

软 X 射线全息平焦场光栅的条纹弯曲现象及其对光谱分辨率的影响

陈火耀 刘正坤 王庆博 易涛 杨国洪 洪义麟 付绍军

Effect of curve groove on the spectral resolution for soft X-ray holographic flat-field gratings

Chen Huo-Yao Liu Zheng-Kun Wang Qing-Bo Yi Tao Yang Guo-Hong Hong Yi-Lin Fu Shao-Jun

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 234203 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.234203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.234203>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于聚合物支撑形貌液晶/聚合物光栅的低阈值分布反馈式激光器](#)

刘丽娟, 黄文彬, 刁志辉, 张桂洋, 彭增辉, 刘永刚, 宣丽

2014, 63(19): 194202. 全文: [PDF](#) (637KB)

[HfO₂ 顶层多层介质膜脉宽压缩光栅的离子束刻蚀](#)

徐向东, 刘颖, 邱克强, 刘正坤, 洪义麟, 付绍军

2013, 62(23): 234202. 全文: [PDF](#) (12344KB)

[基于相干粒子数囚禁的电磁诱导光栅研究](#)

喻松, 廖屏, 杨展予, 顾晚仪

2013, 62(22): 224205. 全文: [PDF](#) (2113KB)

[大口径多层介质膜光栅衍射效率测量及其在制作工艺中的应用](#)

周小为, 刘颖, 徐向东, 邱克强, 刘正坤, 洪义麟, 付绍军

2012, 61(17): 174203. 全文: [PDF](#) (2952KB)

[反射镜双程放大对类氦铬软 X 射线激光的输出影响研究](#)

安红海, 王琛, 方智恒, 熊俊, 孙今人, 王伟, 傅思祖, 乔秀梅, 郑无敌, 张国平

2011, 60(10): 104207. 全文: [PDF](#) (1958KB)

软 X 射线全息平焦场光栅的条纹弯曲现象及其对光谱分辨率的影响*

陈火耀¹⁾ 刘正坤^{1)†} 王庆博¹⁾ 易涛²⁾ 杨国洪²⁾ 洪义麟¹⁾ 付绍军¹⁾

1) (中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2014 年 5 月 22 日收到; 2014 年 7 月 26 日收到修改稿)

软 X 射线平焦场光栅光谱仪是等离子体诊断的重要仪器, 其核心光学元件全息平焦场光栅通常采用非球面波记录光路制作, 因此光栅条纹存在弯曲的现象. 光栅条纹的弯曲会影响光谱成像质量, 从而影响系统的光谱分辨率. 记录光路的优化, 只保证光栅子午面的线密度分布, 因此优化的记录光路并不是惟一的, 所以在保证子午面的线密度分布的同时能制作具有不同弯曲程度条纹的光栅. 针对应用于 0.8—6 nm 的全息平焦场光栅, 利用光线追迹方法分析了不同弯曲程度条纹光栅的光谱成像, 发现采用柱面反射镜制作的接近于直条纹的光栅具有较好的光谱成像质量. 相对于弯曲条纹的光栅, 接近于直条纹的光栅理论光谱分辨率有明显的提高, 入射波长为 3 nm 时, 光谱分辨率从 626 提升到 953, 入射波长为 5 nm 时, 光谱分辨率从 635 提高到 1222.

关键词: 软 X 射线, 平焦场光栅, 条纹弯曲, 光谱分辨率

PACS: 42.40.Eq, 42.40.Lx, 42.79.Dj, 42.15.Fr

DOI: 10.7498/aps.63.234203

1 引言

掠入射平焦场光栅光谱仪作为软 X 射线光谱测量的重要仪器, 在激光等离子体诊断中被广泛采用^[1-3]. 由于平焦场光栅光谱仪的光谱成像面是平面, 能直接连接条纹扫描相机实现能谱的时间、空间分辨, 因此在等离子体诊断中, 利用平焦场光谱仪能同时获取等离子体状态参数的时空信息^[4].

平焦场光栅是软 X 射线平焦场光栅光谱仪的核心光学元件, 同时具有色散和成像的功能, 因此在平焦场光栅光谱仪系统中不需要采用其他成像光学元件, 使系统结构大为简化. 得益于先进的刻划控制系统, 1983 年, Kita^[5] 等成功研制了 1200 线/mm 和 2400 线/mm 的平焦场光栅, 并搭建了结构紧凑的掠入射软 X 射线平焦场光谱仪, 覆盖波段分别为 1—5 nm 和 5—40 nm. 由于 Laminar 槽

型的全息光栅具有抑制高次谐波和降低杂散光等优点, 1999 年, Koike 等^[6] 利用非球面波记录光路系统制作了适用于软 X 射线的 Laminar 槽型全息平焦场光栅, 具体是 1—5 nm 和 5—20 nm 波段的 1200 线/mm 和 2400 线/mm 的全息平焦场光栅. 之后全息平焦场光栅的发展也主要以 1200 线/mm 和 2400 线/mm 为主, 通过设计不同的线密度分布参数并结合多层膜的使用, 成功将光谱仪的使用波长扩展到 0.32 nm 附近^[7,8].

采用球面波或非球面波曝光制作的光栅, 其条纹均存在一定程度的弯曲, 而且与具体的曝光光路参数有关^[9]. 对于应用在 0.8—6 nm 波段的 2400 线/mm 全息平焦场光栅, 需要采用非球面波曝光光路制作, 因此光栅条纹也存在弯曲现象. 设计 2400 线/mm 全息平焦场光栅的曝光光路时, 只保证子午面的线密度分布, 因此曝光光路并不是惟一

* 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金 (批准号: U1230104) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn

的,而且非球面波光路中的反射镜可以选用球面反射镜或者柱面反射镜,不同的曝光光路制作的光栅差异性主要通过条纹的弯曲程度体现.利用光线追迹分析光栅成像特性,发现条纹的弯曲会造成谱线的弯曲,而谱线的弯曲会降低光栅的光谱分辨率.目前已有文献给出光谱线的弯曲现象^[6],但未分析光谱像弯曲跟光栅条纹弯曲之间的关系及如何降低光谱成像的弯曲程度.本文分析了不同曝光光路和采用不同反射镜曝光光路制作的光栅的条纹弯曲程度,在此基础上,利用光线追迹方法研究不同程度的条纹弯曲对光谱成像的影响,从而获知各个光栅光谱分辨率的优劣,为最终制作光路的确定提供理论依据.

2 曝光光路对光栅条纹的影响

2.1 非球面波记录光路

图1给出了非球面波记录光路示意图,两相干点光源C、D和光栅基底及球面镜的法向量处在同一个水平面上.点光源C发出的球面波与点光源D发出的球面波经球面镜M1反射形成的非球面波在光栅基底G表面发生干涉,形成变周期的干涉条纹.这里, r_C 是点光源C到光栅基底中心O的距离, γ 是光线CO与光栅基底法向x轴的夹角, p_D 是点光源D到球面镜中心 O_1 的距离, q_D 是球面镜中心 O_1 到光栅基底中心O的距离, η_D 是光线 DO_1 与球面镜M1法向 x_1 轴的夹角, δ 是光线 O_1O 与光栅基底法向x轴的夹角.

一般情况下,光栅的条纹数 $k(w, l)$ (记经过光栅基底原点O点处的条纹为第0条)可以表示为^[10]

$$k(w, l) = \frac{1}{\lambda_0} \left[n_{10}w + \frac{1}{2}(n_{20}w^2 + n_{02}l^2 + n_{30}w^3 + n_{12}wl^2) + \frac{1}{8}(n_{40}w^4 + 2n_{22}w^2l^2 + n_{04}l^4) \right], \quad (1)$$

其中, λ_0 是记录波长; w, l 分别是y轴和z轴上的坐标;参数 n_{10}, n_{20}, n_{30} 和 n_{40} 决定了光栅子午面的线密度分布,而参数 n_{02}, n_{12}, n_{22} 和 n_{04} 的存在使光栅条纹在z轴方向上发生了弯曲.

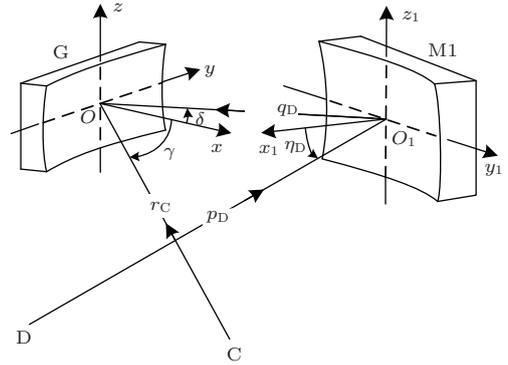


图1 非球面波记录光路示意图

2.2 条纹弯曲程度分析

使用在0.8—6 nm波段的软X射线平焦场光栅,光栅基底曲率半径 $R = 15920$ mm,中心线密度为2400线/mm,光栅宽度为50 mm,高度为30 mm,厚度为10 mm,期望的子午面线密度分布为

$$n(w) = n_0 \left(1 + \frac{b_2}{R}w + \frac{b_3}{R^2}w^2 + \frac{b_4}{R^3}w^3 \right), \quad (2)$$

其中, $n_0 = 2400.0, b_2 = -123.43, b_3 = 1.2075 \times 10^4, b_4 = -1.6515 \times 10^6$.

采用图1所示的非球面波记录光路来制作光栅,记录波长为441.6 nm,球面反射镜的曲率半径为400 mm,口径为200 mm.利用基于遗传算法的优化设计方法^[11],得到表1所列的两套记录光路 S_1 和 S_2 参数.

表1 非球面波记录光路参数

	r_C/mm	$\gamma/(\text{°})$	p_D/mm	q_D/mm	$\eta_D/(\text{°})$	$\delta/(\text{°})$
S_1	1115.4	-53.959	1026.0	280.3	42.932	14.552
S_2	1489.3	-54.721	738.5	297.2	41.994	14.092

参数 n_{ij} 可以根据记录光路参数计算得出^[10],表2分别列出了以上曝光光路对应的条纹分布参数.表征光栅子午面线密度的参数 $n_{ij}(j = 0)$ 基本相同,另外四个参数则存在比较大的差距.

表2 非球面波记录光路制作的光栅条纹分布参数

	n_{10}/λ_0	n_{20}/λ_0	n_{30}/λ_0	n_{40}/λ_0	n_{02}/λ_0	n_{12}/λ_0	n_{22}/λ_0	n_{04}/λ_0
S_1	2400.0	-18.620	7.6260×10^{-2}	-1.9257×10^{-3}	26.704	-0.20730	3.0510×10^{-3}	-3.3945×10^{-3}
S_2	2400.0	-18.611	7.6242×10^{-2}	-1.9656×10^{-3}	19.524	-0.17394	-2.8844×10^{-3}	-1.6754×10^{-3}

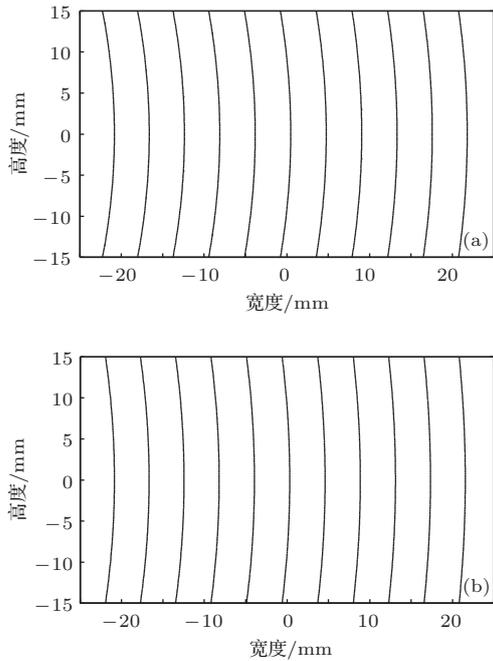


图2 不同曝光光路制作的光栅条纹空间分布 (a) 记录光路 S₁; (b) 记录光路 S₂

图2是根据参数 n_{ij} 绘制的光栅表面条纹分布曲线, 能直观地看出条纹弯曲现象, 而且两套记录光路的光栅条纹弯曲存在明显的区别. 利用光栅上

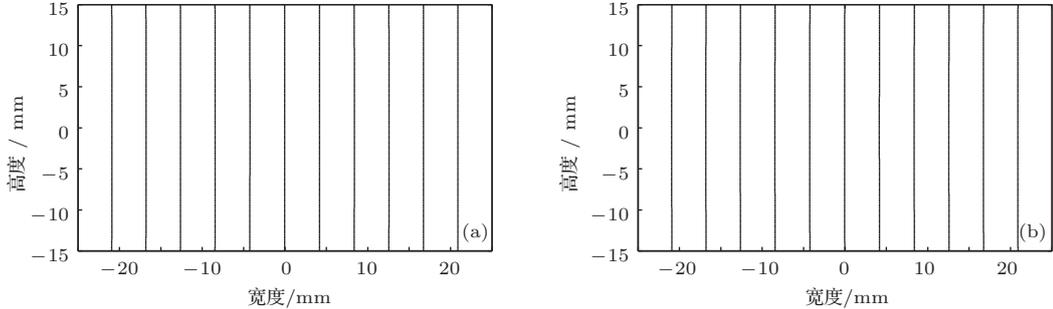


图3 采用柱面反射镜曝光制作的光栅条纹空间分布 (a) 记录光路 S₃; (b) 记录光路 S₄

3 条纹弯曲对光谱分辨率的影响

由上面的分析可知, 对于给出的曝光光路, 都能满足子午面的线密度分布要求, 但是光栅条纹具有不同的弯曲程度. 采用球面反射镜的曝光光路制作的光栅条纹弯曲较严重, 通过改用柱面反射镜, 条纹的弯曲程度大为降低, 接近于直的条纹. 不同弯曲程度的光栅条纹必然会对光谱像产生影响, 而光谱像的优劣则直接决定了光谱仪光谱分辨力的强弱. 基于光程差函数的光线追迹方法通常被用于

的 $w = 0$ 的点在 z 轴方向上的线密度平方的平均值来评价光栅条纹的弯曲程度^[9], 具体条纹弯曲程度评价公式:

$$g = \frac{1}{\lambda_0^2} \left(\frac{1}{3} n_{02}^2 l_0^2 + \frac{1}{5} n_{02} n_{04} l_0^4 + \frac{1}{28} n_{04}^2 l_0^6 \right). \quad (3)$$

利用该评价公式, 可以得出记录光路 S₁ 和 S₂ 制作的光栅条纹弯曲度 $g_1 = 5.26 \times 10^4$ 和 $g_2 = 2.83 \times 10^4$.

2.3 采用柱面反射镜的记录光路

制作软 X 射线平焦场光栅的光路, 产生非球面波的光路中反射镜的子午面曲率半径决定了光栅子午面的线密度分布, 因此若使用曲率半径仍为 400 mm 的柱面反射镜替代球面反射镜, 同样能得到期望的线密度分布, 但弧矢面光线的传播方向会发生变化, 最终光栅条纹的弯曲程度也会改变. 在记录光路 S₁ 和 S₂ 中, 分别用柱面反射镜替代球面反射镜, 成为新的记录光路 S₃ 和 S₄, 得到了另外两组光栅条纹, 如图3所示. 柱面镜的采用较大地改变了条纹的弯曲程度, 两个光路记录的条纹弯曲度分别为 9.22 和 27.91, 光栅条纹基本接近于直条纹.

评价平焦场光谱仪的成像质量^[12,13], 利用该方法分析了不同弯曲程度的光栅条纹对光谱像的影响, 并最终给出弯曲条纹对光栅光谱分辨率的影响.

图4是软 X 射线平焦场光谱仪的光学系统示意图. 基本参数如下: 入射狭缝宽度为 50 μm, 入射臂长为 237 mm, 入射角度为 88.65°; 成像面平行于 x 轴, 与原点 O 距离 235 mm; 探测器为电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD), CCD 的像元大小假设为 10 μm × 10 μm; 考虑到 CCD 实际高度, 光谱接收高度定为 20 mm, 使用光栅的基本参数见第二部分.

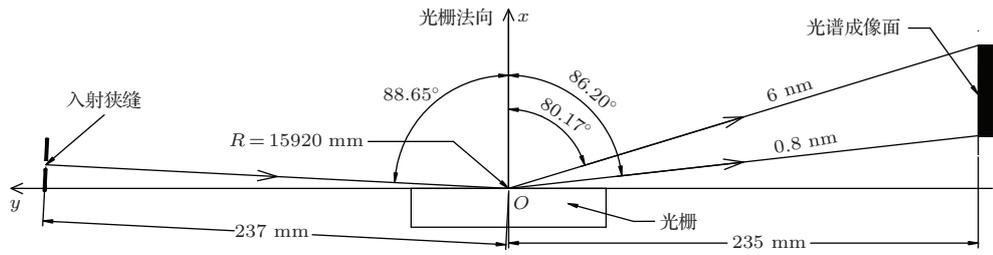


图4 软X射线平焦场光谱仪光学系统

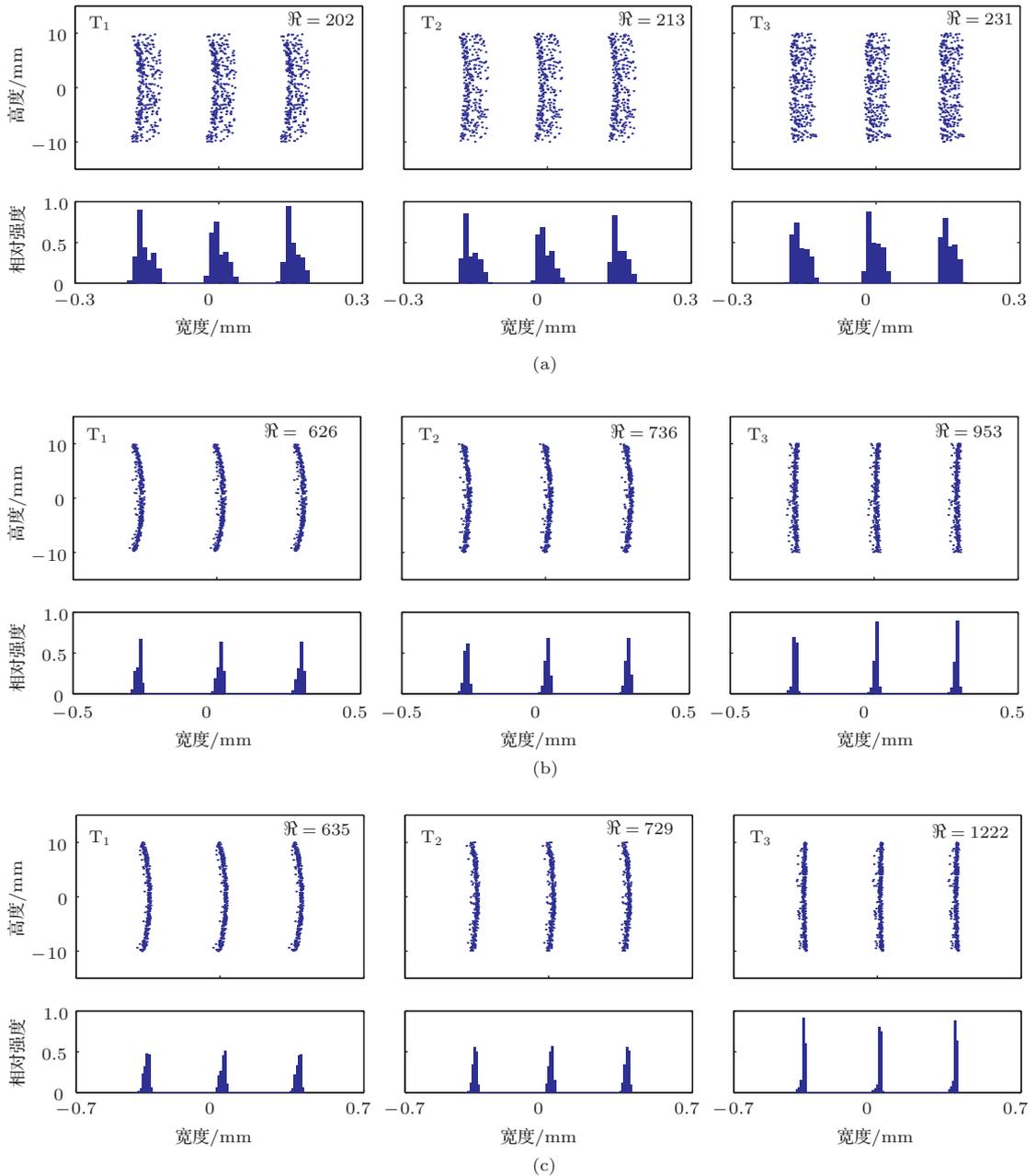


图5 不同弯曲程度的光栅条纹在不同入射波长下的光线追迹点列图及光谱分辨率 (a) 入射波长为 1 nm; (b) 入射波长为 3 nm; (c) 入射波长为 5 nm

通过选用不同的记录光路,可以得到不同条纹弯曲程度的光栅. 由于曝光光路 S_3 和 S_4 得到的条纹是近似直的,因此在下面的分析中只选取了光

路 S_3 , 同时将光路 S_1 , S_2 和 S_3 制作的光栅分别记为 T_1 , T_2 和 T_3 . 图5给出了波长 λ 和 $\lambda \pm \lambda/50$ ($\lambda = 1, 3, 5$ nm)的光线追迹点列图,并且相应地给出了每

块光栅的理论光谱分辨率。光栅 T_1 和 T_2 具有较大弯曲度的光栅条纹, 光线追迹的结果显示其光谱像也会存在弯曲的现象。光栅 T_1 条纹弯曲度比 T_2 的大, 光谱像呈现的结果也一样, T_1 的光谱像比 T_2 更弯曲。在统计分析光谱像的宽度时, 光谱像的弯曲会增加光谱宽度, 导致光谱分辨率的降低。图 5(a) 给出的是入射波长为 1 nm 时的成像情况, 由于这个波长本身的像差比较大, 三块光栅的光谱像宽度区别不大, 相应的光谱分辨率都在 200 左右, 基本一致。而对于 2 nm 以上的波段, 由于光栅具有较好的消像差效果, 光谱像弯曲对光谱像宽度的影响起着主要作用, 因此也体现出其对光谱分辨率有较明显的影响。图 5(b) 是入射波长为 3 nm 的情况, 光栅 T_2 光谱分辨率相对于 T_1 有了小幅度的提升, 从 626 提高到 736, 而对于 T_3 , 其光谱像弯曲度大为减小, 光谱分辨率相比于 T_1 , T_2 提高到 953。入射波长为 5 nm 的追迹结果见图 5(c), 光栅 T_3 的光谱分辨率提升更明显, 从 635 提高到 1222。

图 6 给出了三块光栅在整个使用波段的光谱分辨率分布。光栅 T_1 和 T_2 的制作都是采用球面反射镜的曝光光路, 条纹的弯曲程度较大, 光栅 T_2 弯曲度比 T_1 小, 在整个使用波段上其光谱分辨率有一定的提升, 但是幅度均不大。光栅 T_3 的制作采用柱面反射镜的曝光光路, 条纹弯曲度较小, 接近于直条纹。从图 6 可以看出, 光栅 T_3 具有较高的光谱分辨率, 入射波长在 3 nm 以下, 光谱分辨率有一定幅度的提升, 3 nm 以上, 有明显的提高。

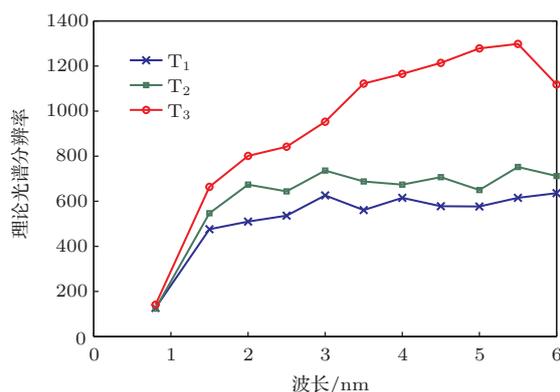


图 6 三块光栅在整个使用波段的光谱分辨率分布

4 结 论

针对应用在 0.8—6 nm 的 2400 线/mm 全息平焦场光栅, 本文通过设计不同的非球面波记录光路

和使用柱面反射镜, 获取了不同弯曲程度的光栅条纹。利用基于光程差理论的光线追迹方法研究条纹弯曲对光谱成像的影响, 对于入射波长为 2 nm 以上的光谱成像, 条纹弯曲对光谱成像有较严重的影响, 光栅条纹弯曲度越大, 对应的光谱像的弯曲度越大。理论结果表明, 相对于条纹有一定弯曲程度的光栅, 近似直条纹的光栅的光谱分辨率有明显的提高, 入射波长为 3 nm 时, 光谱分辨率从 626 提升到 953, 入射波长为 5 nm 时, 光谱分辨率从 635 提高到 1222。因此为了获得较高的光谱分辨率, 需要在光谱仪中选用具有近似直条纹的光栅, 即最终光栅的制作应选取采用柱面反射镜的非球面波记录光路。

参考文献

- [1] Wu J, Yang J M, Ding Y K, Ding Y N, Wang Y M, Zhang W H, Zheng Z J, Yang X D 2002 *High Power Laser Particle Beams* **14** 489 (in Chinese) [吴军, 杨家敏, 丁永坤, 丁耀南, 王跃梅, 张文海, 郑志坚, 杨向东 2002 强激光与粒子束 **14** 489]
- [2] Yang J M, Ding Y N, Chen B, Zheng Z J, Yang G H, Zhang B H, Wang Y M, Zhang W H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 411 (in Chinese) [杨家敏, 丁耀南, 陈波, 郑志坚, 杨国洪, 张保汉, 王耀梅, 张文海 2003 物理学报 **52** 411]
- [3] Xie X H, Liu Y Q, Fan P Z, Li R X 2004 *Chin. Phys.* **13** 1826
- [4] Yang J M, Ding Y N, Zheng Z J, Wang Y M, Zhang W H, Zhang J Y, Liu J Y, Shan B, Gao S C, Ren Y L, Liu X Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1427 (in Chinese) [杨家敏, 丁耀南, 郑志坚, 王耀梅, 张文海, 张继彦, 刘进元, 山冰, 高盛琛, 任有来, 刘秀琴 2003 物理学报 **52** 1427]
- [5] Kita T, Harada T, Nakano N, Kuroda H 1983 *Appl. Opt.* **22** 512
- [6] Koike M, Yamazaki T, Harada Y 1999 *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.* **101** 913
- [7] Imazono T, Ishino M, Koike M, Sasai H, Sano K 2007 *Appl. Opt.* **46** 7054
- [8] Imazono T, Koike M, Koeda M, Nagano T, Sasai H, Oue Y, Yonezawa Z, Kuramoto S, Terauchi M, Takahashi H, Handa N, Murano T 2012 *21st International Conference on X-Ray Optics and Microanalysis Campinas, Brazil, September 5–9, 2011* p24
- [9] Lou J, Xu X D, Liu Y, Hong Y L, Fu S J, He S P 2006 *Opt. Precision Eng.* **14** 12 (in Chinese) [楼俊, 徐向东, 刘颖, 洪义麟, 付绍军, 何世平 2006 光学精密工程 **14** 12]
- [10] Namioka T, Koike M 1995 *Appl. Opt.* **34** 2180
- [11] Harada T, Takahashi K, Sakuma H, Osyczka A 1999 *Appl. Opt.* **38** 2743
- [12] Noda H, Namioka T, Seya M 1974 *J. Opt. Soc. Am.* **64** 1037
- [13] Dong Q L, Liu Y Q, Teng H, Li Y J, Zhang J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 065206

Effect of curve groove on the spectral resolution for soft X-ray holographic flat-field gratings*

Chen Huo-Yao¹⁾ Liu Zheng-Kun^{1)†} Wang Qing-Bo¹⁾ Yi Tao²⁾ Yang Guo-Hong²⁾
Hong Yi-Lin¹⁾ Fu Shao-Jun¹⁾

1) (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

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

(Received 22 May 2014; revised manuscript received 26 July 2014)

Abstract

The soft X-ray spectrograph is an important instrument for plasma diagnostics. As the core optical element of spectrograph, holographic flat-field grating is fabricated by aspheric wave-front recording optics, so grooves on the surface are curve. The curve grooves of the grating would affect the spectral image properties, thus influencing spectral resolutions. In the design of recording optics, only the groove density distribution on the surface in meridian line should be guaranteed, so optimized recording optics is not unique. Thus gratings with different curvatures of grooves but with expected groove density distribution could be obtained. For holographic flat-field gratings used in a 0.8–6 nm region, we analyze the influences of different curve grooves on the spectral image by ray tracing, and find that the almost straight grooves which are obtained by means of cylinder mirror can obtain the better spectral images. The theoretical results show that the spectral resolutions of grating with almost straight grooves are obviously improved compared with curve grooves, the theoretical spectral resolutions increase from 626 to 953 at 3 nm and from 635 to 1222 at 5 nm, respectively.

Keywords: soft X-ray, flat-field grating, curve groove, spectral resolution

PACS: 42.40.Eq, 42.40.Lx, 42.79.Dj, 42.15.Fr

DOI: [10.7498/aps.63.234203](https://doi.org/10.7498/aps.63.234203)

* Project supported by the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (Grant No. U1230104).

† Corresponding author. E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn