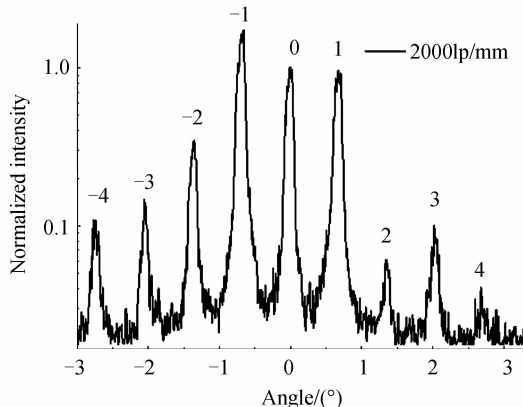


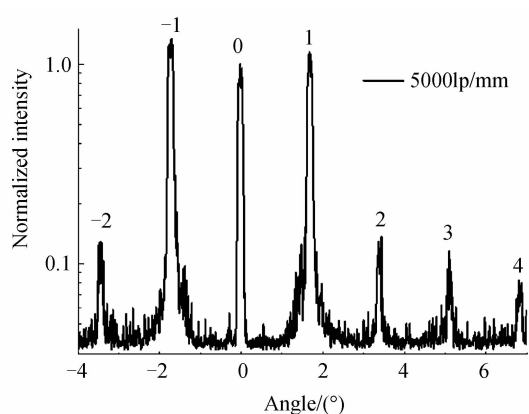
图 3 标定实验布局图

Fig. 3 Experimental set-up for calibration

标定过程与尚万里等^[12]工作类似. 通过单色器获得的单色光经滤片滤除高次谐波光及杂散光后, 使用机械快门控制曝光时间来控制通光量及抑制 CCD 拖影, 得到的单色光照射到样品架上的光栅或狭缝, 经 CCD 记录, 就可以获得衍射图样. 为了提高光栅绝对衍射效率的标定的精确度, 2 000 和 5 000 lp/mm 光栅



(a) Measured spectrum of 2000lp/mm grating



(b) Measured spectrum of 5000lp/mm grating

图4 错位双光栅在1 000 eV能点下得到的衍射谱分布
Fig. 4 Measured angular distribution of the SDTG in 1 000 eV photon energy

光栅其各级衍射与一级的比值分别为： $T_{2/1} = 18\%$ 和 6% ； $T_{3/1} = 8\%$ 和 10% ；5 000 lp/mm光栅其各级衍射与一级的比值分别为： $T_{2/1} = 9\%$ 和 12% ； $T_{3/1} = 10\%$ 。其正负级次衍射强度不相等，是由于入射光斜入射光栅，使用正负级次衍射强度相加求平均值的方法，可有效降低对衍射效率的影响。以上分析表明，标量衍射理论求解光栅结构参量和衍射效率存在一定的局限性，需要使用更精确的求解衍射效率的方法，即严格耦合波分析理论方法。根据严格耦合波分析方法，在TE波垂直入射情况下，反射和透射电场表示为^[14-17]

$$E_{1,y} = \exp(-ik_0z) + \sum_m R_m \exp\{-j[k_{xm}x - k_{1,zm}z]\} \quad (3)$$

$$E_{2,y} = \sum_m T_m \exp\{-j[k_{xm}x - k_{2,zm}(z-d)]\} \quad (4)$$

式中

$$k_{xm} = -2\pi m/d$$

$$k_{1,zm} = k_{2,zm} = \begin{cases} (k_0^2 - k_{xm}^2)^{1/2} & (|k_0| > |k_{xm}|) \\ i(k_{xm}^2 - k_0^2)^{1/2} & (|k_0| < |k_{xm}|) \end{cases}$$

式中 k_0 为入射光的波长， d 为光栅周期， R_m 和 T_m 分别为反射和透射的 m 级衍射的复振幅。

通过对耦合光栅各个区域的电磁场求解，就可以求得 R_m 和 T_m 的值，则 m 级反射和透射效率分别为

$$DE_{rm} = R_m R_m^* \operatorname{Re}\left(\frac{k_{1,zm}}{k_0}\right) \quad (5)$$

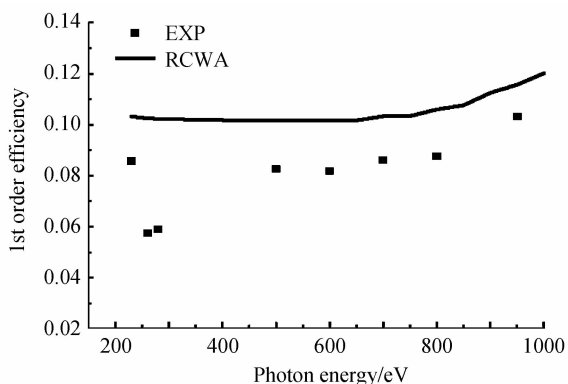
$$DE_{tm} = T_m T_m^* \operatorname{Re}\left(\frac{k_{2,zm}}{k_0}\right) \quad (6)$$

在严格耦合波分析理论中，光栅占空比和厚度值选择实验测量值。将实验所测占空比(0.55)和厚度值(385 nm)作为严格耦合波分析(Rigorous Coupled-Wave Analysis, RCWA)理论计算光栅衍射效率的参量值。

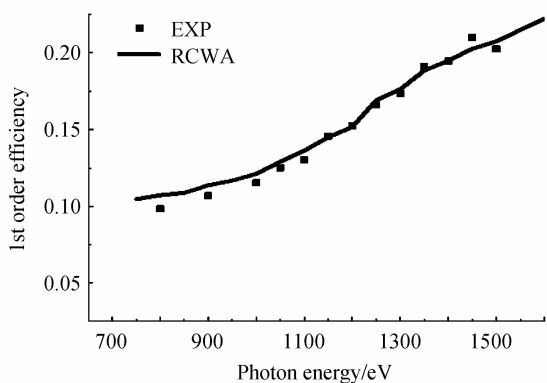
3.2 衍射效率分析

通过计算所测试的衍射峰的面积，可以得到每个

能点的各级衍射值。其透过率为每个衍射峰值的面积除以入射光通过狭缝后的面积。双光栅一级衍射效率如图5，其中独立能点为实验标定值，实线是采用严格耦合波分析计算出来的理论值。



(a) First order diffraction efficiency in 2000lp/mm grating



(b) First order diffraction efficiency in 5000lp/mm grating

图5 采用严格耦合波分析方法及实验测量得到的一级衍射效率图

Fig. 5 First order diffraction efficiency dependence on the RCWA and experiment result of the SDTG

2 000 lp/mm光栅一级衍射效率实验值和理论值存在一定差异。在280 eV能点附近，衍射效率约为6%，可能是由于制作的光栅衬底CH膜未清理干净，存在C-K吸收边，使衍射效率较低。其它能点所测衍射效率低于理论值，可能是由于制作的2 000 lp/mm光栅加强筋的影响，但随着X射线能量的增强，加强筋的影响逐渐降低，使得实验值接近理论值。图5(b)表明5 000 lp/mm光栅一级衍射效率实验标定值和理论值拟合较好。

为精确测量软X射线能谱，需要得到光栅的衍射效率，错位双光栅衍射效率由两部分组成，2 000 lp/mm光栅采用中能段实验标定衍射效率，5 000 lp/mm光栅采用中能段理论衍射效率。在能区衔接点处将光栅衍射效率耦合，即可得到错位双光栅衍射效率曲线，其结果如图6。

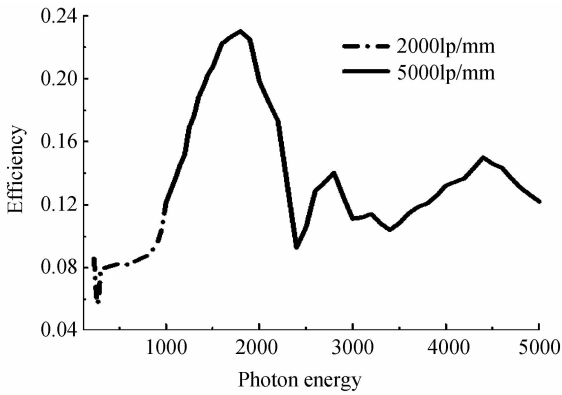


图6 错位双光栅衍射效率

Fig. 6 First order diffraction efficiency of the SDTG

3.3 解谱

若只考虑光栅的一级衍射,通过前面求得的错位双光栅衍射效率,当能量为 ϵ_0 时,激光与靶作用产生的 X 射线源谱 $S(\epsilon_0)$ ^[4] 可得

$$S(\epsilon_0) = \frac{I(y_0) \lambda_0}{\alpha(\epsilon_0) \Delta\lambda} (D+L)^2 \times \begin{cases} \frac{1}{\eta_1(\epsilon_0)} & 100 < \epsilon_0 \leq 1000 \\ \frac{1}{\eta_2(\epsilon_0)} & 1000 < \epsilon_0 \leq 5000 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $I(y_0)$ 为条纹相机记录强度, $\alpha(\epsilon_0)$ 为条纹相机光阴极谱响应, $\Delta\lambda$ 为谱仪的分辨率, $(D+L)$ 为靶到光阴极的距离, $\eta_1(\epsilon_0)$ 和 $\eta_2(\epsilon_0)$ 分别为 2 000 lp/mm 和 5 000 lp/mm 光栅的衍射效率。

4 结论

本文设计了一种可与时间分辨设备耦合的错位双光栅色散元件,这种设计在保证所测宽谱范围的基础上,又可获得具有高时间分辨的软 X 射线的能谱. 为使所设计的光栅谱仪实现软 X 射线谱定量测量,利用同步辐射源单色能点 200~1 600 eV,对新设计的双光栅色散元件进行了标定,实验表明,此光栅具有较好的色散特性,可应用于软 X 射线测量. 根据严格耦合波分析理论和实验标定结果,得到了此光栅衍射效率曲线,讨论了此光栅应用于时间分辨测量时的解谱方法,为软 X 射线光谱定量测量提供了依据。

参考文献

[1] LINDL J, LANDEN O, EDWARDS J, *et al.* Review of the national ignition campaign 2009-2012[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, **21**(2): 020501(1-72).

[2] CAO Zhu-Rong, LIU Shen-Ye, ZHANG Hai-Ying, *et al.* SHEN-GUANG III core X-ray framing cameras [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 1881-1885.

曹柱荣,刘慎业,张海鹰,等. 神光 III 核心 X 射线分幅相机[J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 1881-1885.

[3] JIANG Shao-en, ZHENG Zhi-jian, LIU Zhong-li, *et al.* Study on high time-resolved and two-dimensional imaging technique

[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2): 228-231.

江少恩, 郑志坚, 刘忠礼, 等. 高时间分辨的二维空间成像技术研究[J]. 光子学报, 2001, **30**(2): 228-231.

[4] CEGLIO N M, KAUFFMAN R L, HAWRYLUK A M, *et al.* Time-resolved x-ray transmission grating spectrometer for studying laser-produced plasmas[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(2): 318-327.

[5] KALLMAN T, EVANS D A, MARSHALL H, *et al.* A census of x-ray gas in NGC 1068: results from 450 ks of CHANDRA high energy transmission grating observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **780**(2): 1-18.

[6] EAGLETON R T, JAMES S F. Transmission grating streaked spectrometer for the diagnosis of soft x-ray emission from ultrahigh intensity laser heated targets[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(10): 3969-3973.

[7] YANG Jia-min, DING Yao-nan, ZHANG Weng-hai, *et al.* Precise measurement technology of soft-x-ray spectrum using dual transmission grating spectrometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(10): 4268-4272.

[8] KUMAR D, CLAYTON D J, PARMAN M T. Dual transmission grating based imaging radiometer for tokamak edge and divertor plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, **83**(10): 511(1-3).

[9] HE Kuan, YI Tao, LIU Shen-ye, *et al.* Design and fabrication of high-line-density dual grating for X-rays [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2014, **51**(6): 381-385.

何宽, 易涛, 刘慎业, 等. 高线密度 X 射线双光栅的研制[J]. 微纳电子技术, 2014, **51**(6): 381-385

[10] LIU Xin, GUO Jin-chuan, GUI Jian-bao, *et al.* Diffraction efficiency of X-ray grating with polychromatic source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1662-1665.

刘鑫, 郭金川, 桂建保, 等. 复色光源 X 射线光栅衍射效率 [J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1662-1665.

[11] SOLANO M, FARYAD M, HALL A S, *et al.* Optimization of the absorption efficiency of an amorphous-silicon thin-film tandem solar cell backed by a metallic surface-relief grating [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(5): 966-979.

[12] SHANG Wan-li, ZHU Tuo, XIONG Gang, *et al.* Experimental calibration of transmission grating and theoretical calculation of diffraction efficiency [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 034216(1-6).

尚万里, 朱托, 熊刚, 等. 透射光栅的实验标定和衍射效率的理论模拟[J]. 物理学报, 2011, **60**(3): 034216(1-6).

[13] WANG Chuan-ke, KUANG Long-yu, WANG Zhe-bin, *et al.* Phase-type quantum-dot-array diffraction grating [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**(123502): 1-4.

[14] MOHARAM M G, GRANN E B, POMMET D A, *et al.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, **12**(5): 1068-1076.

[15] MOHARAM M G, POMMET D A, GRANN E B, *et al.* Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, **12**(5): 1077-1086.

[16] WANG Peng, XU Yu-guang, YU Qin-yue, *et al.* Diffraction characteristics of rectangular surface-relief grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 446-450.

王鹏, 徐毓光, 余勤跃, 等. 矩形光栅的衍射特性 [J]. 光子学报, 1999, **28**(5): 446-450.

[17] MA Jie, XIE Chang-qing, YE Tian-chun, *et al.* Design, fabrication and test of x ray freestanding transmission gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2564-2570.

马杰, 谢常青, 叶甜春, 等. 自支撑透射光栅的设计、制作和测 [J]. 物理学报, 2010, **59**(4): 2564-2570.