

文章编号 1004-924X(2015)12-3335-08

基于闪耀光栅图形化实现高分辨率干涉光刻

胡 进,董晓轩,浦东林,申 溯,陈林森*

(苏州大学 物理与光电·能源学部,江苏 苏州 215006)

摘要:为提高图形化干涉光刻质量,提出了基于闪耀光栅的图形化干涉光刻(PIIL)系统,并对该系统所采用的光学原理和实现方法进行了研究。首先,分析了图形化干涉光刻系统的光场特性,阐述了其分辨率提升的原理。讨论了光学系统带宽和图案分布对光刻图形质量的影响,给出了图形质量控制的工艺方法。其次,提出了一种新型的图形化干涉光刻方法,该方法采用闪耀光栅作为衍射分光器件,实现了位相和振幅的一体化调制。采用数值计算方法模拟了闪耀光栅的衍射特性和像面光场分布,讨论了闪耀光栅的优化设计方法,获得了高达 92.3%的 ± 1 级衍射效率。最后,基于数字微镜器件(DMD)和微缩成像光路设计开发了图形化干涉光刻系统,实验获得了像素化的点阵图形和质量明显改善的光刻图像,验证了该方法对任意图形的适用性。

关键词:图形化干涉光刻;傅里叶光学;衍射效率;激光直写;数字微镜器件

中图分类号: TN305.7; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3335

High resolution pattern-integrated interference lithography based on blazed grating

HU Jin, DONG Xiao-xuan, PU Dong-lin, SHEN Su, CHEN Lin-sen*

(College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China)

* Corresponding author, E-mail: lschen@suda.edu.cn

Abstract: To improve the quality of pattern interference lithography, a Pattern-integrated Interference Lithographic (PIIL) system based on a blazed grating was proposed, and the theory of optical system and the method to realize a high quality pattern were investigated. Firstly, the optical field properties of the typical PIIL system were analyzed and how to improve the resolution of the system was described. The influences of the system bandwidth and the pattern feature on the image quality were discussed and the process technique to enhance the pattern uniformity in the interference exposure was given. Then, a novel pattern-integrated interference lithographic method was proposed. The blaze grating was used as a diffraction beam splitter to realize the integration of phase and amplitude modulation and the numerical calculation was used to simulate the diffraction properties of the blazed grating and the optical field distribution on an image plane. The parameter optimization of the blazed grating was discussed and the diffraction efficiency up to 92.3% was obtained for ± 1 order. Finally, the pattern-integrated interference exposure system was presented based on a Digital Mirror Device

收稿日期:2015-05-11;修订日期:2015-07-10.

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(No. 91323303)

(DMD), a micro imaging path and the patterns of pixelated dot-matrix were obtained and the quality of pattern of interference lithography was improved markedly. The results verify the applicability of the method for arbitrary structures.

Key words: pattern-integrated interference lithography; Fourier optics; diffraction efficiency; laser direct writing; Digital Mirror Device(DMD)

1 引言

干涉光刻是微纳制造的重要手段。在高分辨率图形结构的制备上,它显示出高效率、长焦深和低成本等优点。干涉光刻技术已在光栅器件、高密度存储、偏振器件和数字全息等领域获得了成熟的应用^[1-3]。近年来,随着微纳制造向 20 nm 以下节点的推进,采用极紫外(Extremely Ultraviolet, EUV)光源的干涉光刻成为了研究热点^[4-6]。

当前,干涉光刻技术的瓶颈主要是加工灵活性不足,通常只能生成周期性图形结构,从而大大限制了其应用领域。为了突破上述瓶颈,人们提出了多种图形叠加的方式。扫描光束干涉光刻(SBIL)技术可使干涉光刻的幅面不再局限于曝光视场,同时可通过错位叠加调控光刻图形的槽形和占空比^[7-8]。基于莫尔效应的多次曝光叠加可实现复杂的类周期图形^[9];改变干涉光束的数目和空间排布,由单次曝光即可实现上述莫尔图形^[10]。为了在干涉光场中获得真正的图形化控制能力,在光学系统中需要采用分光干涉和投影成像相结合的方法。该方法可以实现图形轮廓的精细控制,理论上可精确到单个干涉条纹(或者干涉点)尺度,从而实现像素化的调控。其中一种直接的实施方案是采用多路投影成像系统在曝光表面相干叠加^[11],其各路光学系统的成像器件可采用掩模或者振幅型空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)来实现干涉光场的图形轮廓控制。但由于多路图形对准和相位匹配对光路装调的要求极高,因而该方案的实施难度很大。

较为可行的方案最早出现在数字全息领域。其涉及的技术是将投影成像光路与衍射分光器件结合来实现干涉光场轮廓的图形化控制,这种方案被称为图阵全息(Image-Matrix Holography)技术,其具体的实施方案有两种。其一,采用纯位相型 SLM(LCD 或者 LCoS)实现衍射分光和光场图形的一体化控制。典型案例为 Polish Holo-

graphic Systems 公司的 KineMax 全息光刻系统^[12],其图形轮廓信息经过 SLM 的 π 位相调制后,主要集中在 ± 1 级,再经过频域滤波后,最终呈现在像面。其频域滤波用于消除低频成分,包括 SLM 的位相调制区域的 0 级衍射光以及 SLM 的其它区域传输的零频(直流)成分。由于存在低频滤波,该方案没有充分利用光学系统带宽,难以精密控制光场的图形轮廓和条纹均匀性;特别是当干涉光场的图形尺寸较小(像素数目较少)和图案较为复杂时,该缺点表现尤为明显。其二,采用振幅型 SLM(或掩模)和衍射光栅前后级联,分别实现光场图形和衍射分光的控制^[13-14]。由于对输入光场采用了振幅型调控,同时衍射光栅可充分抑制零级,因而无需进行频域滤波,该方案在原理上更有利于实现干涉光刻的图形化控制。由于数字全息领域对光刻图形质量的要求较低,高水平的图形化干涉光刻结果出现在其它领域。2012 年前后, Gaylord 等人提出了一种图案集成干涉光刻(Pattern-Integrated Interference Lithography, PIIL)方法^[15],并成功应用于制作复杂图形的光子晶体。该方法的基本原理和光路结构与方案二非常类似,可归于一类。相关实验结果显示,PIIL 实现了干涉光场的像素化控制,但是光刻图形质量仍然有待提升,特别是图形轮廓的边缘像素质量^[16]。该技术的难点在于必须严格控制前级投影成像系统的畸变,并且实现前级的投影图形与后级的衍射光栅槽形的精密对准。此外,衍射光栅必须将零级光抑制在较低水平,否则仍面临频域滤波的问题。为简化表述,本文以 PIIL 泛指各类图形化干涉光刻方法。

本文提出了一种基于闪耀光栅位相调制的 PIIL 方法,利用闪耀光栅对衍射级的选择,实现了位相和振幅的一体化调制。通过优化设计光栅参数,使光场能量主要集中在 ± 1 级衍射光上,衍射效率高达 92.3%。该方法无需滤波消零级并且降低了图形与衍射元件对准要求,改良了光刻图形质量,实现了高分辨率像素化的干涉光场。

2 图形化干涉光刻系统的光场特性

PIIL 系统以投影成像光路为主体,其等效输入光场可视为经典干涉光场的余弦复振幅分布与图案掩模的乘积^[14]。等效输入光场的基本单元为余弦单峰,其对应的频域分布记为 S_c , S_c 决定了光场频域分布的包络。将余弦单峰视作双光束干涉的特例,再根据光栅衍射方程和傅里叶光学理论可得 S_c 为:

$$S_c = a \cdot \text{sinc} \left[\pi a k \left(\xi - \frac{1}{2ak} \right) \right] + a \cdot \text{sinc} \left[\pi a k \left(\xi + \frac{1}{2ak} \right) \right] = -\frac{1}{\pi k^2} \frac{\cos(\pi a k \xi)}{\xi^2 - \left(\frac{1}{2ak} \right)^2}, \quad (1)$$

其中: ξ 为频域坐标, a 为余弦单峰的宽度, k 为透镜傅里叶变换的缩放因子, $k=1/(\lambda f)$ 。

在图 1 中可以看到,光场能量主要集中在 ± 1 级。+1 级和 -1 级分布对应输入光场图案信息的傅里叶变换,并且受到包络 S_c 的调制。 S_c 的轮廓(与 sinc 函数类似)具有多个波峰,因此存在高级次,其能量一般很小,对 ± 1 级的影响可以忽略。

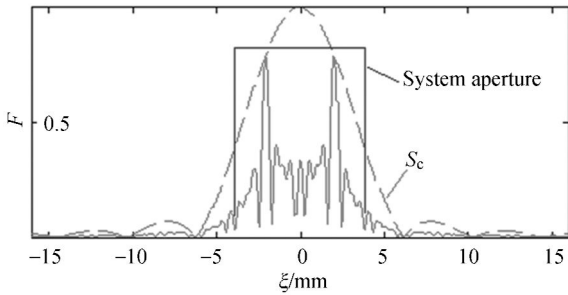


图 1 图形化干涉光场的频域分布

Fig. 1 Optical distribution on Fourier plane in typical PIIL system

由于输入光场的单元数目较少并且图案不规则,因此+1 级和 -1 级包含较多的高频成分,并且主体部分较宽。为了减小光场图案信息的损失, ± 1 级峰值之间的带宽必须小于系统带宽的 70% 左右(见图 1)。因此,相比经典的干涉光刻, PIIL 的极限分辨率并不占优势。

需要指出的是, +1 级和 -1 级各自的频带沿着坐标轴向两侧无限延伸,因而频域中的 ± 1 级是相互重叠的。图 1 中, +1 级和 -1 级被截取的有效带宽均为系统带宽,并且均为偏置分布。由

此可知,在 PIIL 光学系统中,光场图案信息的传输与离轴照明成像系统类似,通常可获得较好的图形分辨率,但是对比度较差(均匀性较差)。

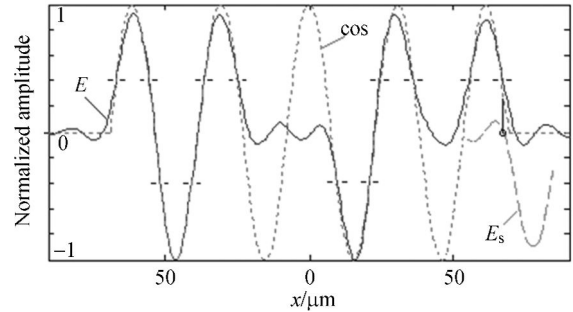


图 2 图形化干涉光场的像面光场分布

Fig. 2 Optical distribution on image plane in typical PIIL system

PIIL 光场的典型频域复振幅分布如图 2 所示,图中采用的等效输入光场振幅由一维数组记为 $[1, -1, 1, 0, 0, -1, 1, 0, 1]$,数组单元代表光场振幅对应的余弦单峰。

由于受到系统孔径的限制,PIIL 的输出光场存在一定的图形失真和不均匀,其归一化复振幅分布 E 与理想余弦分布 E_s 的对比如图 2 所示。图 2 表明,光刻图形质量与输入图案紧密相关。孤立光场单元的峰值较小,底部较宽(见图 2 中 E 的最右单元)。而连续光场单元,由于受到两侧相邻单元的光场叠加,峰值增大,底部收窄(见图 2 中 E 的左 2 单元)。其叠加效果与相移掩模^[17]对光刻分辨率的提升类似。区别在于:相移掩模光刻中,光场单元的复振幅分布接近矩形,相邻叠加发生在旁瓣处;而干涉光刻中,由于衍射受限效应更明显,光场单元的复振幅分布被展宽,相互叠加发生在主峰之间,分辨率提升的作用更为明显。图 2 中, E 的最右单元与 E_s 模拟了两相邻光场单元在叠加之前的分布状态。

根据相关理论分析(光学吉布斯现象)和数值计算可知,当光学系统的带宽小于输入光场单元的频域分布主峰宽度时(见图 1),位相差为 π (其实是振幅正负交替)的邻近光场单元的叠加均可提升分辨率,同时还具有‘阈值均布’特性。此处所述的光场单元并不局限于余弦类型分布。

所谓“阈值均布”是指在 PIIL 光刻系统的像面光场分布中,各光场单元均与理想的余弦分布相交于左右对称的两点,并且所有交点的复振幅

数值非常接近(见图 2 中虚横线标记)。如果以此复振幅数值作为显影阈值,结合适当的工艺条件^[2],PIIL 可以获得准确的图形位置和好的线宽均匀性。该阈值均布特性也可以通过相邻光场单元的叠加效应加以解释。由图 2 中 E_s 的圆圈标记可知,上述阈值点的坐标位置正好对应相邻光场单元的复振幅的零值,因此无论是否存在相邻单元进行光场叠加,上述交点处的复振幅保持不变。当 PIIL 等效输入光场单元的复振幅分布和光学系统带宽发生变化时,最佳显影阈值也相应改变。其优选值约为 0.7,此时可获得较高的光刻分辨率,同时显影阈值的可控范围较大。

3 基于闪耀光栅的图形化干涉光刻方法

本文基于闪耀光栅的位相调制提出了一种新型的 PIIL 方法。

3.1 基于闪耀光栅的衍射分光原理

如图 3 所示,闪耀光栅基面与 X 轴重合,并且位于成像系统的物面,光轴沿 Z 向。采用单位振幅平面波照明,入射角为 θ ,经过光栅槽面反射后的出射角为 β 。约定 θ 和 β 相对 Z 轴的逆时针方向为正。光栅闪耀角为 γ ,周期为 d ,有效槽宽为 a 。

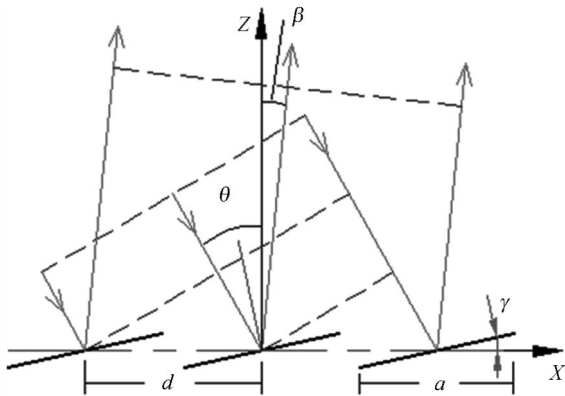


图 3 闪耀光栅的衍射特性分析模型

Fig. 3 Schematic diagram of model for diffraction characteristic analysis of blazed grating

考查连续 $2N+1$ 个槽形的衍射输出光场,其中心槽面位于 $X=0$,其输出光场的频域分布为:

$$S_0(\xi) = \frac{\sin(a\pi k(\xi + f\sin\beta))}{\pi k(\xi + f\sin\beta)}, \beta = 2\gamma - \theta, \quad (2)$$

式中: ξ 为频域坐标, $k=1/(\lambda f)$, λ 为光源波长, f 为透镜焦距。

以中心槽面为参考,位于 $X=md$ 槽面的输出光场的频域分布为:

$$S_m = S_0 e^{i\frac{2\pi}{\lambda} m d \sin\theta} e^{-i2\pi k \xi m d}, \quad (3)$$

式中, $e^{i\frac{2\pi}{\lambda} m d \sin\theta}$ 对应照明平面波在各槽面的初始位相差, $e^{-i2\pi k \xi m d}$ 对应傅里叶变换的平移性质。经过光场叠加,闪耀光栅的频域光场分布 F 为:

$$F(\xi) = \sum S_m = S_0 M_{\text{intf}} = \frac{\sin(a\pi k(\xi + f\sin\beta))}{\pi k(\xi + f\sin\theta)} \cdot \frac{\sin(\pi k(\xi - f\sin\theta) \cdot (2N+1) \cdot d)}{\sin(\pi k(\xi - f\sin\theta) \cdot d)}. \quad (4)$$

F 的表达式与经典的多缝干涉远场分布类似。 S_0 为单缝衍射因子,其分布为 sinc 函数,它决定了频域分布的外包络。 M_{intf} 为多缝干涉因子,它决定了各个衍射级的相对位置。 F 的归一化复振幅分布如图 4 所示, S_0 的零点周期为 P_1 , M_{intf} 的极点周期为 P_2 。

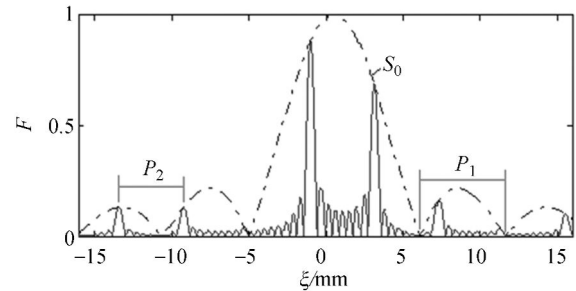


图 4 闪耀光栅的典型衍射级分布

Fig. 4 Typical distribution of diffraction orders of blazed grating

由式(4)可知,在频域坐标轴 ξ 上, S_0 的截距为 $-f\sin\beta$,而 M_{intf} 的截距为 $f\sin\theta$,两者之间存在差异。调节入射角 θ ,可以使得多级分布整体相对 S_0 包络左右移动,由此使得各个衍射级的能量发生变化。当上述两截距的差值为 P_2 的整数倍时,可使得某衍射级与 S_0 的主峰中心对齐,从而形成闪耀输出。而当两截距的差值为 P_2 的 $i+1/2$ 倍时,一对衍射级会居于 S_0 的主峰内,从而形成对称衍射级输出,此条件可表达为:

$$f\sin\theta - (-f\sin\beta) = (i + \frac{1}{2}) \cdot P_2, \quad (5)$$

其中 i 为整数。式(5)又可简化为:

$$d\sin\theta + d\sin\beta = (i + \frac{1}{2})\lambda. \quad (6)$$

式(6)的物理意义为:从入射平面波的波前,经过闪耀光栅表面到出射方向上的某个参考面,相邻两个槽形的位相差为 π (见图 3)。定义闪耀光栅的位相调制为 Φ ,式(6)可改写为:

$$\varphi = 2 \cdot \cos(\theta - \gamma) \cdot \frac{d \sin \gamma}{\lambda} = i + \frac{1}{2}. \quad (7)$$

根据图 4 和上述分析可知,通过对闪耀光栅的 π 位相调制,可获得对称衍射级输出,截取中心双级则可实现双光束干涉光刻。根据光栅衍射方程可知,此中心双级并不是 $+1$ 级和 -1 级,而是相邻的两个高级次。由于两者之间没有中间级次,因而实现了完全的‘消零级’。同时,此两衍射级相比传统衍射光栅的 ± 1 级相距更近(重叠更多),易于充分利用系统带宽,以获得更高的光刻分辨率和图形质量。

上述分析基于闪耀光栅的连续槽形,同时也完全适用于不规则的槽形分布,包括具有数字化闪耀光栅结构的 SLM(例如 Digital Micromirror Device 简称 DMD)。由于中心双级各自包含了输入光场的图案信息,而其空间相对位置又决定了双光束干涉倾角,因而最终实现了位相和振幅的一体化调制。

相比已有的 PIIL 方法,本文所述方法避免了纯位相调制方案的频域滤波问题,同时也省去了前后级联方案的精密对准过程。

3.2 闪耀光栅的参数优化

闪耀光栅的衍射输出呈多极分布,为了获得良好的干涉光刻质量,必须减小其它衍射级对中心双级的影响。这里主要通过调节占空比 a/d 实现闪耀光栅的优化。

由式(4)可知, S_0 的零点周期 $P_1 = 1/(ka)$, 其主峰的宽度为 P_1 的 2 倍, M_{inf} 的极点周期 $P_2 = 1/(kd)$ 。当占空比 a/d 不等于 1 时,两者存在差异。保持光栅周期 d 不变(P_2 不变),改变占空比(即有效槽宽 a),可使得 S_0 包络沿着坐标轴 ξ 扩展或压缩,从而使得各个衍射级能量受到相应的调控。当 S_0 的主峰宽度接近 3 倍的 P_2 时(占空比为 $2/3$),可使得‘ ± 2 ’级的中心位于 S_0 的零点,从而被充分抑制(见图 4)。占空比的最优值可借助以下模型精确分析:取闪耀光栅的槽数为无穷大,当占空比为最优值时,等效输入光场与理想的余弦复振幅分布最为接近,对应的频域分布中‘ ± 1 ’级的相对衍射效率 $\eta_{\pm 1}$ 达到最大。根据

sinc 函数的性质,可得 $\eta_{\pm 1}$ 的表达式为:

$$\eta_{\pm 1} = \frac{\text{sinc}^2(a/2d)}{\sum \text{sinc}^2((N+1/2)a/d)}, \quad (8)$$

式中 N 为整数,取值为 $[0, +\infty)$ 。对 $\eta_{\pm 1}$ 求极值,可得占空比的最佳值为 $\pi/(3\sqrt{2})$, 约为 0.74, 对应的 $\eta_{\pm 1}$ 可达 92.3%。此时闪耀光栅的输出光场与理想的 PIIL 光场非常接近,两者的频域分布对比如图 5 所示。根据光场分布的对称性,图中只显示单侧。干涉光场的输入图案为连续 9 个槽形。理想 PIIL 光场的频域分布为 F_c , 包络为 S_c , S_c 由式(1)表达。基于闪耀光栅 PIIL 的光场频域分布为 F_r , 包络为 S_r , S_r 由式(2)表达。可以看到 F_r 与 F_c 在中低频部分近似重合;但由于 S_r 的主峰比 S_c 衰减更快,使得 F_r 的高频部分相比 F_c 存在微小损失。 S_r 的外围波峰的幅值要明显大于 S_c , 相应地 F_r 与 F_c 在更高频部分的差异较为明显,但该部分频段已经超出光学系统带宽,对成像质量的影响可以忽略。

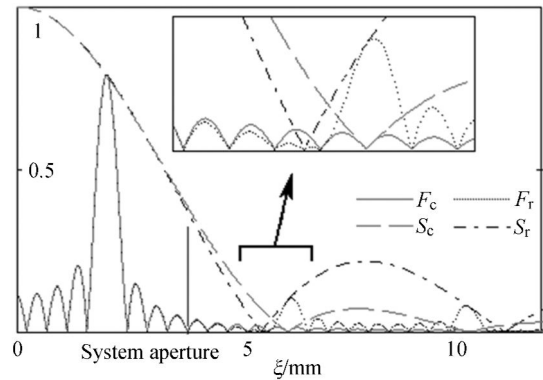


图 5 闪耀光栅最优化输出光场与理想 PIIL 光场的频域对比

Fig. 5 Frequency spectra of proposed method and ideal PIIL method

闪耀光栅取不同占空比对应的 $\eta_{\pm 1}$ 数值可由式(8)得出,结果如图 6 所示。可知当占空比为 0.6~0.9 时, $\eta_{\pm 1}$ 的衍射效率均在 85% 以上,对应的干涉光场均可获得较好的图形质量。数值计算表明,占空比在 0.6~0.9 时,本文所述 PIIL 方法的输出光场可获得前述的阈值均布特性;并且占空比越大,最佳显影阈值也越大,可获得的图形分辨率越高,但图形对比度随之下降。当占空比为 0.6 和 0.9 时,最佳显影阈值对应的归一化复振幅分别为 0.43 和 0.74,对应的光刻分辨率为条纹周期的 0.88 和 0.63。由此可知,本文所述 PI-

IL 方法对闪耀光栅的制备工艺要求较低,而且可对光刻分辨率进行调控。

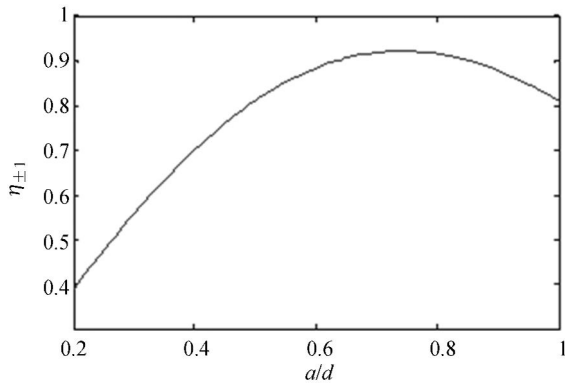


图 6 闪耀光栅的不同占空比对应的 ± 1 级相对衍射效率

Fig. 6 Relative efficiency of the ± 1 orders at different fill factors of blazed grating

4 光刻系统及实验结果分析

为了对所述 PIIL 方法进行原理验证和图形测试,本文开发了相应的干涉光刻实验系统,其光路结构如图 7 所示。闪耀光栅采用 SLM DMD (美国 TI 公司 DLP Discovery_4000),用以实现可调控的二维图形化干涉光场。DMD 的像素周期为 $10.8 \mu\text{m}$,显示幅面为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,闪耀角为 $(12 \pm 0.1)^\circ$,占空比约为 0.95。主光路采用双远心投影成像光路,由管透镜和显微物镜组成,前者采用紫外光光学镜片组(大恒光电公司),后者采用 Olympus 的 MPLAPON 的 10 倍平场复消色差显微物镜,数值孔径为 0.3。此处之所以未采用高倍显微物镜,其原因是二维干涉光场所需的光学系统孔径相比一维情形显著增加,而常用的高倍显微物镜为了平场校正和长工作距离,其孔径光阑较小。

照明系统由激光束准直扩束实现。这里采用 DPSS 脉冲激光器(DS10-355,美国 Photonics Industry 公司),波长为 355 nm ,脉冲宽度约为 50 ns ,单脉冲能量约为 0.5 mJ 。由图 3 和图 7 可知,基于 DMD 的分光干涉所需的相干长度约为 $3 \sim 5 \text{ mm}$,所用激光器可以满足此项要求。感光材料采用正性光刻胶(苏州瑞红电子化学品公司, RZJ-306),旋涂厚度约为 $0.8 \mu\text{m}$ 。

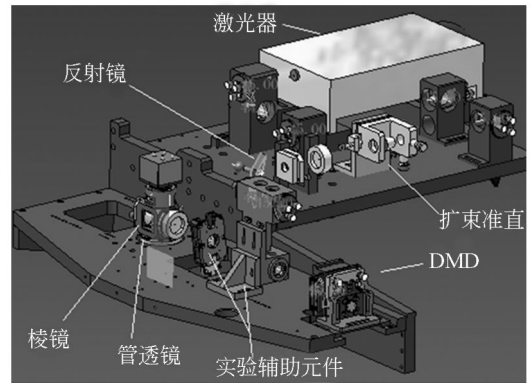
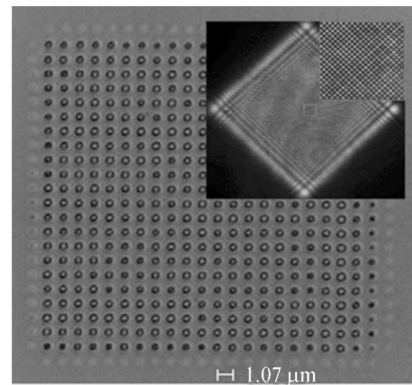


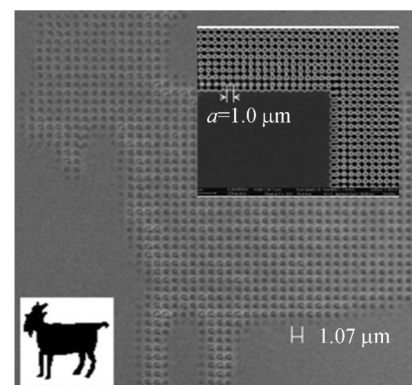
图 7 基于闪耀光栅的 PIIL 光刻系统的光路结构

Fig. 7 Optical scheme of PIIL system based on blazed grating



(a) 矩形图案

(a) Rectangle pattern



(b) 不规则图案

(b) Irregular pattern

图 8 PIIL 光刻图形质量

Fig. 8 Imaging quality of PIIL system

矩形图案的干涉光刻照片如图 8(a)所示,观测工具为日本 KEYENCE 公司的 VK-X200 激光

共焦显微镜。可以看到中心区域的图形一致性良好,图形分辨率约为 500 nm,对应的光刻工艺因子约为 0.4。通过控制显影工艺还可进一步提升分辨率。主要不足在于边缘单元的光强较小,降低了整体的图形均匀性,与数值模拟的结果完全一致。其主要原因是 DMD 的占空比为 0.95,与前述闪耀光栅占空比的优选值 0.74 相差较大。此外,若改用化学放大胶工艺匹配最佳显影阈值,还可进一步提升光刻图形质量。图 8(a)插图 of 单次曝光没有成像系统时衍射现象所导致的图像模糊失真。

不规则图案的干涉光刻照片如图 8(b)所示,光刻输入图形为羊形图案(图中左下角)。通过增加显影时间,所获得的干涉单点尺寸大于图 8(a),干涉图案的整体均匀性良好。图 8(b)插图是文献[14]中 PIIL 制备的图形,可以看出像素间相连,这是图形与衍射器件无法精确对准而导致的像素畸变。实验结果表明,本文提出的 PIIL 光

刻方法和系统可以对干涉光场的图案进行像素化的调控。

5 结 论

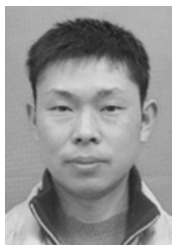
本文分析了理想的图形化干涉光刻系统的光场特性,阐述了其分辨率提升的原理,指出了提高其图形均匀性的工艺控制方法,并提出了一种基于闪耀光栅的 PIIL 方法。该方法基于闪耀光栅的位相调制,实现了只有 ± 1 级衍射光输出。通过优化光栅参数,即当占空比为 0.74 时可获得高达 92.3% 的衍射效率,同时,该方法无需进行纯位相调制方案的频域滤波,也省去了前后级联方案的精密对准步骤,极大地提高了干涉光刻的图形质量。最后,基于 DMD 和微缩成像光路搭建了光刻实验系统,实验验证了所提出方法的可行性,并获得了像素化的干涉光场。通过多次曝光叠加,该方法有望实现高分辨率的任意图形的光刻。

参考文献:

- [1] GREENWAY R T, HENDELL R, JEONG K, *et al.*. Interference assisted lithography for patterning of 1D gridded design [J]. *SPIE*, 2009, 7271: 72712U.
- [2] 精工爱普生株式会社. 微细结构体的制造方法、曝光装置、电子仪器: 中国 CN 1740915A[P]. 2005. Seiko Epson Corporation. Fabrication method of microstructure, exposure system and electronic instruments; CHINA PATENT: 1740915A[P]. 2005. (in Chinese)
- [3] 孙刘杰, 庄松林. 基于同轴菲涅耳全息标识印刷防伪技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(3): 402-405. SUN L J, ZHUANG S L. Identification mark of encrypted in-line Fresnel holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(3): 402-405. (in Chinese)
- [4] WANG L, TERHALLE B, GUZENKO V A, *et al.*. Generation of high-resolution kagome lattice structures using extreme ultraviolet interference lithography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(9): 093104.
- [5] HIROO K. Current status of EUV lithography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(5): 435-441.
- [6] CHEN B, NI Q L, CAO J L. Development of debris-free laser plasma sources for EUV lithography in CIOMP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(5): 442-445.
- [7] MONTOYA J C, CHANG CH H, HEILMANN R K, *et al.*. Doppler writing and line width control for scanning beam interference lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2005, B23(6): 2641-2645.
- [8] PATI G S, HEILMANN R K, KONKOLA P T, *et al.*. A generalized scanning beam interference lithography system for patterning gratings with variable period progressions [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2002, B20(6): 2617-2621.
- [9] ZAIDI S H, BRUECK S R. Multiple-exposure interferometric lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1993, B11(3): 658-662.
- [10] LANGNER A, PÄIVÄNRANTA B, TERHALLE B, *et al.*. Fabrication of quasi periodic nanostructures with EUV interference lithography [J]. *Int. J. Nanotechnol.*, 2012, 23: 105303.
- [11] BENTLEY S J. Nonlinear interferometric lithography for arbitrary two-dimensional patterns [J]. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2008, 7(1): 013004.
- [12] NAYDENOVA L. *Holograms-Recording Materials and Applications*[M]. InTech Press, 2011: 77-80.
- [13] 吴智华, 魏国军, 周小红, 等. 采用 DMD 并行输入的激光干涉直写方法 [J]. *激光与红外*, 2008, 38

- (5): 424-428.
 WU ZH H, WEI G J, ZHOU X H, *et al.*. A way of parallel interferential laser direct writing with DMD [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(5): 424-428. (in Chinese)
- [14] 胡进, 浦东林, 陈林森, 等. 基于衍射光栅和空间光调制器的点阵全息光刻方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 35-39.
 HU J, PU D L, CHEN L S, *et al.*. A method of dot-matrix holography based on the diffraction grating and spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 35-39. (in Chinese)
- [15] GAYLORD T K, LEIBOVICI M C R, BURROW G M. Pattern-integrated interference [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(1): 61-72.
- [16] BURROW G M, LEIBOVICI M C R, GAYLORD T K. Pattern-integrated interference lithography: single-exposure fabrication of photonic-crystal structures [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(18): 4028-4041.
- [17] LEVENSON M D. Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1982, 29(12): 1828-1836.

作者简介:



胡进(1980—),男,湖北潜江人,博士研究生,讲师,2003年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事激光直写和全息光刻方面的研究。E-mail: nanohujin@139.com

导师简介:



陈林森(1961—),男,江苏盐城人,研究员,博士生导师,1982年,1986年于苏州大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微纳光学设计与制造、平板显示纳米光子器件、紫外激光光刻系统与应用及全息防伪等方面的研究。E-mail: lschen@suda.edu.cn

(本栏目编辑:曹金)
 (版权所有 未经许可 不得转载)