

文章编号: 1001-3806(2016)03-0339-05

## 干涉条纹相位变化对平面全息光栅曝光的影响

宋莹

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 为更好地评价平面全息光栅曝光系统的性能,了解干涉条纹相位变化对光栅制作的影响,基于曝光量表达式,结合光栅掩模槽形二元模型,采用理论分析和数值计算的方法,分析了条纹相位变化对曝光对比度、光栅掩模槽形和曝光量相位的影响。各种形式的干涉条纹低频漂移均会降低曝光对比度,导致掩模槽形的可控性下降,其影响具有一致性;为保证曝光对比度达到0.95,低频漂移均方根值应控制在0.05个条纹周期以内;小幅值高频振动对光栅曝光的影响可以忽略;低频漂移造成的曝光量相位误差不影响光栅的衍射特性。结果表明,为获取合格的光栅掩模,应控制光刻胶非线性和曝光量的匹配关系,并将干涉条纹低频漂移均方根值控制在1/20条纹周期以内。可将其作为评价全息光栅曝光系统稳定性的重要指标。

**关键词:** 光栅;光栅曝光;数值计算;条纹相位变化;曝光对比度;掩模槽形

**中图分类号:** O438.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.008

### Effect of phase changes of interference fringes on exposure of plane holographic gratings

SONG Ying

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to evaluate the performance of plane holographic grating exposure system and study the influence of interference fringe's phase changes on grating manufacture, based on exposure dose expression and binary model of grating mask profile, the effect of fringe's phase vibration on exposure contrast, grating mask profile and exposure phase were analyzed by theoretical analysis and numerical calculation. The results show that all kinds of interference fringe low-frequency drift decrease exposure contrast and the controllability of grating mask profile is reduced. The influence has consistency. For keeping the exposure contrast greater than 0.95, root mean square(RMS) value of low-frequency drift needs to be controlled in the range of 0.05 fringe's period. The effect of small amplitude high frequency vibration on grating exposure can be neglected. Exposure phase error caused by low-frequency shift doesn't impact diffractive characteristic of grating. For getting qualified grating mask, the matching relationship between photoresist nonlinearity and exposure should be controlled and RMS of low frequency drift should be smaller than 1/20 fringe's period which can be used to evaluate the stability of holographic grating exposure system.

**Key words:** grating; grating exposure; numerical calculation; fringe's phase change; exposure contrast; grating mask profile

## 引言

干涉场曝光是全息光栅制作的关键步骤,平面全息光栅采用两束相干平面波干涉曝光。在一块经过光学抛光的平面基底上均匀涂覆光刻胶,并把它放在干涉场中曝光<sup>[1-3]</sup>。干涉场面积大于光栅基底面积,在曝光时间内,完成基底表面所有干涉条纹的记录。此时

要求干涉条纹和光栅基底均保持静止状态,二者之间具有固定的相位关系。但由于外部环境的扰动,包括光学平台振动、温度波动、气流扰动等,会造成干涉条纹移动,即干涉条纹相位发生变化<sup>[4-7]</sup>。实验中,可以发现干涉条纹相位变化会造成曝光对比度下降,甚至导致曝光失败。苏州大学 QIAN 等人建立了一套基于线阵电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)的全息曝光条纹锁定系统,取得了良好的效果,采用计算机模拟了条纹漂移与曝光对比度之间的关系,但没有建立二者之间具体的数学关系及条纹漂移对光栅掩模槽形的影响<sup>[8]</sup>。云南工业大学的 YANG 等人从光栅衍射效率出发,给出了外部环境对全息拍摄光路的影响,并论述多种克服条纹移动的方法<sup>[9]</sup>。本文中从平面

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2011YQ120023)

作者简介:宋莹(1985-),女,助理研究员,现主要从事光栅制造技术的研究。

E-mail: songyingtec@126.com

收稿日期:2015-03-18;收到修改稿日期:2015-04-15

全息光栅曝光量出发,将干涉条纹的相位变化简化为线性漂移、正弦漂移和小幅值高频振动3种形式,采用数学方法分别分析其对曝光对比度、光栅掩模槽形和曝光量相位差造成的影响。

### 1 平面全息光栅的曝光量

设在曝光时间内光栅基底在  $x$ - $y$  坐标平面记录干涉条纹,曝光的背景光强和干涉条纹光强振幅为常量。由于环境影响,干涉条纹将发生相位移,设任意时刻  $t$  曝光场中所有干涉条纹的相位变化均为  $\varphi_e(t)$ ,干涉条纹的强度分布可以表示为:

$$I(x,t) = I_d + I_a \sin\left[\frac{2\pi x}{p} + \varphi_e(t)\right] \quad (1)$$

式中,  $I_d$  为背景光强分布,  $I_a$  为干涉条纹的光强变化振幅,  $x$  为干涉条纹横坐标,  $p$  为干涉条纹周期。

将光栅基底放入干涉场区域进行曝光,光栅基底上涂覆的光刻胶记录干涉条纹在曝光时间内的曝光量,曝光量  $D(x)$  是光强在曝光时间  $T$  内的积分:

$$D(x) = \int_0^T I(x,t) dt = D_d + D_a \sin\left(\frac{2\pi x}{p} + \psi_e\right) \quad (2)$$

式中,  $D_d = I_d T$  为平均曝光量;  $D_a$  为曝光量振幅,且  $D_a = I_a \times \sqrt{\left[\int_0^T \cos\varphi_e(t) dt\right]^2 + \left[\int_0^T \sin\varphi_e(t) dt\right]^2}$ ;  $\psi_e$  为干涉条纹相位变化造成的曝光量相位偏差,  $\tan\psi_e = \frac{\int_0^T \sin\varphi_e(t) dt}{\int_0^T \cos\varphi_e(t) dt}$ 。

理想情况下干涉条纹保持静止,即  $\varphi_e(t) = 0$  时,根据式,理想曝光量表示为:

$$D(x) = I_d T + I_a T \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) = D_d \left[1 + V_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right)\right] \quad (3)$$

式中,  $V_0 = I_a/I_d$  为理想曝光对比度<sup>[10]</sup>。

### 2 条纹相位变化对曝光对比度的影响

#### 2.1 低频漂移对曝光对比度的影响

干涉条纹的低频漂移主要由外部环境的缓慢变化引起,其中主要包括温度的缓慢变化、地面的低频振动和气流运动。将干涉条纹的低频漂移分为线性漂移和正弦漂移两种形式,分别分析其对曝光对比度的影响。

2.1.1 低频线性漂移对曝光对比度的影响 在曝光时间  $T$  内,若干干涉条纹相位线性的变化为  $\Phi_1$ ,即  $\varphi_e(t) = \Phi_1 t/T$ ,  $\Phi_1$  为线性变化的幅值。根据(2)式,此时曝光量  $D(x)$  表示为:

$$D(x) = I_d T + \frac{I_a T \sqrt{2(1 - \cos\Phi_1)}}{|\Phi_1|} \sin\left[\frac{2\pi x}{p} + \frac{\Phi_1}{2}\right] =$$

$$D_d \left[1 + V \sin\left(\frac{2\pi x}{p} + \psi_e\right)\right] \quad (4)$$

式中,  $V = \frac{V_0 \sqrt{2(1 - \cos\Phi_1)}}{|\Phi_1|}$  为曝光对比度,曝光量相位误差  $\psi_e = \Phi_1/2$ 。

对比理想曝光量(3)式和(4)式,归一化后的曝光对比度  $V/V_0$  随  $\Phi_1$  ( $\Phi_1 \in [-6\pi, 6\pi]$ ) 变化的关系如图1所示。从图1中可以发现:  $V$  变为理想曝光对比度  $V_0$  的  $\frac{\sqrt{2(1 - \cos\Phi_1)}}{|\Phi_1|}$  倍,该值小于1,说明干涉条纹相位线性变化会造成曝光对比度下降。  $V$  的变化为偶函数,存在以  $2\pi$  为周期的旁瓣,旁瓣峰值逐渐减小;当  $|\Phi_1| < 2\pi$  时,  $V$  随着  $|\Phi_1|$  的增加迅速下降;当  $|\Phi_1| < \pi/2$  时,  $V > 0.9V_0$ ; 当  $|\Phi_1| > 2\pi$  时,  $V$  均小于  $0.25V_0$ , 曝光对比度较差;当  $\Phi_1 = \pm 2n\pi$  时,曝光对比度下降为0,此时曝光量全部为背景直流分量,光栅曝光失败。

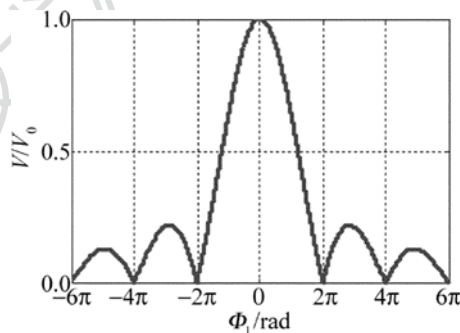


Fig. 1 Influence of linear change of fringe phase on exposure contrast

2.1.2 低频正弦漂移对曝光对比度的影响 在曝光周期内,若干干涉条纹发生正弦漂移,即  $\varphi_e(t) = \Phi_s \times$

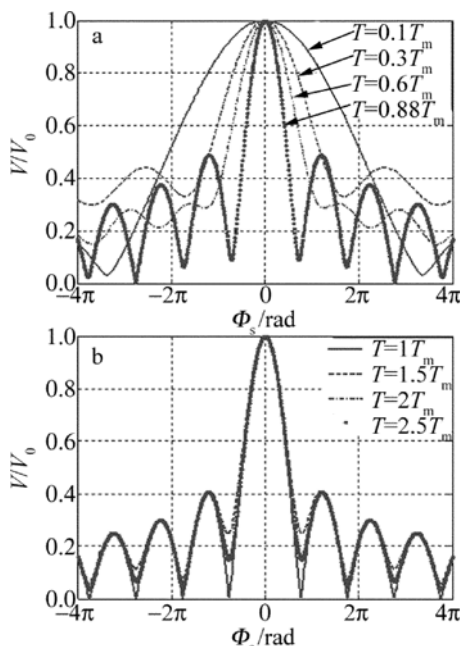


Fig. 2 Influence of fringe phase sinusoidal change on exposure contrast  
a— $T < T_m$  b— $T > T_m$

$\sin(2\pi f_m t)$ , 其中  $f_m$  为正弦漂移的频率,  $\Phi_s$  为正弦漂移的幅值。此时无法获取曝光量的数学表达式, 通过 MATLAB 进行数值模拟, 得到归一化后曝光对比度随  $\Phi_s$  的变化曲线如图 2 所示。图中  $T_m = 1/f_m$ ,  $T_m$  为正弦漂移的周期,  $T$  为曝光时间。从图 2 可以发现以下的变化规律:  $V/V_0 < 1$ , 说明干涉条纹的正弦变化也会造成曝光对比度下降,  $V$  的变化也为偶函数;  $V$  变化与正弦漂移幅值  $\Phi_s$  及曝光时间与正弦漂移周期比值  $T/T_m$  有关; 在  $T/T_m < 1$  时,  $V$  受  $T/T_m$  的影响较大, 而当  $T/T_m > 1$  时,  $V$  受  $T/T_m$  的影响较小, 变化曲线趋于稳定。

事实上,  $V$  与  $\varphi_e$  的均方根值  $\varphi_{e,RMS}$  直接相关, 而  $\varphi_{e,RMS}$  由  $\Phi_s$  和  $T/T_m$  决定, 归一化后  $\varphi_{e,RMS}/\Phi_s$  随  $T/T_m$  的变化关系如图 3 所示。可见, 当  $T/T_m = 0.88$  时,  $\varphi_{e,RMS}$  达到最大值, 随着  $T/T_m$  的增加,  $\varphi_{e,RMS}$  将围绕  $0.707\Phi_s$  为稳态值上下波动, 逐渐趋于稳定。

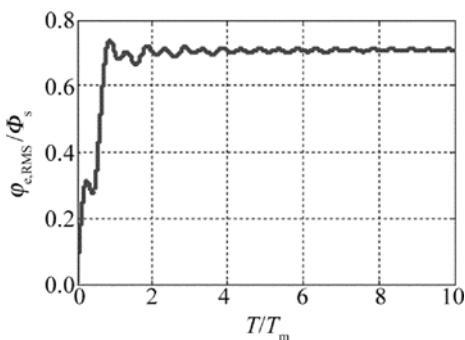


Fig. 3 Relationship between  $\varphi_{e,RMS}/\Phi_s$  and  $T/T_m$

结合图 2 与图 3 可以发现: 当  $\Phi_s \in [-0.75\pi, 0.75\pi]$ , 即图 2 中  $V/V_0$  变化的主瓣范围内, 曝光对比度  $V$  的变化与  $\varphi_{e,RMS}$  成反比。当  $T < 0.88T_m$  时, 根据图 3, 正弦漂移幅值  $\Phi_s$  相同时, 随着  $T/T_m$  增加,  $\varphi_{e,RMS}$  呈现增长趋势 ( $T/T_m \in [0.28, 0.43]$  的局部范围为降低),  $V$  将呈现降低趋势。说明  $T/T_m$  越大, 即相同的曝光时间, 正弦漂移的频率越高, 或相同的正弦漂移, 曝光时间越长, 对曝光对比度的影响越大。当  $T > 0.88T_m$  时, 主瓣范围内曝光对比度迅速下降, 具有与线性漂移相似的变化趋势。

**2.1.3 低频漂移影响的一致性** 从 2.1.1 节和 2.1.2 节中可以发现, 线性漂移和正弦漂移对曝光对比度的影响具有相似性, 用均方根值评价线性漂移和正弦漂移的变化。归一化后, 曝光对比度  $V/V_0$  随  $\varphi_{e,RMS}/(2\pi)$  的变化如图 4 所示。从图中可见, 在第 1 个主瓣范围内, 正弦漂移和线性漂移对曝光对比度的影响基本一致, 因此, 低频漂移对曝光对比度的影响均可用相位变化均方根值来衡量。当  $\varphi_{e,RMS}/2\pi < 0.05$  时, 曝光对比度可以达到 0.95 以上。

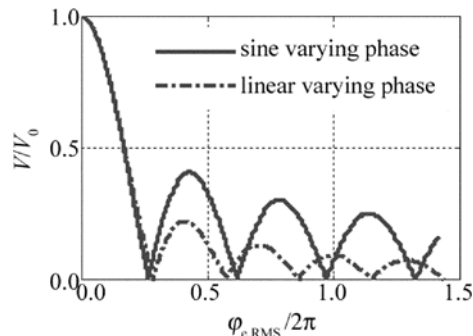


Fig. 4 Relationship between exposure contrast and  $\varphi_{e,RMS}$

在全息光栅曝光系统中, 为降低低频漂移的影响, 采用多种被动隔离方式对干涉条纹的低频漂移进行抑制。首先, 全息光栅曝光装置需安置在具有精密温度控制的超净间内, 保证曝光过程中外部温度维持恒定; 其次, 曝光光学系统需放置在隔振平台上, 隔振平台采用被动或主动隔振措施, 以滤除地面的高频振动, 并衰减地面的低频振动; 再次, 为降低气流运动的影响, 曝光光路核心区域用隔离防护罩与外部环境隔离; 最后, 在光栅曝光前, 工作人员需远离曝光光路区域, 消除人员对外部环境的影响, 稳定一段时间后, 通过电子光阑放出激光进行曝光。采用这些被动隔离方式后, 干涉条纹的低频漂移将大大降低。此时通过光电探测器测量干涉条纹的相位变化, 数据处理后获得低频相位变化的均方根值, 根据图 4 可获取曝光对比度, 评价曝光系统的性能, 并作为是否增加相位锁定系统的依据。根据图 4, 对已有的一套全息光栅曝光系统进行了评价, 发现其无法满足曝光要求, 设计了一套移频式曝光干涉条纹相位锁定系统, 锁定后干涉条纹的相位变化小于  $\pm 0.02$  个干涉条纹周期, 获得了较好的曝光性能<sup>[6]</sup>。

**2.2 小幅值高频振动对曝光对比度的影响**

干涉条纹的相位移动除了与曝光时间同量级的低频漂移外, 还存在频率相对较高的高频振动, 这种振动主要是由工作台和光学器件的振动引起。不考虑干涉条纹的低频漂移, 高频相位移动  $\varphi_e$  可以看成  $[-\Phi_{HF}, \Phi_{HF}]$  之间均匀分布的随机变量,  $\Phi_{HF}$  为相位高频振动的振幅, 其概率密度函数如图 5 所示。

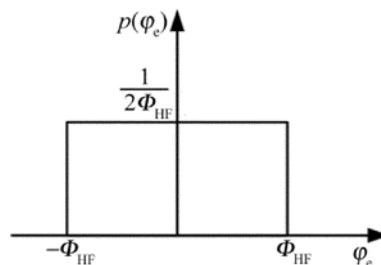


Fig. 5 Probability density function of uniformly distribution random phase signal

一般高频振动的幅值较小,这时  $\cos\varphi_e \approx 1 - \varphi_e^2/2$ ,  $\sin\varphi_e \approx \varphi_e$ 。根据随机变量的性质,随机变量  $\varphi_e$  的期望  $E(\varphi_e) = 0^{[11]}$ ,可以得到  $\int_0^T \cos\varphi_e(t) dt \approx T$ ,  $\int_0^T \sin\varphi_e(t) dt \approx 0$ 。根据(2)式,存在高频相位振动的曝光量表达式可以写为:

$$D(x) \approx I_d T + I_a T \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (5)$$

该曝光量与  $\varphi_e(t) = 0$  时的理想曝光量近似相等,可见小幅度高频随机振动对曝光对比度和光栅掩模槽形的影响较小。这是由于小幅度随机振动具有随时间变化的不确定性,全息光栅的曝光过程相当于无数幅曝光照片的叠加,具有时间均化作用。

### 3 低频漂移对光栅掩模槽形的影响

光栅基底经过曝光显影后获得光栅掩模,在光刻胶类型和显影条件一定时,曝光参量将对光栅掩模的形状产生影响。对于适合离子束刻蚀的光栅掩模,有以下要求:掩模基底无残胶,掩模具有特定的占宽比和槽深。干涉条纹低频漂移造成对比度下降,进而影响光栅掩模槽形。根据光栅掩模槽形的二元模型<sup>[12]</sup>,设光刻胶的感光上限为  $D_c$ ,  $D_d$  为平均曝光量,可知光栅掩模槽形的占宽比可表示为:

$$\frac{L}{p} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin\left[\frac{1}{V}\left(\frac{D_c}{D_d} - 1\right)\right] \quad (6)$$

式中,  $L$  为掩模槽形槽脊距离。

从上式可见,光栅槽形占宽比是曝光量和曝光对比度综合作用的结果。设条纹初始对比度  $V_0 = 1$ ,根据该二元模型和图 4,可以得到光栅掩模占宽比  $L/p$  (无量纲)与  $D_c/D_d$  和归一化的  $\varphi_{e,RMS}$  之间的关系,如图 6 所示,图中不同深浅代表不同的占空比。从图中可以发现,当  $\varphi_{e,RMS} = 0$  时,在  $D_c$  一定的条件下,掩模槽形的占宽比与平均曝光量  $D_d$  成反比,可以通过曝光量对掩模槽形的占宽比进行控制,这是全息光栅制作过程中槽形控制的常用方法。若干涉条纹发生低频漂移,会导致光栅掩模槽形的可控性降低。当  $D_c/D_d > 1$  时,随着  $\varphi_{e,RMS}$  的增加,光栅槽形的占宽比将增加,当槽形占空比为 1 时,显影后光栅掩模槽底存在残胶,影响光栅掩模的质量;当  $D_c/D_d < 1$  时,随着  $\varphi_{e,RMS}$  的增加,光栅槽形的占宽比将减小,当光栅掩模槽形的占宽比为 0 时,显影后光刻胶全部溶解掉,掩模制作失败;当  $D_c/D_d$  接近 1 时,干涉条纹相位移动对掩模槽形占宽比的影响减小。因此,在全息光栅的制作过程中,为了提高光栅掩模槽形的可控性,一方面需提高曝光系统稳定性,降低干涉条纹的低频漂移;另外一方面,需

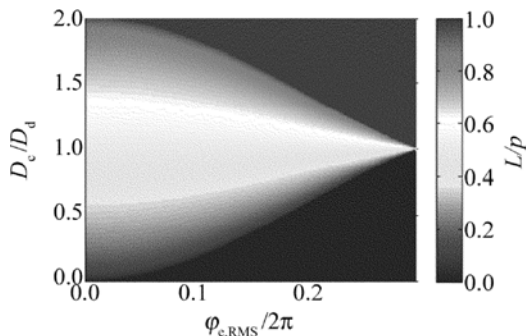


Fig. 6 Relationship among duty ratio of grating mask,  $D_c/D_d$  and  $\varphi_{e,RMS}$  根据所涂覆的光刻胶特性,合理选择曝光量,使槽形受干涉条纹相位变化影响降低。

### 4 条纹相位变化造成的曝光量相位误差

从(2)式可以看出,曝光量存在一个与干涉条纹移动量有关的相位误差  $\psi_e$ 。若曝光时间内,干涉条纹相对于光栅基底保持静止,即  $\varphi_e(t) = 0$  时,曝光量的相位误差  $\psi_e = 0$ 。否则,干涉条纹的相位移动将使曝光量产生一定的相位误差。若曝光时间  $T$  确定,且同一时刻任意  $(x, y)$  坐标处干涉条纹的相位变化相同,则  $\psi_e = \psi_e(T)$  为确定值。

以干涉条纹发生低频线性漂移为例,不考虑其对曝光对比度的影响,根据(4)式,曝光量相位误差  $\psi_e = \Phi_l/2$ ,即曝光量相位将与初始的干涉条纹相位相差  $\Phi_l/2$ ,假设光刻胶特性仅由  $D_c$  决定,曝光后形成的潜像光栅将与原始干涉条纹相差  $(\Phi_l p)/(4\pi)$  的距离。由于光栅刻线相对位置的整体变化并不影响光栅的衍射特性,则干涉条纹相位变化造成的曝光量相位误差可以不予考虑。

### 5 结 论

在平面全息光栅曝光过程中,干涉条纹的低频漂移会造成曝光对比度下降,其对曝光对比度的影响可以用相位变化量的均方根值来衡量,当  $\varphi_{e,RMS}/(2\pi) < 0.05$  时,曝光对比度可以达到 0.95 以上,小幅值高频相位振动对曝光对比度和光栅掩模槽形的影响较小。干涉条纹低频漂移会导致光栅槽形的可控性降低,合理选择光刻胶的感光上限和平均曝光量可降低这种影响,干涉条纹相位变化造成的曝光量相位误差并不影响光栅的衍射特性,在全息光栅曝光过程中应重点降低干涉条纹低频漂移的影响。

#### 参 考 文 献

[1] GRAHAM S. Practical holography [M]. 3rd ed. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 2004: 248-249.

- [2] QIAN G L, LI C M, CHEN X R. Error analysis of holographic mosaic gratings[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6):481-485 (in Chinese).
- [3] LIU H X, ZHANG W, GONG Y. Progress in grating parameter measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2):103-109 (in Chinese).
- [4] YOUNG P P, PRIAMBODO P S, MALDONADO T A, *et al.* Simple interferometric fringe stabilization by charge-coupled-device-based feedback control[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(19):4563-4566.
- [5] YU J, YANG Q M, SHI J H, *et al.* A method to stabilize interference fringe in taking a reflecting hologram[J]. *Laser Journal*, 2002, 23(6):42-43 (in Chinese).
- [6] SONG Y, BAYANHESHIG, QI X D, *et al.* Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2):318-324 (in Chinese).
- [7] GAO L, LIN H, ZENG L J. A close-loop feedback system used for improving the stability of interference fringes[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(1):23-25 (in Chinese).
- [8] QIAN G L, LI C M, YIN Q Y, *et al.* Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):648-650 (in Chinese).
- [9] YANG Q M, ZHANG W B, ZHONG L Y, *et al.* The influence of external vibration for making hologram and the locking of interference fringe[J]. *Laser Journal*, 1999, 20(3):36-38 (in Chinese).
- [10] YAO Q J. *Optics tutorial*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002:35-37 (in Chinese).
- [11] YAO T R, JIANG T H. *Digital signal processing*[M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1999:160-161 (in Chinese).
- [12] HAN J. The research on the lithography system and the grating mask profile evolution and controlling in the fabrication of the holographic grating[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012:92-95 (in Chinese).