第 8 卷　第 2 期
2015 年 4 月

中国光学
Chinese Optics

Vol. 8　No. 2
Apr. 2015

文章编号　2095-1531(2015)02-0241-07

平面全息光栅曝光系统中的分光器件特性分析

姜岩秀[1,2]，韩　建[3]，李文昊[1]，巴音贺希格[1*]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学，北京 100049;
3. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所，江苏 南京 21042)

摘要： 分光器件是全息光栅曝光系统中的关键光学元件，它将入射激光光束分成两束，两相干光束叠加后形成干涉条纹。曝光系统的稳定性不但影响干涉条纹对比度，还影响光栅衍射波前像差、杂散光水平以及光栅掩模刻槽质量。为了提高曝光系统的稳定性，分析入射光束角度偏离与两相干光束夹角(2θ)的关系，并结合干涉条纹周期公式，分别导出了以光栅和棱镜作为分光器件时入射激光光束角度偏离量与待制作光栅空间相位差的解析表达式，据此分析了光栅和棱镜曝光系统的稳定性。结果表明，采用光栅分光的曝光系统的稳定性比棱镜分光曝光系统稳定性提高 5 ~ 6 个数量级，这对长时间曝光制作全息光栅具有实际意义。

关　键　词： 分光光栅；棱镜；空间相位差；曝光系统；稳定性
中图分类号： O433.4　　**文献标识码：** A　　doi：10.3788/CO.20150802.0241

Characteristic analysis for different beamsplitters of the plane holographic grating lithography system

JIANG Yan-xiu, HAN Jian, LI Wen-hao, Bayanheshig*
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nation Astronomical Observatoris, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: bayin888@sina.com*

Abstract: The beamsplitter has a critical role in the interference lithography, which splits one laser beam into two, therefore these two waves can interfere to produce the fringes. The instability of the interference lithography, which is determined by the selection of the beamsplitter, not only decreases the contrast of the patterns, but also causes the phase distortion, high scatter light and low quality of the groove. To improve the stability of the interference lithography system, based on the period equation of the fringes and the correction between deviation of the incidence and the interference beam angular variations(2θ), we discuss the phase distortion due

收稿日期： 2014-11-13；**修订日期：** 2015-01-12
基金项目： 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2011YQ120023)

to the alignment error of cube and the grating beamsplitter, and analyze the stability of the two different interference lithography system. Results indicate that in the grating manufacture, using the grating as the beamsplitter instead of the cube beamsplitter can increase the stability of lithography system by 5 to 6 orders of magnitude, which has a significant effect on grating fabrication with long-time exposure.
Key words:

1 引 言

研制高品质平面全息光栅掩模必须具有高稳定性的曝光系统[1]。干涉条纹对比度、光栅的衍射波前像差等都取决于曝光系统的稳定性。尤其在曝光时间较长情况下制作光栅时,对曝光系统的稳定性提出更高要求[2] 平面全息光栅曝光系统分为分振幅和分波前两种形式。分振幅曝光形式是通过分光器件将入射光分成两束,两光束分别经过准直扩束后在光栅基底上相互干涉形成干涉条纹,这种系统更适于长时间曝光。曝光过程中空气扰动、光学平台振动等直接决定曝光系统的稳定性。目前,实验过程中主要通过两个方面增强曝光系统稳定性:一是调整曝光结构,如在光栅制作过程中,增加条纹锁定系统实现对干涉条纹漂移的补偿[3-5];二是使用稳定性好的器件[6-9],如光栅基底夹具改用真空吸附或使用高稳定支撑镜架。通过上述方法的改进,光栅条纹稳定性得到明显的改善。但是,上述方法也存在不足之处,如条纹锁定系统无法消除干涉条纹漂移中的正弦振动[3],会使干涉条纹对比度下降;分波前曝光系统要求准直透镜和洛艾镜面积足够大,使得加工比较困难。

鉴于此,本文提出以分光光栅代替分光棱镜提高全息光栅曝光系统稳定性的设想,并作了较为深入的研究。根据光栅和分束棱镜的分光原理,结合干涉条纹周期公式,推导出入射激光束角度偏离量与待制作光栅空间相位差的解析表达式。由此不仅可给出待制作光栅空间相位差与待制作光栅周期的变化关系,同时可解释分别使用光栅和棱镜分光时曝光系统稳定性不同的原因,为在实际光栅制作中选择合适的分光器件,提高曝光系统稳定性提供了理论依据。

2 平面全息光栅空间相位差表达式

平面全息光栅的曝光系统是使用两束相干平面波相干涉,,如图1。在光栅基底上形成干涉条纹,其条纹周期可表示为[10]:

$$d_0 = \frac{\lambda}{2n_0\sin\theta}, \tag{1}$$

式中,d_0为光栅干涉条纹周期,λ 为曝光波长,θ 为入射光束与基底法线的夹角,n_0为曝光空间折射率,在空气中通常取 $n_0=1$。

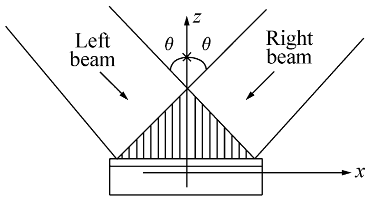


图1 平面全息光栅干涉示意图

Fig. 1 Setup of interference lithography(IL)

在光栅制作过程中,由于系统稳定性及调整误差的影响,使得光栅干涉条纹周期和衍射波前发生变化,其变化大小通过光栅空间相位差表示[11-13]:

$$\phi = 2\pi n = \left(\frac{2\pi}{d_0} - \frac{2\pi}{d_0'}\right)x, \tag{2}$$

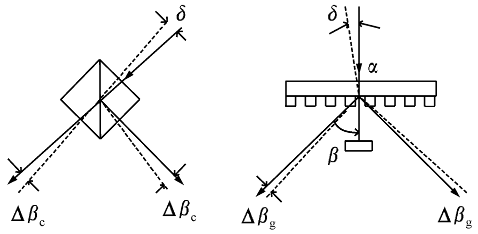
式中,d_0和 d_0'分别为基准光栅周期和干涉条纹周期,n 为光栅空间相位差,是指在 x 位置处,曝光系统干涉条纹数与基准光栅刻线数的差值。

3 棱镜与光栅分光器件对两相干光夹角的变化影响

3.1 棱镜与光栅分光器件的分光原理

可用于分振幅曝光系统中的分光器件主要有

两种: 棱镜和光栅。分光光束的角度会随着分光器件与激光束入射方向的微小变化而变化,这会影响两相干光夹角。以入射光束角度偏离量为 δ 为例,分析分光光束角度变化如图 2。



(a) 棱镜分光　　(b) 光栅分光
(a) Cube　　(b) Grating beamsplitter

图 2　不同分光器件分光光束角度变化比较

Fig. 2　Angular variation comparison for different beam-splitters

使用棱镜分光时,入射光束在分界面处被分成反射光束和透射光束。如图 2(a) 所示,当入射光束角度改变 δ 时,分光光束改变角度 $\Delta\beta_c$。根据反射和透射定理,棱镜分光时角度偏离满足条件:

$$\Delta\beta_c = \delta . \tag{3}$$

当使用光栅分光时,入射光束经光栅衍射后,根据光栅方程:

$$\sin\beta - \sin\alpha = \frac{m\lambda}{d_g} , \tag{4}$$

式中,α 为光束入射角,β 为光束衍射角,d_g为分光光栅的周期。式(4) 两边经微分得到:

$$\cos\beta d\beta - \cos\alpha d\alpha = 0 , \tag{5}$$

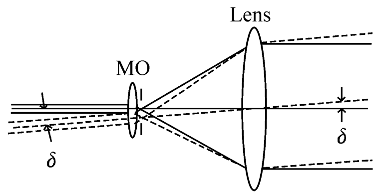
在分光光栅使用过程中 $\alpha = 0$,则分光光束角度偏离满足:

$$\Delta\beta_g = K\delta , \tag{6}$$

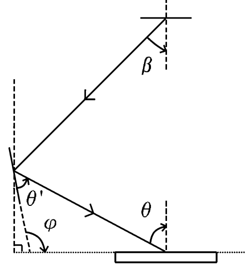
式中,$K = d\beta/d\alpha = 1/\cos\beta$,为角度偏离系数,表示分光光束与入射光束的角度偏离倍数关系。在分光光栅作为分光器件的曝光系统中,分光光束的角度偏离量不但与 δ 有关,还与角度偏离系数 K 有关。分光光束的角度变化量随着 K 和 β 的增大而增大。

3.2　分光光束与两相干光夹角的变化关系

在分振幅曝光系统中,分光光束经准直扩束后,以特定的角度在基底处相互干涉。当分光光束角度偏离时,准直光束也随之偏离,即准直系统不改变分光光束的传播方向,如图 3(a)。为讨论两相干光夹角与分光光束角度变化关系,忽略系统中准直部分,其光束传播路径如图 3(b)。



(a) 入射光束与准直光束变化关系
(a) Correlation between the incident beam and the collimation beam



(b) 入射光束与两相干光夹角变化关系
(b) Correlation between the incident beam and the interference angle

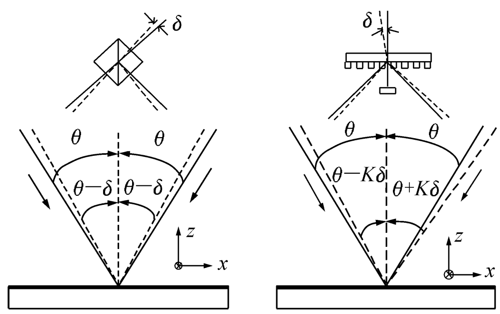
图 3　光束偏离与相干光夹角变化关系

Fig. 3　Correlation between the interference angular variation and the angle alignment error

以左光束入射光路为例,分析分光光束角度改变对两相干光夹角的影响。由几何关系可知,两相干光夹角与分光光束角度关系为:

$$\theta = 2\varphi - \pi + \beta , \tag{7}$$

式(7) 两边微分,则两相干光夹角与分光光束角



(a) 棱镜分光　　(b) 光栅分光
(a) Cube　　(b) Grating beamsplitter

图 4　不同分光器件引起两相干光夹角变化示意图

Fig. 4　Angular variations for using the different beam-splitters

度变化关系为:

$$\Delta\theta = \Delta\beta , \tag{8}$$

即分光光束角度与两相干光夹角变化相同。分光光束的角度偏离随不同分光器件而不同,两相干光夹角的变化也不同。综合式(3)、(6)、(8),棱镜和光栅作为分光器件对应的两相干光夹角变化关系如图4所示。

4 光束调整误差对不同分光器件引起的干涉条纹空间相位差比较

4.1 棱镜和光栅分光时干涉条纹周期计算

根据图4(a)中的分析,使用棱镜分光时,光束偏离角度为δ条件下,干涉条纹周期可表示为:

$$d'_{0c} = \frac{\lambda}{2\sin(\theta-\delta)} \approx d_0 [1 + \delta\cot\theta + O(\delta^2)] , \tag{9}$$

结合式(1)、(2)、(9),在忽略调整误差平方项影响的条件下使用棱镜分光时,可得到:

$$n_c = \frac{x\delta\cot\theta}{d_0} , \tag{10}$$

式(10)为使用棱镜分光时干涉条纹空间相位差与光束偏离角度之间的关系。根据式(1),式(10)可写为:

$$n_c = x\delta\sqrt{\frac{4}{\lambda^2} - \frac{1}{d_0^2}} , \tag{11}$$

式(11)为干涉条纹空间相位差与制作光栅周期的关系。

使用分光光栅时,根据图4(b)所示,干涉条纹周期可表示为:

$$d'_{0g} = \frac{\lambda}{\sin(\theta+K\delta) + \sin(\theta-K\delta)} = d_0 [1 + \frac{(K\delta)^2}{2} + O(K^4\delta^4)] , \tag{12}$$

结合式(1)、(2)、(12),在忽略高级次项影响下,可得当光栅分光时:

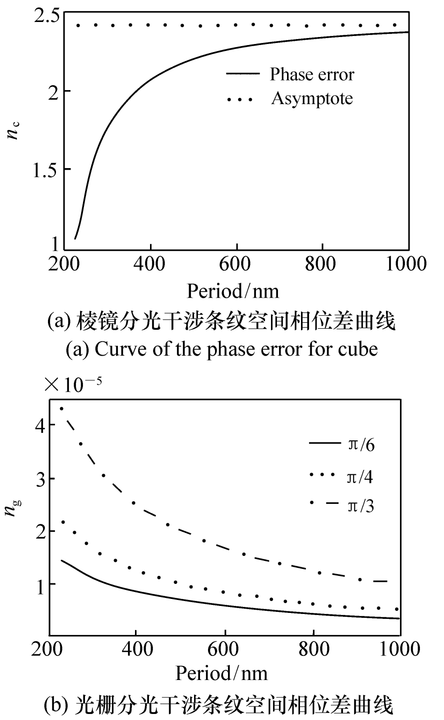
$$n_g = \frac{x(K\delta)^2}{2d_0} , \tag{13}$$

式中,$K = 1/\cos\beta$。

式(13)为干涉条纹空间相位差与光束偏离角度之间的关系。由式(11)、(13)的分析可知,当光栅分光时,干涉条纹空间相位差则与光束偏离角度δ的平方成比例;当棱镜分光时,干涉条纹空间相位差与光束偏离角度δ成比例。在光束偏离角度很小时,满足条件$(K\delta)^2 \ll \delta$,从而使不同分光器件曝光系统稳定性差异较大。

4.2 不同分光器件曝光系统稳定性比较

根据式(11)、(13)可知,棱镜与光栅作为分光器件引起的干涉条纹空间相位差与光栅周期变化曲线关系如图5。



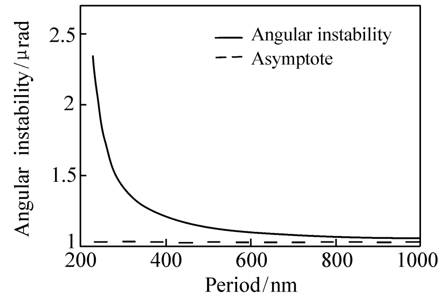
(b) 光栅分光干涉条纹空间相位差曲线
(b) Curve of the phase error for grating beamsplitter

图5 不同分光器件干涉条纹空间相位差与干涉条纹周期的变化曲线

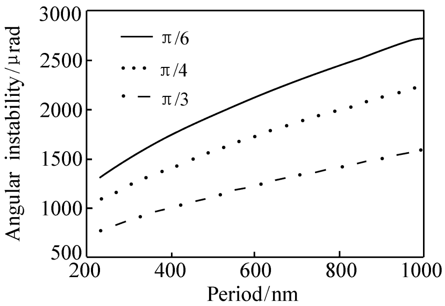
Fig. 5 Phase distortion comparison due to the pattern period for different beamsplitters

图5为在$\delta = 10$ μrad,$x = 50$ mm处,平面全息光栅空间相位差随条纹周期变化曲线。从图5可以看出,使用棱镜分光时,光栅周期的增加将使光栅空间相位差逐渐增大;使用光栅分光时,光栅空间相位差反而逐渐减小,且分光光束的选择也影响光栅空间相位差,分光光束衍射角越大,条纹空间相位差也越大,故在使用分光光栅的曝光光路调整中,尽量选择衍射角小的分光光束。尽管如此,由图中比较知,相同光束偏离条件下,分光光栅曝光系统产生的条纹空间相位差远远小于棱

镜曝光系统（相差 5 个数量级）。在符合光栅衍射波像差小于 $1/4\lambda$ 条件下，讨论不同分光器件所允许的光束偏离范围如图 6，曲线表示 $n=0.25$，$\lambda=413.1$ nm 的激光制作 100 mm 光栅时，分别使用棱镜和光栅分光时曝光系统允许的光束角度偏离曲线。从图 6 可以看出，使用光栅分光时，光束角度偏离随干涉条纹周期的增大而增大，且分光光束的衍射角越小，其允许的角度偏离越大；而使用棱镜分光时，光束允许的角度偏离随干涉条纹周期的增大而减小。这里以制作 1 800 l/mm光栅为例，光栅分光时，光束所允许的偏离角度最大为 1 667 μrad；而棱镜分光所允许的光束偏离角度最大为 1.112 μrad。可见，曝光系统中使用分光光栅，可有效提高光栅刻线密度的制作精度。



(a) 棱镜分光允许的光束偏离
(a) Allowable angular instability for cube



(b) 光栅分光允许的光束偏离
(b) Allowable angular instability for grating beamsplitter

图 6　不同分光器件条件下光束偏离比较（$n=0.25$）
Fig. 6　Allowable angular instability comparison for different beamsplitters when $n=0.25$

为了分析不同分光器件对曝光系统稳定性的影响，取光束偏离（为 10 μrad 的条件下，分别给出了选择分光棱镜和分光光栅作为分光器件制作不同面积光栅时，所带来的光栅空间相位差，分析结果见表 1。由表 1 数据知，由光栅分光曝光系统带来的空间相位差远远小于棱镜曝光系统，其数值大小相差 5～6 个数量级，并且光栅空间相位差随光栅制作面积的增大而逐渐增大，当制作 50 mm×50 mm 光栅时，棱镜和光栅分光曝光系统引起的空间相位差 n 分别为 1.124 和 9e-6，制作500 mm×1 000 mm 光栅时，棱镜和光栅分光曝光系统引起的空间相位差 n 则为 22.5 和 1.8e-4，使用棱镜曝光系统时，角度偏离引起的空间相位差较大，基底表面条纹对比度下降；而使用光栅分光时，空间相位差较小，可以忽略光栅干涉条纹的对比度变化。综合以上分析，棱镜分光曝光系统的稳定性远不及光栅分光曝光系统的稳定性，尤其在曝光时间较长情况下，光栅分光曝光系统的优势更为明显。

表 1　不同分光器件导致光栅空间相位差变化（以 1 800 gr/mm 为例）

Tab. 1　Phase distortion comparison between the cube and the grating beamsplitters for the same angle alignment error（1 800 gr/mm）

Grating area/mm	Cube beamsplitter(n)	Grating beamsplitter(n) 30°	45°	60°
50×50	1.124	3e-6	4.5e-6	9e-6
100×100	2.25	6e-6	9e-6	1.8e-5
200×200	4.5	1.2e-5	1.8e-5	3.6e-5
400×400	9	2.4e-5	3.6e-5	7.2e-4
500×1 000	22.5	6e-5	9e-6	1.8e-4

4.3 光栅分光曝光系统稳定性与分光光束衍射角的关系

在光栅分光曝光系统中，随着分光光束衍射角的增大，光束偏离系数也逐渐增大，当光束偏离系数过大时，分光光栅曝光系统的稳定性将变得较差。当满足 $n_g = n_c$ 时，光栅分光和棱镜分光的稳定性相当。根据式(11)、(13)知，此时分光光束衍射角与光栅周期之间的关系为:

$$\cos^2\beta = \frac{\delta}{2\cot\theta} = \frac{\delta}{2\sqrt{\frac{2d_0^2}{\lambda^2} - 1}}. \tag{14}$$

图7为 $n_g = n_c$ 时分光光束衍射角随周期变化曲线，此时分光光束衍射角在89°以上，基本属于掠衍射，在实际情况中，分光光束衍射角通常会在20°~50°范围内变化，经计算知，在此由分光光束偏离角引起的空间相位差，远远小于棱镜分光曝光系统。因此，分光光栅曝光系统的稳定性远远高于棱镜分光曝光系统，只有掠衍射情况下二者相当。

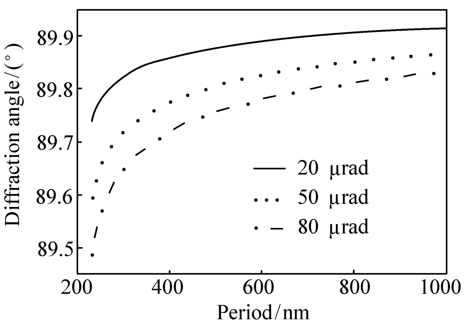


图7 分光光束衍射角随周期变化曲线

Fig. 7 Curve of the diffraction angle due to the pattern period

当然，分光光束衍射角由激光波长和分光光栅刻线密度共同决定，虽然不同刻线密度光栅所产生的衍射级次不同，并不会直接影响待制作光栅的空间相位差(即刻线密度)，但是，衍射级次越多每个级次上的能量分配将越低。因此，在选择分光光栅的刻线密度时，要兼顾曝光光束能量问题，最好以镀有增透膜的光栅作为分光器件。

5 结 论

通过光栅和棱镜的分光原理，推导出角度偏离量与待制作光栅空间相位差的解析表达式，由此分析不同分光器件曝光系统的稳定性。根据全文的分析可以得到如下结论:(1)棱镜分光时，待制作光栅空间相位差与入射光束角度偏离 δ 成正比;反之，使用光栅分光时，相干光夹角 θ 变化是反对称的，待制作光栅空间相位差与 δ^2 成正比，由于光栅制作中 δ 较小，故使用光栅分光曝光系统的稳定性较高。(2)使用棱镜分光时，光栅空间相位差随待制作光栅周期的增加而逐渐增大;使用分光光栅时，待制作光栅空间相位差反而逐渐减小。(3)分光光栅曝光系统稳定性随光束衍射角增大而逐渐下降，当 $n_g = n_c$ 时，曝光系统稳定性与采用棱镜分光时相当，此时分光光束基本属于掠衍射，实际情况不会出现。因此，为了有效提高曝光系统稳定性，可以使用光栅代替棱镜分光，尤其在曝光时间较长情况下，选择光栅作为分光器件，从而获得稳定性优良的曝光系统，降低长时间曝光对系统抗干扰能力要求的压力，制作出的全息光栅密度精度高、衍射波前像差小、杂散光强度低，尤其对脉冲压缩等特种用途光栅而言是十分重要的。

参考文献:

[1] 孔鹏，巴音贺希格，李文昊，等. 全息光栅非对称曝光显影的理论模拟及实时监测[J]. 光学学报，2010，30(1):65-69.

KONG P, BAYANHESHIG, LI W H, *et al.*. Modeling and in-situ monitoring of the asymmetric exposure and development of holographic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1):65-69. (in Chinese)

[2] 钱国林，李朝明，吴建宏，等. 全息曝光条纹锁定系统特性研究[J]. 激光技术，2008，32(6):648-650.

QIAN G L, LI CH M, WU J H, *et al.*. Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):648-650. (in Chinese)

[3] SCHATTENBURG M L, CHEN C G. Progress towards a general grating patterning technology using phase-locked scanning

beams [J]. *SPIE*, 2002, 4485: 378-384.

[4] 祝绍箕. 制作全息光栅的新装置 [J]. 光学学报, 1990, 10(2): 189-192.
ZHU SH J. A new device for manufacturing holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, 10(2): 189-192. (in Chinese)

[5] 巴音贺希格，邵先秀，崔继承，等. 制作平面全息光栅的离轴抛物镜/洛艾镜干涉系统 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1): 56-63.
BAYANHESHIG, SHAO X X, CUI J CH, *et al*.. The off-axis parabolic/lioyd's mirror interferometric system for manufacturing plane holographic gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 56-63. (in Chinese)

[6] HERSHEY R R, LEITH E N. Grating interferometers for producing large holographic gratings [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(7): 937-943.

[7] RUSHFORD M C, BRITTEN J A. Split-aperture laser pulse compressor design tolerant to alignment and line-density differences [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1902-1904.

[8] KONKOLA P, CHEN C G, Heilmann R, *et al*.. Beam steering system and spatial filtering applied to interference lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2000, 18(6): 3282 - 3286.

[9] 徐福全，金陆，李文昊，等. 曝光系统离焦对平面全息光栅衍射波前的影响 [J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 57-61.
XU F Q, JIN L, LI W H, *et al*.. Influence of defocus of exposure system on diffraction wavefront of plane holographic grating [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 57-61. (in Chinese)

[10] 李朝明，吴建宏，陈欣荣，等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1943-1946.
LI CH M, WU J H, CHEN X R, *et al*.. Research on the muti-exposure method to fabricate pulse compression masaicgrating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1943-1946. (in Chinese)

[11] CHEN C G. Beam Alignment and image metrology for scanning beam interference lithography fabricating Gratings with namometer phase accuracy [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003.

[12] ZHANG W, WU J H. New method for the fabrication of pulse compression grating [J]. *SPIE*, 2006, 6149: 614921.

[13] 刘正坤，刘颖，邱克强，等. 软 X 射线双频光栅设计及制作 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7): 1780-1785.
LIU ZH K, LIU Y, QIU K Q, *et al*.. Design and fabrication of soft X-ray double frequency grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1780-1785. (in Chinese).

作者简介：

姜岩秀（1987—），女，吉林舒兰人，博士研究生，2006 年于长春理工大学大学获得学士学位，主要从事变栅距全息光栅设计与制作技术研究。E-mail: jiangyanxiup@163.com

李文昊（1980—），男，内蒙古赤峰人，博士，副研究员，硕士生导师，2002 年于陕西科技大学获得学士学位，2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺方面的研究。E-mail: leewenho@163.com

韩　建（1984—），男，山东德州人，博士，助理研究员，2007 年于聊城大学获学士学位，2012 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事光栅理论，光栅制作技术方面的研究。E-mail: hanjian523@163.com

巴音贺希格（1962—），男，内蒙古鄂尔多斯人，博士，研究员，1984 年于内蒙古民族大学获得学士学位，2001 年于吉林大学获得硕士学位，2004 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位，主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术方面的研究。E-mail: bayin888@sina.com