

扫描干涉场曝光中关键技术的现状与发展趋势

程伟林^{1,2} 朱菁^{1,2} 张运波¹ 曾爱军^{1,2} 黄惠杰¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 扫描干涉场曝光(SBIL)在制作大尺寸、纳米精度的衍射光栅中有着独特的优势。为了充分了解SBIL系统的技术特点,介绍了国内外SBIL技术的发展现状,并针对SBIL系统中的各个关键技术进行技术性的调研与总结,着重分析了各关键技术已有解决方法的基本原理、优点以及存在的局限性,结合具体的光栅应用要求,给出了各关键技术的相应具体指标,展望了其发展趋势。

关键词 光栅; 扫描干涉场曝光; 衍射光栅; 大尺寸; 纳米精度

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.100001

Status and Development of Scanning Beam Interference Lithography System

Cheng Weilin^{1,2} Zhu Jing^{1,2} Zhang Yunbo¹ Zeng Aijun^{1,2} Huang Huijie¹

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract Scanning beam interference lithography (SBIL) is advantageous to produce large-area linear diffraction gratings that are phase-accuracy to nanometer level. In order to comprehend the merits of SBIL, the research progress on SBIL both in China and abroad are introduced, and the key technologies in SBIL are summarized from the merits and limitation of the scheme and principle. And then for the application of the specific grating, parameters of the key technologies in SBIL are presented. The development of SBIL is forecasted.

Key words gratings; scanning beam interference lithography; diffraction gratings; large-area; nanometer level

OCIS codes 000.2190; 050.2770; 120.3940; 120.4880

1 引言

米级的大尺寸衍射光栅在某些科学技术领域起着至关重要的作用,如在惯性约束核聚变^[1-2]的高功率啁啾脉冲放大系统中^[3-5],为了降低对光栅损伤阈值的过高要求,需要米级尺寸的光栅^[6];在大口径天文望远镜以及红外太阳塔光谱仪中,为了提高分辨率、集光量和信噪比,需要亚米级甚至米级高质量衍射光栅^[7-8];在精密位移计量中,为了扩大测量范围,同样需要米级的二维光栅^[9]。

扫描干涉场曝光(SBIL)是由MIT空间纳米技术实验室的Schattenburg等^[10-14]研发并最终转入Plymouth grating laboratory (PGL)公司进行商业化应用,在制作大尺寸、高线性度的衍射光栅中有着独特的优势。其原理是利用两高斯光束通过小口径的光学系统,使光束的束腰在光栅基底上发生干涉,产生所需周期的干涉条纹,二维高精度的运动平台载着涂有光刻胶的光栅基底做二维步进扫描,并将干涉场的信息记录于光刻胶上,从而完成大面积的曝光。该方法类似激光直写技术^[15],所不同的是SBIL每次扫描后写出的是一组光栅条纹,因此其效率更高,同时在一定程度上保留了激光直写的灵活性;较之双光束全息曝光^[16-19],其波面控制容易得

收稿日期: 2015-04-09; 收到修改稿日期: 2015-05-08; 网络出版日期: 2015-09-02

基金项目: 国家国际科技合作项目(2011DFR10010)、国家科技重大专项课题(2011ZX02402)、上海市科技人才计划项目(14YF1406300)

作者简介: 程伟林(1986—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: jiping111@163.com

导师简介: 黄惠杰(1966—),男,博士,研究员,主要从事光散射测量技术、光学生物传感技术、光学检测技术和光学光刻技术等方面的研究。E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人)

多,并且干涉场质量更好,但其技术难点在于细光束扫描系统的精确控制以及高精度的测量系统。

本文介绍了国内外SBIL技术的发展现状,并针对SBIL中的技术难点,分析了各关键技术已有解决方法的基本原理、优点以及存在的局限性,结合大尺寸脉冲压缩光栅,给出了各关键技术的具体指标。

2 国外扫描干涉场曝光技术的发展状况

根据文献调查,目前国外从事SBIL技术研究的机构只有PGL公司,该公司在麻省理工学院(MIT)的“Nanoruler”原型机的基础上进行光学集成化改进^[20],形成了“Nanoruler II”系统装置,如图1所示。该装置目前最大能制作920 mm×600 mm的光栅^[21],其技术参数如下表所示。但该装置存在两点不足:1)无法制作米级的大尺寸光栅,如:(1300~1500) mm×600 mm;2)该装置不能方便快捷地改变所刻光栅的周期。对于第一点不足,其主要原因为无法提供米级行程、纳米定位精度的二维扫描平台,PGL正在尝试突破这一瓶颈;对于第二点不足,PGL应用变周期扫描干涉场曝光^[22](VP-SBIL)技术来解决这一问题,并已在多个周期(如:100,200,500,1000,1740,2500,5000 line/mm)下做过测试,其原理如下图所示,PSD为位置传感器,PZM

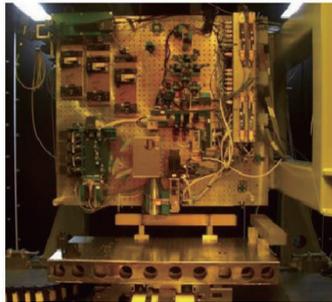


图1 “Nanoruler II”系统装置图

Fig.1 “Nanoruler II” system

表1 920 mm×600 mm 多层介质膜光栅的参数指标

Table 1 Parameter of 920 mm×600 mm multilayer coated dielectric (MLD) gratings

Parameter	Index
Active area	920 mm×600 mm
Spatial frequency /(line/mm)	1740
Grating type	MLD
Diffraction efficiency %	90~96
Wavefront distortion	< $\lambda/4$

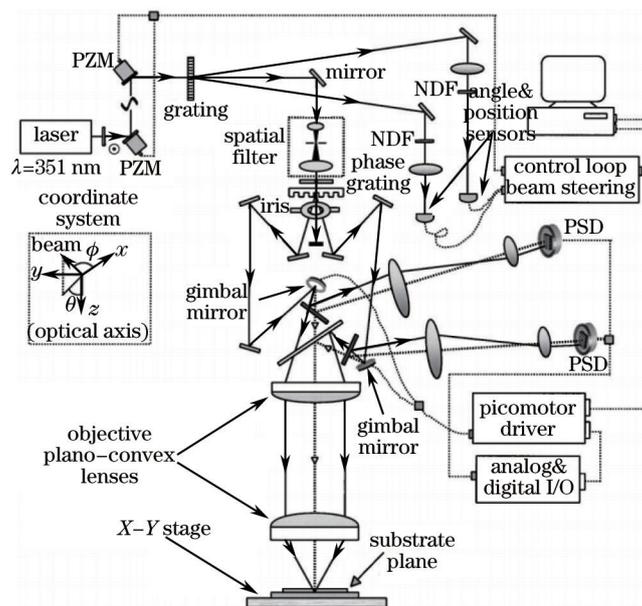


图2 变周期扫描干涉场曝光技术的原理图

Fig.2 Principle diagram of VP-SBIL

为压电驱动式反射镜, NDF为中性衰减片。该系统为 $4-f$ 光路, 两个二维快反镜位于物镜的前焦面, 光栅基板位于物镜的后焦面上, 通过调节快反镜改变两相干光束夹角, 从而改变干涉场的空间周期。

3 国内扫描干涉场曝光技术的发展状况

长期以来, 国内对扫描干涉场曝光技术的研究处于空白状态。从2010起, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所开始从事相关的研究, 其目标是研制1.5 m扫描干涉场曝光系统, 其原理方案与MIT的方案一样, 目前原理样机最大能制作 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的光栅^[23], 其结构如图3所示, 而1.5 m扫描干涉场曝光系统正在搭建中^[24-26]。



图3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的扫描干涉场曝光系统原理样机图

Fig.3 Prototype of SBIL by Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences

4 关键技术

SBIL是利用高精度的二维运动平台扫描与步进来完成大面积曝光, 其每一次曝光都是在动态过程中完成的, 因此该方法必须具备高精度扫描控制系统以及高精度的测量系统, 其技术难点包括: 光束对准、周期测量、波前测量、相位锁定以及二维运动平台等。

4.1 光束对准

光束对准是对光束的几何量进行调节, 其中主要包括光束角度对准和光束位置对准, 往往在实际中二者是耦合在一起的, 因此光束对准系统的难点在于将其解耦, 并准确地测量其偏差值。

在SBIL中, 为了获得较好的平面波以形成线性的干涉场, 其光束对准系统要实现两相干光束的束腰汇聚在光栅基底上形成干涉。Konkola等^[11,27]设计了一套光束对准系统, 其原理如图4所示。该文献建立了系统的数学模型, 并详细分析了PSD的安装误差对光束角度与位置的测量结果的影响。其分析结果表明角度与位置PSD的安装误差对其测量结果的影响可以忽略不计, 根据测量结果(如图5所示)可知, 光束位置偏差值约 $10\text{ }\mu\text{m}$, 光束角度偏差值约为 $2\text{ }\mu\text{rad}$ 。

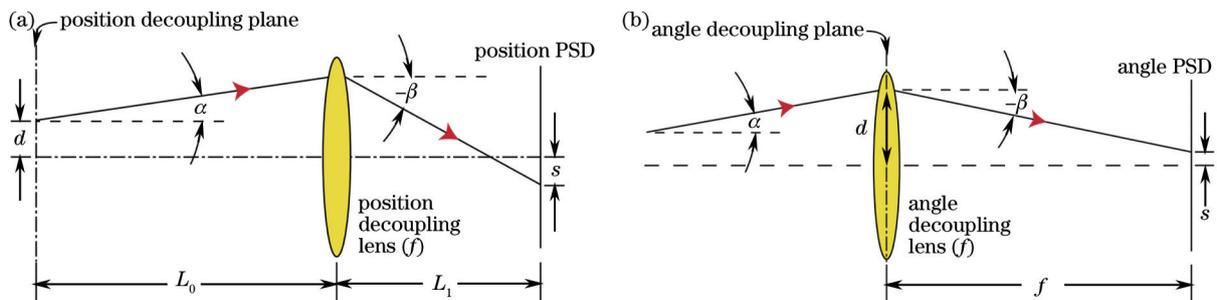


图4 光束对准系统原理图。(a) 位置解耦图; (b) 角度解耦图

Fig.4 Principle diagram of beam alignment. (a) Position decoupling topology; (b) angle decoupling topology

中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室的鲍建飞等^[28]利用相同的原理搭建了一套光束对准系统应用于光刻机照明系统中。该系统角度稳定性误差优于 $\pm 3\text{ }\mu\text{rad}$, 位置稳定性误差优于 $\pm 0.04\text{ mm}$ 。

从测试结果可以看出, 文献[28]中所述的光束对准精度明显低于文献[27]中所述的光束对准系统, 其主要原因是其调整对象不一样, 文献[27]所述系统的调整对象为 $\phi 2\text{ mm}$ 的圆形光束, 而文献[28]所述系统的调整对象为 $22\text{ mm}\times 22\text{ mm}$ 的光束, 其系统实现难度更大。

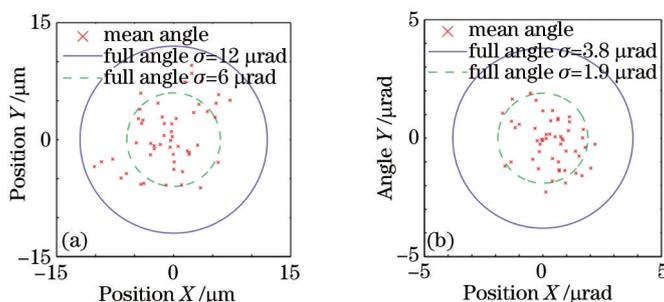


图5 测量结果。(a) 位置; (b) 角度

Fig.5 Beam alignment results. (a) Position; (b) angle

4.2 周期测量

为了制造大面积、高精度的光栅, SBIL需要步进干涉场条纹周期的整数倍, 然后进行扫描曝光, 因此原位的、纳米精度的周期控制与测量是减少周期拼接误差的首要条件。

测量干涉条纹周期最简单的方法是利用电荷耦合元件(CCD)采集后进行图像处理, 但是目前CCD的分辨率只有几个微米, 对于亚微米量级的条纹周期, 该方法不能满足测量要求。

Partlo等^[29]提出了一种将很窄的狭缝放置在点探测器前来测量干涉场的光强分布。随着所测干涉场的周期达到亚微米量级, 狭缝处的漏光非常严重, 并且将狭缝对准条纹方向变得非常的困难, 这些问题使得该方法很难应用于SBIL中的周期测量。

Chen等^[27]提出了一种利用分光镜的方法测量干涉场条纹周期, 其原理如图6所示。根据原理图可知, 分光镜将左右两相干光束分别汇聚到点探测器的感光表面上形成干涉, 并且该分光镜和点探测器均安装于同一个运动平台, 当运动平台沿着垂直于条纹方向运动距离 D , 两相干光束会产生光程变化, 从而干涉场会引入相应的相位移动, 通过计算点探测器输出的正弦信号可得到干涉条纹移动周期的个数 N , 最终通过:

$$p = D/N, \quad (1)$$

计算得到干涉场条纹周期 p , 根据测试结果图7可知其测量重复性为 2.8×10^{-6} (3σ)。

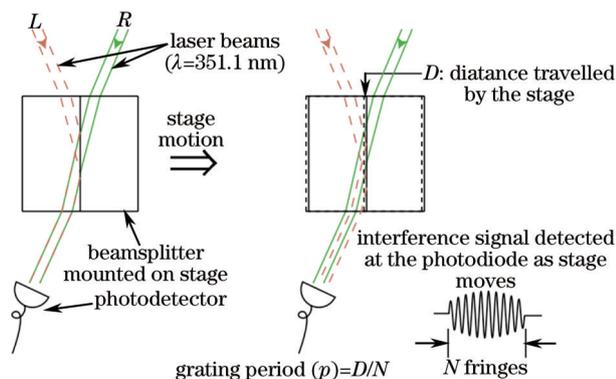


图6 利用分光镜测量周期的原理图

Fig.6 Beamsplitter period measurement scheme

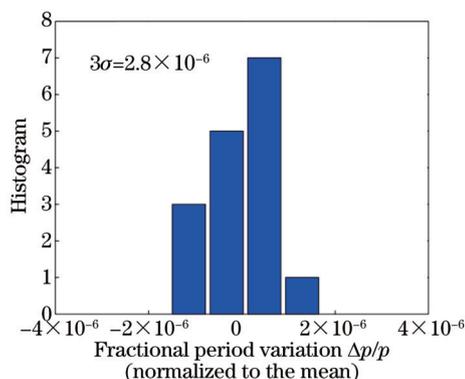


图7 利用分光镜测量周期的测试结果图

Fig.7 Experimental beamsplitter period measurement results

Chulmin Joo等^[30-31]提出了利用菲涅耳波带片(FZP)测量干涉场的条纹周期, 并通过同频干涉与外差干涉两种方式实现测量, 其原理如图8所示。该方法中的同频干涉方式是将安装于运动平台上的菲涅耳波带片置于两同频的相干光束的干涉平面内, 并用透镜将其衍射场的光强分布成像于点探测器的感光面上, 平台带动菲涅耳波带片移动 X_s , 通过计算点探测器输出的正弦信号可得到衍射场空间周期的个数 N , 最终通过公式:

$$p = X_s/N, \quad (2)$$

计算得到衍射场空间周期 p , 根据文献[31]的理论推导可知衍射场主要由两部分叠加组成: 1) 两相干光束的衍射光强分布; 2) 两相干光束衍射后重叠区域产生的叠栅干涉光强分布, 其中衍射后叠栅干涉场的空间周期与衍射前干涉场空间周期相等, 因此通过(2)式得到的 p 为所测干涉场的空间周期, 并且将菲涅耳波带片在整个干涉场内扫描, 可以获得整个干涉场的相位分布。其测量结果如表2所示, 其测量偏差值较大主要原

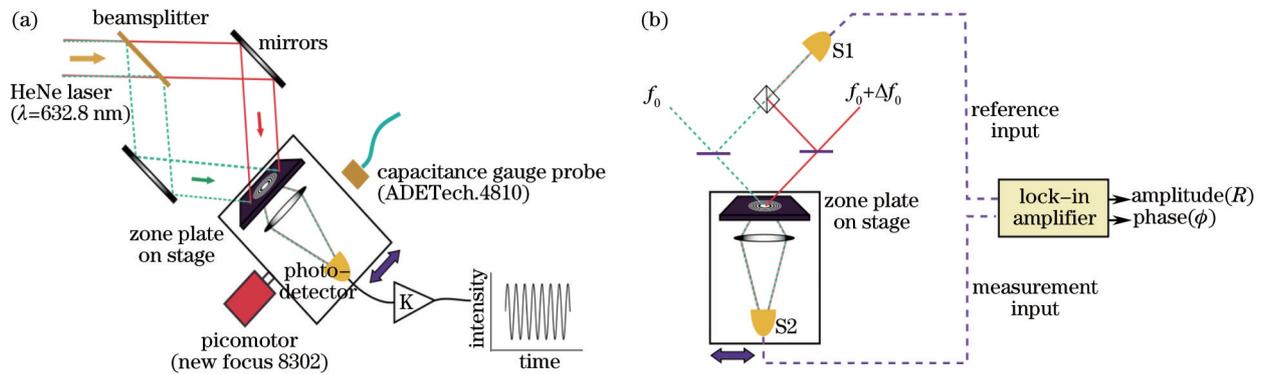


图8 菲涅耳波带片法测量干涉条纹周期的原理图。(a) 同频干涉测量; (b) 外差干涉测量

Fig.8 FZP period measurement scheme. (a) Homodyne period measurement; (b) heterodyne period measurement

因是驱动反射镜转台的转角精度较低,而环境振动、对准偏差、空气扰动以及无相位锁定等控制系统使得测量的重复性较低。

表2 同频干涉周期测量结果

Table 2 Experimental homodyne period measurement results

	Theory value /nm	Measurement value /nm	Repeatability /nm
$20^\circ \pm 1^\circ$	926 ± 44	911.8	1.1
$35^\circ \pm 1^\circ$	552 ± 14	541.1	0.9

与同频干涉相比,外差干涉中的两相干光束存在 Δf 的频率差,其产生的干涉条纹的相位已不再固定,而是以频率为 Δf 进行相位移。其周期 p 可以通过(3)式得到:

$$p = \left(\frac{1}{2\pi} \times \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^{-1}, \quad (3)$$

其测量结果如图9所示。根据(3)式计算得到 $p=403.789$ nm。其测量精度较之同频干涉测量方法有较大的提高。

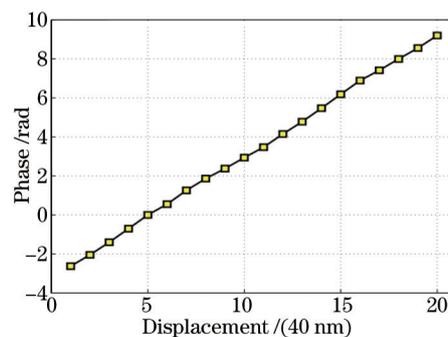


图9 外差干涉周期测量结果

Fig.9 Experimental heterodyne period measurement results

两种周期测量方案的对比结果如表3所示。根据上面的论述并结合表3的对比结果可知,利用分光镜进行周期测量的方法简单,测量重复性高,但是也有很多局限性,如:1) 分光镜各面的面形误差会导致两相干光束的波前畸变,因此各面的平行度要求达到十几微弧度;2) 如果系统改变干涉条纹的方向[如图10(a)所示],或者改变干涉条纹周期的大小[如图10(b)所示],都会使得左右两相干光束不在点探测器的感光面上汇聚发生干涉;3) 测量范围非常有限;4) 该测量方法没有考虑干涉条纹的非线性对测量的影响;相比之下,由于菲涅耳波带片的圆对称性,该方法仍然适用于图10所示的情况。然而该方法同样也具有一定的局限性:1) 周期测量的稳定性较之分光镜法有所降低;2) 菲涅耳波带片加工与装调都比较困难;3) 对于不同的干涉场条纹周期,其衍射后的叠栅条纹的对比度呈正弦分布,当对比度为零时,该测量方法将不适用;4) 衍射后叠栅干涉场的光强较之衍射前干涉场的光强有明显的减弱。

表3 周期测量方案的对比结果

Table 3 Comparison of period measurement methods

	Period measurement with beamsplitter	Period measurement with FZP
Measurement result (nominal period of 400 nm) /nm	401.246	403.789
Adaptability for period change	No	Yes
Adaptability for fringe orientation change	No	Yes
Requirement of beamsplitter	High	-
Requirement of FZP	-	High



图10 利用分光镜测量周期方法的局限性。(a) 条纹方向发生变化; (b) 条纹周期大小发生变化

Fig.10 Limitation of the beamsplitter scheme. (a) Rotating beams; (b) varying image period

4.3 波前测量

在SBIL系统中,两相干光束均为高斯光束,其束腰处为平面波,为了获得较好的线性干涉场,因此必须检测光束的波前误差,以实现两束相干光的束腰在光栅基板表面汇聚干涉,最大限度地减小干涉场的非线性相位误差。

波前测量的方法有很多,主要包括非干涉法与干涉法,其中非干涉法包括哈特曼-夏克波前传感器法^[32],曲率波前传感器法^[33];干涉法包括剪切干涉测量法^[34-35],点衍射干涉法^[36]等。这些波前检测方法的特点如表4所示。

根据表4可知,哈特曼-夏克波前传感器法与曲率波前传感器法在测量中不用引入标准的参考波前,但其空间分辨率低,并对波前畸变较小的中高频波前畸变测试困难,而剪切干涉测量法与点衍射干涉法测量精度很高,并且也不需引入标准的参考波前,但剪切干涉测量法的波面重构比较复杂,而点衍射干涉法对环境要求非常高。

表4 波前检测方法的对比结果

Table 4 Comparison of wavefront measurement methods

	Hartmann-Shack wavefront sensor	Curvature wavefront sensor	Shear interference	Point diffraction interference
Resolution	Low	Low	High	High
Reference wavefront	No	No	No	No
Real-time measurement	Yes	No	No	Yes
Requirement of environment	Low	Low	Low	High

对于SBIL系统需要实时检测两干涉平面光束的波前畸变,其检测精度要求非常高,而点衍射干涉法是将极小孔径衍射后的球面波作为参考波面,将其应用在SBIL中就必须将平面波转换成球面波,这样大大增加了系统的复杂程度,并且检测精度也无法保证。综上所述,现有的波前检测方法无法应用在SBIL系统中。

基于此,Chen^[27]提出了一种利用叠栅条纹法测量由两平面波的波前误差引起干涉场的非线性相位误差,其原理如图11所示。该方法中用到一个高精密的反射式光栅,其空间周期与两相干光束的干涉场的空间周期相近,并具有近似理想的线性相位分布,且在利特罗条件下使用,即左右两边光束的-1级衍射光束会沿原路返回。因此左边光束的零级衍射光束与右边光束的-1级衍射光束经半反半透的分光板反射后发生干涉,其干涉图像被CCD接收,通过相位提取与相位解包裹可以得到两相干光束干涉场的非线性相位误差。测量结果(图12)显示其波前相位偏差值约为12 nm。

该方法利用一个近似理想的线性相位分布的反射式光栅来标示两理想的平面波,大大降低了该问题的

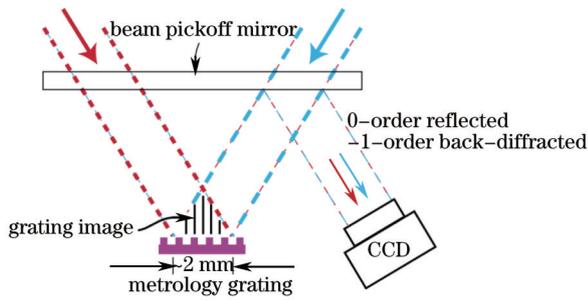


图 11 叠栅条纹法波前测量原理图

Fig.11 Moiré interferometry wavefront measurement scheme

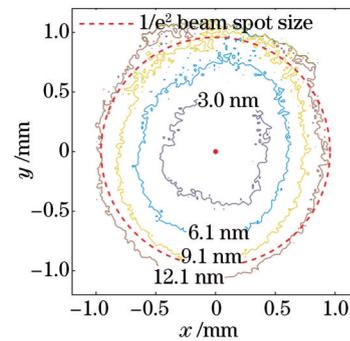


图 12 波前测量的结果

Fig.12 Moiré interferometry wavefront measurement results

工程难度,与此同时要求光栅的空间周期与两相干光束的干涉场的空间周期相近,这样极大地限制了该方法的应用范围。

4.4 相位锁定

SBIL是通过扫描与步进来完成大面积曝光,其每一次曝光都是在动态过程中完成的,运动带来的光学器件振动、空气流动以及温度波动等都会导致干涉条纹相对于光栅基底发生相位移动,造成曝光的对比度下降,严重影响了所制作光栅的质量。

常用的相位锁定技术分为静态相位锁定技术与动态相位锁定技术,其中静态相位锁定技术是伴随着全息技术产生的^[37-39],国内外研究较多,技术积累也比较完善,并有成熟的商业产品,如:美国马萨诸塞州的Odhner全息技术公司提供集成化的小型干涉条纹锁定装置Stabilock II,其相位锁定精度可以达到 $\pm p/20$ ^[40]。而动态相位锁定技术最主要的应用是SBIL技术,其目的是将干涉场锁定在运动的平台上,即调整干涉条纹相位以补偿工作台非理想运动造成的相位误差。

不管是静态相位锁定技术还是动态相位锁定技术,都是利用光电探测元件探测出干涉场的相位移动量,并通过放置在光路中的移相装置调整其相位差,从而使干涉场的相位恒定。其中有两个关键点:1)光路中的移相装置;2)干涉场相位移动量的测量。光路中常用的移相装置有电光调制器(OEM)、压电陶瓷(PZT)驱动反射镜以及声光调制器(AOM)。其性能对比如表5所示。

根据表5可知,AOM具备更快的调整速度和无限周期的相位调整范围,更具应用前景。干涉场的相位移动量的测量主要有同频干涉测量与外差干涉测量,其中外差干涉测量具有更好的信噪比、更高的测量灵敏度。

表5 移相装置的性能对比

Table 5 Comparison of performance among phase-shifting equipments

	OEM	PZT	AOM
Adjustment range	2π	$2n\pi$ (finite)	$2n\pi$ (infinite)
Response speed	Slow	Slow	Quick
Nonlinearity error	No	Yes	No

因为SBIL系统对相位稳定性要求非常高,Heilmann等^[41]设计了一种基于外差干涉相位锁定系统,该系统采用AOM移相,大大提高了系统的响应频率,其原理如图13所示。该文献不仅对所设计的条纹锁定系统进行了测试,还与PZT移相式相位锁定系统作了对比测试,其测试结果(图14)显示常用的相位锁定系统能控制相位稳定在 $\pm p/20$ 内,而外差干涉相位锁定系统可以将相位稳定在 $\pm p/60$ 内,但是所设计的系统并没有考虑平台的运动,即干涉场的相位是相对于静止的光栅基板而非运动的光栅基板。在此基础上,Konkola等^[42]将干涉场的相位锁定于运动平台,其相位锁定误差为 $\pm p/200$ 。宋莹等^[23,26]基于相同的原理设计一套相位锁定系统,其静态的相位锁定误差为 $\pm p/100$,而动态的相位锁定误差为 $\pm p/60$ 。

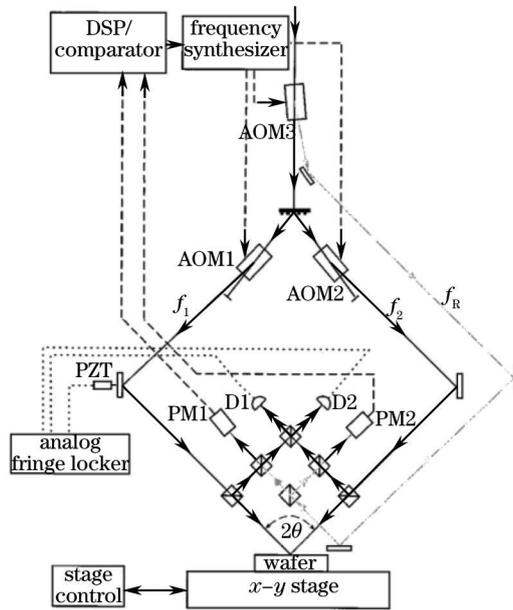


图13 外差干涉条纹控制系统的原理图

Fig.13 Schematic of the digital heterodyne fringe locking system

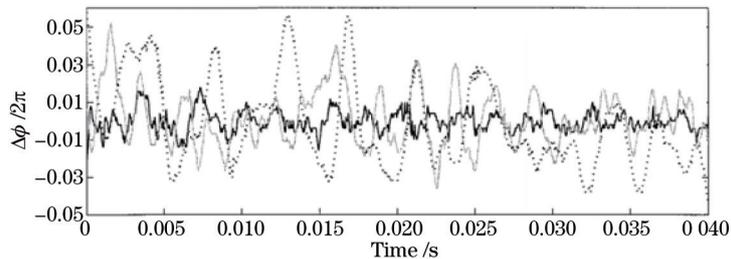


图14 相位波动对比测试结果。没有相位锁定系统(点画线), PZT移相式相位锁定系统(灰色线), 外差干涉相位锁定系统(黑实线)

Fig.14 Results of the comparison of typical fringe locker system. Without locker system (dotted line), with the analog fringe locker by PZT (gray line), and with the digital heterodyne fringe locker (solid black line) over 40 ms

4.5 二维运动平台

二维运动平台在SBIL系统中起着至关重要的作用。其运动方式分为两种^[43-44]: 1) 平行扫描方式, 即垂直于条纹方向做步进运动, 平行于条纹方向做扫描运动; 2) 多普勒扫描方式, 即垂直于条纹方向做扫描运动, 平行于条纹方向做步进运动, 其示意图如图15所示。对于制作米级的高密度光栅的SBIL系统, 其二维运动平台的行程决定了制作光栅的大小, 定位精度、直线度以及稳定性决定了制作光栅的质量, 并且因为光栅面形的要求较高, 米级光栅基板的厚度一般在100 mm以上, 从而导致光栅基板的重量将达到200 kg以上, 因此该二维运动平台必须满足超大行程、超大负载能力以及超高定位精度的要求, 其指标要求如表6所示。对于该要求的二维运动平台, 其结构形式大多为: 直线电机驱动被气浮导轨支撑的平台, 同时多轴双频激光干涉仪实时检测并反馈平台位姿状态, 从而实现超高定位精度的要求, 典型的应用如光刻机中硅片台, 其定位精度达到10 nm, 但是其承载能力却只有几公斤, 无法满足SBIL系统对二维运动平台的要求。因此

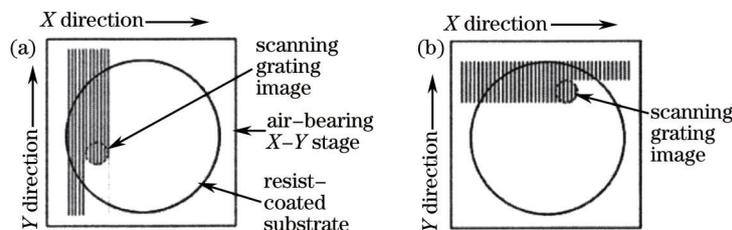


图15 二维平台的运动方式。(a) 平行扫描方式; (b) 多普勒扫描方式

Fig.15 Motion form of two-dimension stage. (a) Parallel scanning; (b) Doppler scanning

二维运动平台的性能瓶颈将限制 SBIL 技术更广泛的应用。

表 6 SBIL 系统二维运动平台的指标要求

Table 6 Requirement of two-dimension stage in SBIL

Parameter	Index
Travelrang	1200 mm×500 mm
Accuracy /nm	30
Straightness & flatness /nm	30
Stability /nm	5
Maximum load capacity /kg	>200

5 总结与展望

应用 SBIL 系统制作脉冲压缩光栅,其具体参数要求如表 7 所示。根据文献[27]与文献[44]可知该系统必须具备高精度扫描控制系统以及高精度的测量系统,其中光束的位置对准精度约为 $10\ \mu\text{m}$,光束角度对准精度约为 $2\ \mu\text{rad}$;整个干涉场周期测量精度要控制在 ppm 量级;波面相位偏差要控制在 $12\ \text{nm}$;条纹锁定精度要优于 $\pm p/100$;二维运动平台在 $300\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$ 范围内的定位精度优于 $40\ \text{nm}$,只有满足各个关键技术的性能要求,所制作的脉冲压缩光栅才能满足表 7 所列出的参数指标,根据上一节的描述可知,其中的关键技术都能满足要求。

表 7 脉冲压缩光栅的参数指标

Table 7 Parameter of pulse compression gratings

Parameter	Index
Active area	$300\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$
Spatial frequency /mm	17401
Wave length /nm	1053
Diffraction efficiency	>92% @1053 nm
Wavefront distortion	$< \lambda/4$

从光栅应用领域来看,更大面积、更复杂结构、更高精度的光栅的需求越来越迫切。在 SBIL 系统中,运动平台的行程决定了光栅的尺寸大小,平台的运动形式、干涉场周期的调整决定了光栅的结构,光学系统的性能、检测系统的精度、运动平台的性能决定了光栅的精度。因此对于运动平台,多维度、超大行程、超大负载能力以及超高定位精度将是其未来突破方向;对于光学系统,因 VP-SBIL 技术能方便快捷的调整干涉场周期,能实现更复杂光栅结构的制作,SBIL 光学系统将会朝着这个方向发展;对于检测系统,其中包括光束对准系统、周期测量系统、相位锁定系统、波前测量系统等,其均未对实际曝光场进行直接测量,而是测量的曝光场的等效场;并且其检测系统与曝光过程并非同时进行,大大降低了检测系统的精度,因此直接测量、实时反馈以及更高集成度将会是其主要的发展方向。

6 结 论

扫描干涉场曝光(SBIL)在制作大尺寸、纳米精度的衍射光栅中有着独特的优势,虽然该系统已成功应用于商业化制作 $920\ \text{mm}\times 600\ \text{mm}$ 的脉冲压缩光栅,但是对于制作更高衍射效率与更高波前质量的衍射光栅,其需要重点突破的有如下几个方面:

- 1) 研究光束对准、周期测量、相位锁定、波前测量技术,来检测曝光干涉场的光束位置与相位信息;
- 2) 研究实时检测曝光干涉场的检测系统,以解决曝光过程中由大面积扫描运动引起的系统不稳定性;
- 3) 研制大行程、超大负载以及超高精度多维运动平台,满足制作米级光栅过程中的高精度的相位拼接。

随着相关技术的进展与突破,扫描干涉场曝光法在更大尺寸、更高精度的光栅制作领域将会迎来更广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Meade D. 50 years of fusion research[J]. Nuclear Fusion, 2010, 50(1): 014004.
- 2 Clery D. Laser fusion energy poised to ignite[J]. Science, 2010, 328(5986): 808-809.

- 3 Habara H, Xu G, Jitsuno T, *et al.*. Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1783-1785.
- 4 Qiao J, Kalb A, Nguyen T, *et al.*. Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(15): 1684-1686.
- 5 Qiao J, Kalb A, Guardalben M J, *et al.*. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems[J]. *Opt Express*, 2007, 15(15): 9562-9574.
- 6 Zuegel J D, Borneis S, Barty C, *et al.*. Laser challenges for fast ignition[J]. *Fusion Sci Technol*, 2006, 49(3): 453-482.
- 7 J H Underwood, E M Gullikson, M Koike, *et al.*. Beamline for metrology of X-ray/EUV optics at the advanced light source [C]. *SPIE*, 1997, 3113: 214-221.
- 8 Barnes S I, Cottrell P L, Albrow M D, *et al.*. The optical design of the Southern African large telescope high resolution spectrograph[C]. *SPIE*, 2008, 7014: 70140.
- 9 Gao W, Kimura A. A three-axis displacement sensor with nanometric resolution[J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(1): 529-532.
- 10 M L Schattenburg, C G Chen, P N Everett, *et al.*. Sub-100nm metrology using interferometrically produced fiducials[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1999, 17(6): 2692-2697.
- 11 P T Konkola, C G Chen, R K Heilmann, *et al.*. Beam steering system and spatial filtering applied to interference lithography [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2000, 18(6), 3282-3286.
- 12 M L Schattenburg, H I Smith. The critical role of metrology in nanotechnology[C]. *SPIE*, 2002, 4608: 116-124.
- 13 C G Chen, Paul T Konkola, Ralf K Heilmann, *et al.*. Nanometer-accurate grating fabrication with scanning beam interference lithography[C]. *SPIE*, 2002, 4936: 126-134.
- 14 M Schattenburg, P N Everett. Method and System for Interference Lithography Utilizing Phase-Locked Scanning Beams [P]. VS 6882744B1. [2005-4-19].
- 15 Li Fengyou. Study on Technology of Laser Direct Writing Photolithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2002.
李凤有. 激光直写光刻技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- 16 Britten J A, Jovanovic I, Molander W A, *et al.*. Advanced dielectric grating technology for high-energy petawatt lasers [C]. *Conference Lasers and Electro-Optics*, 2005, JFB: JFB5.
- 17 Britten J A, Molander W, Komashkova A M, *et al.*. Multilayer dielectric gratings for petawatt-class laser systems[C]. *SPIE*, 2004, 5273: 1-7.
- 18 Wang Yanhai, Liu Guocai, Yang Qingwei, *et al.*. Three dimensional OPCPA numerical simulations for a petawatt class laser system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 071404.
王艳海, 刘国才, 杨庆伟, 等. 用于拍瓦级激光系统的三维光参量啁啾脉冲放大的数值模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 071404.
- 19 Britten J A. Diffraction Gratings for High-Intensity Laser Applications[OL]. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/357070.pdf>. [2015-8-20]
- 20 J Montoya. Toward Nano-Accuracy in Scanning Beam Interference Lithography[D]. Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, 2006.
- 21 Plymouth Grating Laboratory. Technology: Scanning-Beam Interference Lithography[OL]. <http://www.plymouthgrating.com/Technology/Technology Page.htm>. [2015-06-12].
- 22 G S Pati, R K Heilmann, P T Konkola, *et al.*. Generalized scanning beam interference lithography system for patterning gratings with variable period progressions[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2002, 20(6): 2617-2621.
- 23 Song Ying. Research on the Interference Fringe Static and Dynamic Phase-Locking Technology in the Lithography System of the Holographic Grating[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2014.
宋莹. 全息光栅曝光系统干涉条纹静态及动态相位锁定技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- 24 Jiang Shan, Bayanheshig, Song Ying, *et al.*. Effect of measured interference fringe period error on groove profile of grating masks in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0405003.
姜珊, 巴音贺希格, 宋莹, 等. 扫描干涉场曝光系统中干涉条纹周期测量误差对光栅掩模槽形的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0405003.

- 25 Jiang Shan, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.*. Effect of period setting value on printed phase in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0905003.
姜 珊, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 扫描干涉场曝光系统中周期设定对曝光刻线相位的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0905003.
- 26 Song Ying, Bayanheshig, Qi Xingdong, *et al.*. Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 318-324.
宋 莹, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 移频式全息光栅曝光干涉条纹锁定系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 318-324.
- 27 C G Chen. *Beam Alignment and Image Metrology for Scanning Beam Interference Lithography: Fabricating Gratings with Nanometer Phase Accuracy*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 28 Bao Jianfei, Huang Huijie, Zeng Aijun, *et al.*. Study of beam stabilization technique in lithography illumination system [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0908004.
鲍建飞, 黄惠杰, 曾爱军, 等. 光刻机照明系统中光束稳定技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0908004.
- 29 William N Partlo, Charles H Fields, William G Oldham. Direct aerial image measurement as a method of testing high numerical aperture microlithographic lenses[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1993, 11(6): 2686-2691.
- 30 Chulmin Joo, G S Pati, C G Chen, *et al.*. Precision fringe metrology using a Fresnel zone plate[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2002, 20(6), 3075-3079.
- 31 Chulmin Joo. *Image Grating Metrology Using a Fresnel Zone Plate*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 32 Craig Richard Forest. *X-ray Telescope Foil Optics: Assembly, Metrology, and Constraint*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 33 Feng Sheng. *Research of the Technologies of Wavefront Measurement*[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
冯 胜. 波前检测技术的研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2009.
- 34 Dong Liu, Yongying Yang, Yibing Shen, *et al.*. System optimization of radial shearing interferometer for aspheric testing [C]. SPIE, 2007, 6834: 68340U.
- 35 M P Rimmer. Method for evaluating lateral shearing interferograms[J]. *Appl Opt*, 1974, 13(3): 623-629.
- 36 Shao Jing. *Study on Evaluating the Criterion Wavefront in Point Diffraction Interferometer*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2013.
邵 晶. 点衍射干涉仪基准波前质量测评研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- 37 Don B Neumann, Harold W Rose. Improvement of recorded holographic fringes by feedback control[J]. *Appl Opt*, 1967, 6(6): 1097-1104.
- 38 David R MacQuigg. Hologram fringe stabilization method[J]. *Appl Opt*, 1977, 16(2): 291-292.
- 39 Gao Liang, Lin Hua, Zeng Lijiang. A close-loop feedback system used for improving the stability of interference fringes [J]. *Optic and Optoelectronic Technology*, 2004, 2(1): 23-25.
高 亮, 林 华, 曾理江. 用于增强干涉条纹稳定性的反馈控制系统[J]. *光学与光电技术*, 2004, 2(1): 23-25.
- 40 Odhner Holographics. StabilockII Active Fringe Stabilizer[OL]. <http://www.stabilock.com>. [2015-6-12].
- 41 Ralf K Heilmann, P T Konkola, C G Chen, *et al.*. Digital heterodyne interference fringe control system[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2001, 19(6): 2342-2346.
- 42 P T Konkola. *Design and Analysis of a Scanning Beam Interference Lithography System for Patterning Gratings with Nanometer-Level Distortions*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 43 Juan C Montoya, Chihhao Chang, Ralf K Heilmann, *et al.*. Doppler writing and linewidth control for scanning beam interferencelithography[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2005, 23(6): 2640-2645.
- 44 Juan C Montoya. *Toward Nano-accuracy in Scanning Beam Interference Lithography*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.

栏目编辑: 刘丰瑞