

# 平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法

韩 建<sup>1,2</sup> 巴音贺希格<sup>1</sup> 李文昊<sup>1</sup> 孔 鹏<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 刻线密度准确与否直接影响光栅色散及给定波长的衍射方向,进而影响光谱仪器结构设计。为了提高全息光栅刻线密度的制作精度,提出了平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法。将给定刻线密度的基准光栅放在干涉场曝光区域内,调节光束干涉角,干涉场曝光光束经基准光栅衍射后,根据调整光栅刻线密度的不同选择不同的衍射级次相互叠加形成莫尔条纹,以基准光栅刻线密度的倍数来确定待制作光栅的刻线密度。理论证明了基准光栅周期与光栅像周期之间存在倍数关系,指出了基准光栅刻线密度选择在倍频式调整方法中的等效规则,分析了基准光栅宽度不同对光栅刻线密度制作精度的影响。计算结果表明,当基准光栅宽度达到 100 mm 时,制作 300 line/mm 光栅其刻线密度误差小于 1 nm,刻线密度越大误差越小,故以基准光栅的刻线密度来确定待制作全息光栅刻线密度的倍频式调整方法能够满足全息光栅的制作要求。

**关键词** 衍射与光栅;刻线密度;莫尔条纹;调整误差

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1005003

## Method of Adjusting the Groove Density Spatial Frequency Multiplication of Plane Holographic Grating

Han Jian<sup>1,2</sup> Bayanheshig<sup>1</sup> Li Wenhao<sup>1</sup> Kong Peng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The precision of the groove density influence the dispersion and the diffraction of gratings and the configuration of the spectrograph. In order to improve the precision of the groove density of the plane holographic gratings, a method of adjusting the groove density spatial frequency multiplication of plane holographic grating is proposed. A reference grating with a specific groove density is set in the exposure area. Adjusting the interference angle, different orders of the two diffraction wavefronts match and form Moiré pattern at the screen in a special orientation. The groove density multiple of the reference gratings can be obtained. The relation between the period of the reference grating and the interference fringe pattern is proved in theory. The equation regulation of the reference grating for groove density alignment is pointed out. The precision relation between the groove density of the interference fringe pattern and the width of the reference grating is also analyzed. The results indicate that the precision of the groove density of adjusting is less than 1 nm at the 100 mm width of the reference grating for 300 line/mm groove density alignment; the error decreases with increasing the width of the reference grating. The method of adjusting the groove density spatial frequency multiplication of plane holographic grating based on the groove density of the reference grating satisfies the fabrication requirement.

**Key words** diffraction and gratings; groove density; Moiré pattern; alignment error

**OCIS codes** 050.1960; 110.2650

收稿日期: 2011-03-24; 收到修改稿日期: 2011-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02)和吉林省科技发展计划项目(20070523 和 20086013)资助课题。

作者简介: 韩 建(1984—),男,博士研究生,主要从事平面全息光栅分波前曝光系统等方面的研究。

E-mail: hanjian523@163.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—),男,博士,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术和光谱技术等方面的研究。

E-mail: bayin888@sina.com

## 1 引 言

光栅刻线密度,即光栅每毫米内的刻线数,是衍射光栅非常重要的技术指标,它决定光栅的色散率和分辨率<sup>[1]</sup>。对光谱仪器而言,光栅刻线密度的变化必然引起光栅衍射角的改变,导致光谱仪器谱线位置偏移。因此,光栅刻线密度的准确性直接影响光谱仪器的波长精度,在制作过程中必须给予严格控制。

全息光栅的刻线密度唯一取决于两束干涉光夹角,其制作精度取决于干涉光夹角的定位精度。常规检测刻线密度的方法是完成光栅制作后,测量光栅0级和-1级衍射光的夹角以计算光栅刻线密度,经过多次光路调整,以期达到确定的夹角<sup>[2]</sup>。国外通过使用与待制作刻线密度相同的光栅作为基准光栅,测量曝光光束0级和-1级衍射光在CCD接收器上叠加形成莫尔条纹的相位差实时调整干涉光夹角,确保待制作光栅的刻线密度与基准光栅相同<sup>[3,4]</sup>。国内在1989年理论分析了莫尔条纹的周期和方向与光束干涉条纹周期的对应关系,提出利用莫尔条纹位移放大作用,精确调整平面全息光栅的刻线密度<sup>[5]</sup>。在平面全息光栅曝光系统(如洛艾镜系统<sup>[6]</sup>,双反射镜曝光系统<sup>[7]</sup>)中,使用右光束1级和左光束-2级干涉形成的莫尔条纹法调整光栅刻线密度,并对干涉条纹的定位精度和稳定性进行讨论。采用上述方法确定全息光栅刻线密度时,需要一个和待制作光栅刻线密度相同的基准光栅进行光学系统的调整。由于光栅刻划机的分度精度很高,因而刻划光栅的刻线密度较为准确,可以作为基准光栅的首选。但是,制作高刻线密度全息光栅仍然面临两个问题需要解决:1)以刻划方式制作面积较大的高刻线密度基准光栅不容易;2)在高刻线密度光栅曝光光路调整时(如调整刻线密度大于1800 line/mm的光栅曝光光路,采用413.4 nm激光器干涉曝光),由于右光束只有0级衍射级次,因此需要在调整光路中加入半反透镜将莫尔条纹引出,调整过程略显繁琐。

本文旨在降低高刻线密度光栅曝光光路调整难度,综合不同形式曝光光路<sup>[8~15]</sup>,提出平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法,即以低刻线密度基准光栅调整高刻线密度全息光栅曝光光路,避免了基准光栅刻线密度和待制作光栅刻线密度相同的限制,同时根据不同衍射级次叠加时干涉条纹周期和基准光栅周期的关系,推导了莫尔条纹的相位表达式,并对使用该方法调整的光栅刻线密度进行精度分析。该方法的意义在于以低刻线密度基准光栅调整曝光光路干涉条纹刻线密度,结构简单,易于操作,同时还能保

证待制作全息光栅刻线密度的调整精度。

## 2 精确调整全息光栅刻线密度的基本原理

### 2.1 平面全息光栅刻线密度的倍频式调整原理

在曝光光路中,当两束平行光以与基底法线成 $\theta$ 角度方向对称入射时,曝光光束在光栅基底表面处互相干涉形成光栅像,即干涉条纹。当在干涉场曝光区域内放置一个基准光栅时,曝光光束经基准光栅衍射后,根据光栅方程计算知,左光束 $-(n+m)$ 级衍射光和右光束 $m$ 级衍射光在基底外某一方重合,相互干涉也形成莫尔条纹,其中 $n$ 为基准光栅和曝光光束干涉条纹周期比值。

假设 $d_0$ 为基准光栅的周期, $d$ 为光栅像干涉条纹的周期, $m$ 为光束衍射级次, $\theta_0$ 为光束入射角, $d_x$ 为沿 $x$ 方向上的光栅周期, $k$ 为入射光束空间波矢的模, $k_{xd}$ 为光栅衍射光束空间波矢在 $x$ 方向的投影,其表达式<sup>[9]</sup>为

$$k_{xd} = \frac{2\pi m}{d_x} + k \sin \theta_0, \quad (1)$$

左光路 $-(n+m)$ 级和右光路 $m$ 级衍射波矢量在 $x$ 方向的投影分别为

$$k_{xdL}^{-(n+m)} = k \sin \theta_1 - \frac{2\pi}{d_0}(n+m), \quad (2)$$

$$k_{xdR}^m = k \sin \theta_2 + \frac{2\pi}{d_0}m, \quad (3)$$

当左右两光路衍射级次相互重合时,满足

$$k_{xdR}^m = -k_{xdL}^{-(n+m)}, \quad (4)$$

结合(2)~(4)式可表示为

$$k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) = \frac{2\pi n}{d_0}, \quad (5)$$

根据光束干涉条纹周期 $d = \lambda/(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$ 知

$$k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) = \frac{2\pi}{d}, \quad (6)$$

结合(5),(6)式,当衍射光束干涉形成莫尔条纹时

$$d = d_0/n. \quad (7)$$

因此,曝光光路中左右光束经基准光栅衍射后不同衍射级次互相重合,在接收屏上形成莫尔条纹时,光栅干涉条纹周期是基准光栅周期的 $1/n$ 。因此可根据此原理调节光栅像干涉条纹的刻线密度,具体过程是:首先在干涉场曝光区域内放置一个低刻线密度的基准光栅;再调整光束干涉角,使曝光光束经基准光栅衍射后,两束衍射光在衍射方向的接收屏上叠加,形成莫尔条纹,具体的光束衍射级次根据待制作光栅的刻线密度确定;最后调节接收屏上莫尔条纹宽

度和方向,提高刻线密度的调整精度,以基准光栅刻线密度的倍数来确定待制作全息光栅的刻线密度。

## 2.2 莫尔条纹的形成及相位表达式

为了分析不同衍射级次重合,莫尔条纹的形成及物理意义,建立坐标系如图 1 所示,衍射发生在光栅  $x$  方向,左光束  $-(n+m)$  级衍射波光强分布为

$$E_L = A_L \exp[-ik_{xL}^{-(n+m)} x] \exp(ikz \cos \theta), \quad (8)$$

式中  $A_L$  为  $E_L$  的振幅,右光束  $m$  级衍射波光强分布为

$$E_R = A_R \exp(ik_{xR}^m x) \exp(ikz \cos \theta), \quad (9)$$

式中  $A_R$  为  $E_R$  的振幅。在忽略振幅不同的条件下,结合(2),(3)式,当两束光重合相互干涉,莫尔条纹相位为

$$\Phi(x) = [k_{xR}^m + k_{xL}^{-(n+m)}]x = \left(\frac{2\pi}{d} - \frac{2\pi n}{d_0}\right)x. \quad (10)$$

分析(10)式知,  $d_0/n$  为待制作光栅的标准周期,  $d$  为光路调整周期,莫尔条纹反映了光栅刻线密度的调节误差,而与衍射级次  $m$  没有关系,因此通过检

测任意方向的莫尔条纹都可实现调整光栅刻线密度的目的。在刻线密度的调整过程中,当莫尔条纹方向竖直时,莫尔条纹周期  $D$  表示为

$$D = \frac{dd_0/n}{|d_0/n - d|}, \quad (11)$$

当待制作光栅的调整刻线密度与标准光栅刻线密度相同时,莫尔条纹周期是无穷大,但由于实验环境、基准光栅尺寸等条件的限制,使得光栅刻线密度存在调节误差。假设光栅像干涉条纹周期为  $d = \frac{d_0}{n} + \Delta$ , 结合(11)式,调节误差为

$$\Delta = \frac{(d_0/n)^2}{D - d_0/n}, \quad (12)$$

相对周期误差为

$$\frac{n\Delta}{d_0} = \frac{d_0/n}{D - d_0/n}. \quad (13)$$

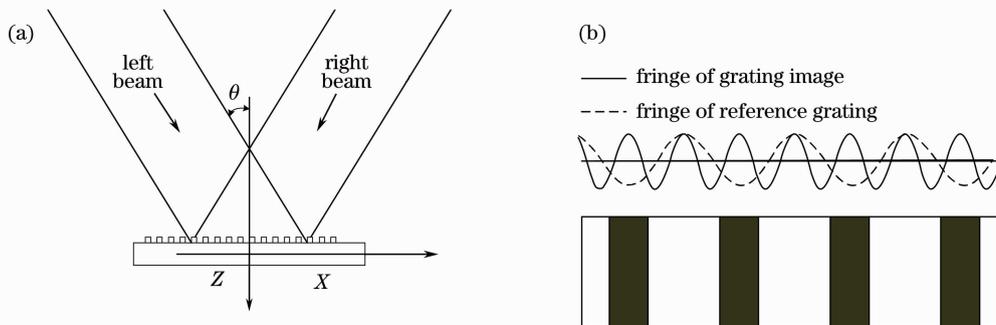


图 1 莫尔条纹形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Moiré pattern present at the grating's surface

由(13)式知,莫尔条纹周期调节误差是产生光栅刻线密度调节误差的主要原因。如果莫尔条纹周期相同,不同刻线密度基准光栅都可达到相同的调整精度,即基准光栅的刻线密度选择不影响待制作光栅刻线密度的调整精度,不妨称之为平面全息光栅刻线密度倍频式调整方法的等效规则。因此刻线密度倍频式调整方法对基准光栅刻线密度的选择有更多的自由度,克服了调整高刻线密度曝光光路时高刻线密度基准光栅的制作困难问题。但是,从(13)式可以看出,莫尔条纹周期调节误差  $\Delta$  与莫尔条纹周期  $D$  有关,即与基准光栅宽度有关。

## 3 光栅刻线密度的倍频式调整方法调整精分析

### 3.1 基准光栅刻线密度对曝光光路调整结构的影响

根据等效规则,不同刻线密度基准光栅的使用不影响曝光光路的调整精度。由于低刻线密度的刻划光

栅制作容易,选其作为基准光栅调整光路较为经济。但刻线密度的不同使得莫尔条纹衍射方向发生变化,从而影响光路的调整结构。以调整 3600 line/mm 光栅光路为例,分析基准光栅刻线密度的不同对光路结构的影响,结果如表 1 所示。

表 1 中  $\sin \theta_m$  为莫尔条纹的衍射方向。分析可知,如果使用 3600 line/mm 的基准光栅调整曝光光路,莫尔条纹衍射方向只有一个,并且与曝光光路的左路入射光方向重合。若根据以往的调整方法<sup>[5,6]</sup>,在光栅刻线密度的调整结构中,必须引入一个半反半透镜,使莫尔条纹的衍射方向发生改变,才能观察到莫尔条纹,如图 2(a)所示。其缺点有 3:1)半反半透镜质量要好,以保证在光路方向的莫尔条纹中不会引入相位差,影响刻线密度的精确调整;2)由于经过半反半透镜的光束存在能量损失,莫尔条纹的清晰度会降低;3)整个光路调整较为复杂,稳定性要求高。

表 1 不同基准光栅调整 3600 line/mm 曝光光路莫尔条纹方向比较

Table 1 Comparison orders of Moiré pattern for different reference grating for adjusting 3600 line/mm exposure light path

Reference grating	3600 line/mm	600 line/mm		300 line/mm		
$n$	1	6		12		
Orders of the left beam	-1	-7	-6	-14	-13	-12
Orders of the right beam	0	1	0	2	1	0
$\sin \theta_m$	0.74358	0.99144	0.74358	0.99144	0.86751	0.74358

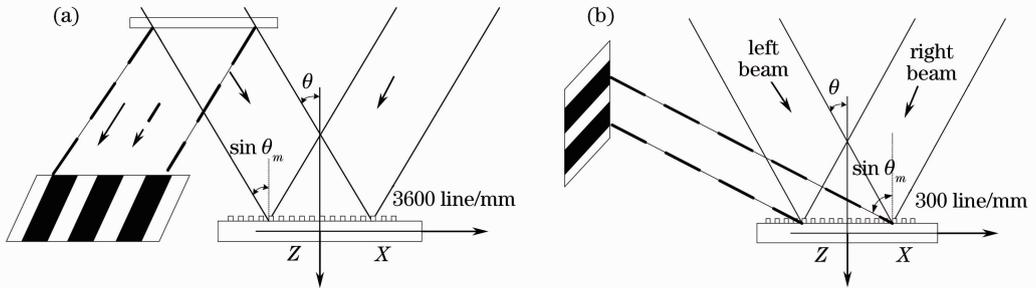


图 2 不同基准光栅调整结构比较

Fig. 2 Structure comparison of different reference gratings

如果使用平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法,使用低刻线密度基准光栅的高衍射级次调整曝光光路,如图 2(b)所示,由于曝光光束经基准光栅衍射后莫尔条纹的衍射方向偏离曝光光路入射方向,避免了光路中半反半透镜的使用,为条纹的检测提供了多种方向选择性,极大地简化了调整结构。

### 3.2 基准光栅宽度对光栅刻线密度的影响

曝光光束经基准光栅衍射后,根据接收屏上莫尔条纹的宽度和方向,可以调整待制作光栅的刻线密度。如果将接收屏与光栅莫尔条纹衍射方向垂直放置,如图 3 所示,图中  $\sin \theta_m = \sin \theta_0 + m\lambda/d_0$ , 则接收屏上条纹周期  $D'$ 和理论条纹周期关系为

$$D' = D \sqrt{1 - \left( \sin \theta_0 + \frac{m\lambda}{d_0} \right)^2}, \quad (14)$$

式中  $m$  为选定衍射级次,  $d_0$  为基准光栅周期,  $\theta_0$  为光束入射角。根据(11)式,莫尔条纹周期无穷大时,待制作光栅刻线密度调节误差最小。因此在光路调节过程中,应调整莫尔条纹的周期接近最大,根据(14)式,此时莫尔条纹的最大周期是基准光栅宽度的投影,并由(13)式知,基准光栅宽度将影响待制作光栅刻线密度的精度。图 4 考察了光栅刻线密度分别为 300, 600 和 1200 line/mm 的曝光光路周期相对误差  $\Delta/d$  随基准光栅宽度  $L_0$  的变化关系。

由图 4 可知,待制作光栅刻线密度相对误差随着基准光栅宽度增加而逐渐减小;对于相同宽度基准光栅而言,低刻线密度光栅引起的相对周期调节误差较大。因此,以宽度较大的光栅作为基准光栅,可提高

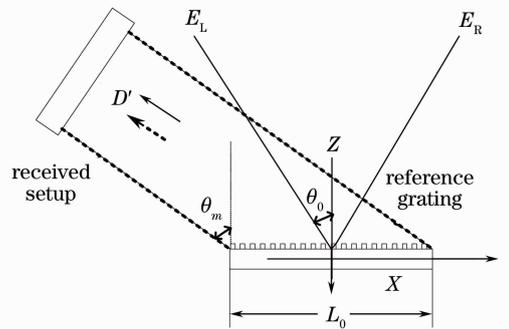


图 3 莫尔条纹的观察装置

Fig. 3 Observation setup of the Moiré pattern

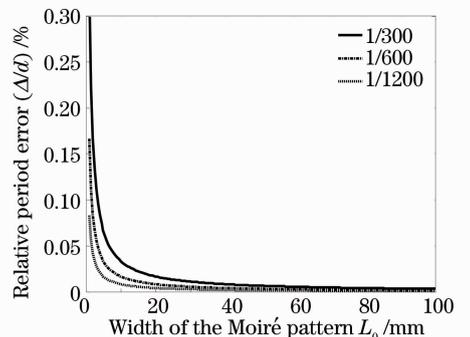


图 4 由基准光栅宽度  $L_0$  引起的相对周期误差  $\Delta/d$

Fig. 4 Relative error  $\Delta/d$  caused by the width of reference grating  $L_0$

光栅刻线密度的调节精度。以制作 1200 line/mm 全息光栅为例,说明基准光栅宽度对光栅周调整精度的影响,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同基准光栅宽度对待制作光栅刻线密度的影响(1200 line/mm)

Table 2 Error analysis for different reference gratings to make 1200 line/mm grating

Width of reference grating /mm	Groove density / (line/mm)	Period error /nm	Relative error /%
20	1200.05	0.0347	0.00416
80	1200.0125	0.00868	0.00104
100	1200.01	0.00694	0.00083

## 4 实验结果及分析

图 5 为以刻线密度 1200 line/mm(光栅周期为 0.83333 μm)的基准光栅调整的平面全息光栅莫尔



图 5 刻线密度调整中不同调整误差时莫尔条纹图

Fig. 5 Moiré pattern of different groove density alignment errors

## 5 结 论

为了提高全息光栅刻线密度的制作精度,提出了平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法,即将低刻线密度刻划光栅作为基准光栅调整高刻线密度光栅曝光光路的方法,其精度可小于1 nm。这种方法的优势:1)高精度低刻线密度基准光栅容易通过刻划方式制作,克服了高刻线密度基准光栅制作的困难,增加了基准光栅选择的自由度;2)使用低刻线密度基准光栅时,莫尔条纹衍射级次增多,检测方便,简化了高刻线密度光栅曝光光路的调整结构;3)低刻线密度基准光栅容易制作成大面积,便于通过增大莫尔条纹的周期可调范围提高全息光栅刻线密度的调整精度。

### 参 考 文 献

1 Zhu Shaoji, Zou Haixing, Bao Xuecheng *et al.*. Diffraction Gratings[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. 39~47  
祝绍箕, 邹海兴, 包学诚 等. 衍射光栅[M]. 北京:机械工业出版社, 1986. 39~47

条纹照片。表 3 列出不同莫尔条纹周期时全息光栅的刻线密度调整误差,使用的基准光栅宽度为 80 mm。此结果说明,本文给出的光栅刻线密度确定方法其精度足够高,满足平面全息光栅制作要求。

表 3 不同莫尔条纹周期对制作 1200 line/mm 刻线密度光栅时的调整误差比较

Table 3 Comparison of the relative period error for different Moiré pattern to make 1200 line/mm grating

Fig. 5	(a)	(b)	(c)
Periods of Moiré pattern /mm	10	20	80
Adjusted periods /μm	0.833403	0.83337	0.83334
Relative errors /%	0.00833	0.00417	0.00104

2 Bayanheshig. The Study on the Dispersion Theory, Design, Manufacture, and Efficiency Test of Diffraction Gratings[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. 126~132  
巴音贺希格. 衍射光栅色散理论与光栅设计、制作和检验方法研究[D]. 中国科学院研究生院, 2004. 126~132  
3 C. G. Chen, P. T. Konkola, R. K. Heilmann *et al.*. Image metrology and system controls for scanning beam interference lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2001, **19**(6): 2335~2341  
4 M. L. Schattenburg, H. I. Smith. The critical role of metrology in nanotechnology [C]. *SPIE*, 2001, **4608**: 116~124  
5 Yang Houmin. A new method for accurate determining the grooves of the plane holographic grating (PHG) during manufacturing[J]. *Opt. Mechanism*, 1989, (5): 1~6  
杨厚民. 平面全息光栅制作过程中精确判断线槽的新方法[J]. *光学机械*, 1989, (5): 1~6  
6 Zhu Shaoji. A new device for manufacturing holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(2): 189~192  
祝绍箕. 制作全息光栅的新装置[J]. *光学学报*, 1990, **10**(2): 189~192  
7 Bayanheshig, Qin Xiangdong, Li Yinghai *et al.*. A technology for accurate controlling the grooves of the plane holographic grating during adjusting system[P]. China Patent: ZL 2003 1 0115844. 2  
巴音贺希格, 齐向东, 李英海 等. 一种平面全息光栅制作中精确控制刻线密度的方法[P]. 专利号:ZL 2003 1 0115844. 2  
8 Yu Meiwen. Optical Holography and its Applications [M].

- Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 402~407  
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 402~407
- 9 J. Ferrera. Nanometer-Scale Placement in Electron-Beam Lithography[D]. PhD dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, June 2000
- 10 Bayanheshig, Shao Xianxiou, Cui Jicheng *et al.*. The off-axis parabolic/Lloyd's mirror interferometric system for manufacturing plane holographic gratings[J]. *Opt. Precision Engineering*, 2011, **19**(1): 56~63  
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
- 11 Qian Guolin, Li Chaoming, Wu Jianhong *et al.*. Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(6): 648~650  
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
- 12 Hu Hanhui, Liao Zhaoshu. An approach to the moiré fringe with double frequency grating[J]. *Huazhong Univ. Sci. & Tech.* (*Nature Science Edition*), 2005, **33**(3): 72~74  
胡汉辉, 廖兆曙. 倍频光栅的莫尔条纹研究[J]. *华中科技大学学报*, 2005, **33**(3): 72~74
- 13 Li Chaoming, Wu Jianhong, Chen Xinrong *et al.*. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression masaic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1943~1946  
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
- 14 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *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  
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
- 15 Meng Xiangfeng, Li Lifeng. Methods for increasing sidewall steepness of reactive-ion-beam etched, sub-micrometer-period gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 189~193  
孟祥峰, 李立峰. 提高离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 189~193