

基于改进 Gerchberg-Saxton 算法的全息双面光刻方法

王化宾^{1,2}, 何渝^{1,2}, 赵立新^{1,2*}¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对目前双面微器件加工方法步骤繁琐、效率低的问题, 提出基于改进 Gerchberg-Saxton(GS)算法的全息双面光刻方法, 使用单个光源在玻璃基底的上下表面同时曝光, 进行双面图形的制作。该方法通过计算不同轴向位置图案对应的组合全息图, 并将其加载到空间光调制器(LCOS-SLM)上, 对入射光场进行调制, 从而在目标空间内实现双面图形重现。采用改进 GS 算法对距离焦面 2 mm 处的图案 A 与距离焦面 4.06 mm 处的图案 B 进行全息图计算与仿真重建。搭建实验装置, 对 3 mm 厚透明石英玻璃基底的上下表面同时曝光, 且对光场生成过程中的散斑、杂散光及串扰问题做出分析并提出解决方案, 最终实现 60 μm 线宽双层图案曝光, 验证了所提方法进行双面光刻的可行性。所提方法使用单张全息图和单个光源, 通过单次曝光即可在目标体积内生成多层任意图形, 极大地简化了双面图形制作的步骤。

关键词 计算全息; 微纳制造; 双面光刻; 光场调控; 全息算法

中图分类号 O438.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222978

Holographic Double-Sided Photolithography Based on Improved Gerchberg-Saxton Algorithm

Wang Huabin^{1,2}, He Yu^{1,2}, Zhao Lixin^{1,2*}¹State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Given the problems of cumbersome steps and low effectiveness of the present double-sided microdevice processing technique, a holographic double-sided photolithography based on the enhanced Gerchberg-Saxton (GS) algorithm is proposed, which employs a single light source to achieve a double-sided pattern produced by single exposure on the upper and lower surfaces of the glass substrate. This approach realizes double-sided pattern reproduction in the target space by determining the combined holograms corresponding to various axial position patterns and loading them onto a spatial light modulator (LCOS-SLM) to regulate the incident light field. The holographic reconstruction of patterns A and B at distances of 2 mm and 4.06 mm from the focal plane, respectively, is calculated and simulated using the modified GS method. The experimental device was set up to achieve the simultaneous exposure of the upper and lower surfaces of the 3-mm thick transparent quartz glass substrate, and the problems of speckle, stray light, and crosstalk in the process of light field generation were examined and solutions were proposed, and finally 60- μm linewidth double-layer pattern exposure was realized, which confirm the feasibility of the proposed method for double-sided lithography. A single hologram and a single light source are used in the technique described in this research to create numerous layers of arbitrary images in the target volume during a single exposure, considerably simplifying the processes involved in producing double-sided pictures.

Key words computer-generated holography; micro and nano manufacturing; double-sided photolithography; light field modulation; holographic algorithm

1 引言

随着微细加工技术日益提高, 对微器件结构复杂

度的需求也不断提升。传统的单面光刻已经无法满足器件的功能需要, 双面光刻技术愈发重要, 双面光刻技术广泛应用于微机电系统(MEMS)、微流体结构、微

收稿日期: 2022-11-07; 修回日期: 2023-01-03; 录用日期: 2023-01-17; 网络首发日期: 2023-02-07

通信作者: *lixinzhao@sohu.com

光学元件、石英晶体谐振器等特殊的分离器件或结构,在航空航天、精密仪器仪表、国防科技、生物医学和环境监测等领域具有重要意义,这类器件的加工需要在基底的正反两面都进行曝光,并要求正反面图形的位置相对精确。光刻领域较早的研究大多都是针对二维平面结构的,因而基于二维图案结构的加工技术已经非常成熟。常规微纳结构加工方法主要有激光直写光刻^[1-5]、电子束或离子束直写光刻^[6-8]、投影光刻^[9-14]等,使用传统微纳加工方法进行双面光刻时需要将基底的正反两面先后进行曝光^[15]或者使用两束光源同时进行曝光^[16],要求双面光刻设备具备高精度对准系统或者双光源来进行高精度装配。目前用玻璃作为基板或玻璃晶圆的应用越来越广泛,对于玻璃基底,可以利用其透明的重要特性。要想实现单个光源一次曝光玻璃基底的正反两面,需要在目标空间内获得不同纵向位置处的图案化光场即一个三维光场,计算全息无掩模光刻采用相位型空间光调制器加载目标光场的相位全息图,在目标空间内投影曝光,该方法不受物理掩模的限制,可生成任意三维光场,灵活度高,具有巨大的优势。

为了提高双面光刻的效率,实现单张全息图对入射光场的调控,在单个光源的情况下,在目标体积内生成两层任意的图案化光场并进行曝光,本文提出了基

于改进 GS 算法的双面光刻方法。介绍了计算全息算法实现双面光刻的原理,对所设计的系统进行仿真计算和实验验证,并对实验结果进行分析。

2 光刻原理

针对采用空间光调制器构建双层光场并进行双面光刻的方法,采用如图 1 所示的光路,使用空间光调制器对入射激光进行调制,获得双层光场分布,即可通过单次投影实现多平面曝光。

图 1 为基于计算全息的微立体光刻方法光路示意图。405 nm 激光经衰减器后入射到旋转的毛玻璃上,出射的光经物镜聚焦和扩束器扩束后通过分光棱镜充满液晶空间光调制器的靶面;空间光调制器上加载有经算法计算得到的两层不同深度的图像 A 和 B 组成的双层光场的计算全息图,光场层间距由玻璃厚度及其折射率确定;经空间光调制器反射的光再次通过分光棱镜后经过傅里叶变换透镜在目标体积内产生三维的图案化光场,此处双层光场由两层图案化光场 A 和 B 组成;经光阑遮挡掉高阶衍射级次光后,在透明玻璃基底的上下表面进行同时曝光,再经后烘、显影等工艺流程后,可在玻璃基底的上下表面分别观察到图像 A 和 B 的曝光情况。

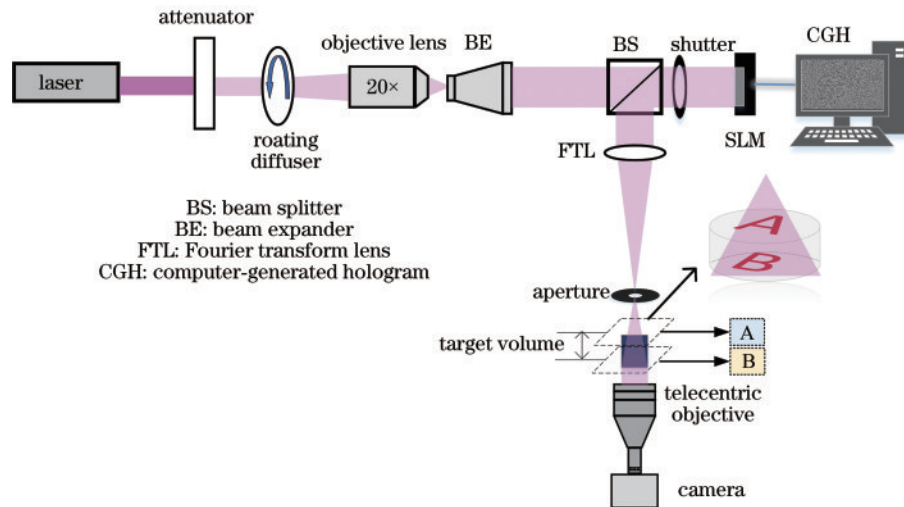


图 1 基于计算全息算法的双面光刻方法示意图

Fig. 1 Schematic of the double-sided photolithography based on computer-generated holography algorithm

3 仿真计算

3.1 基于改进 GS 算法的双层光场相位恢复

通过空间光调制器对入射激光进行调制的关键即为设计加载到空间光调制器上的全息图,本文采用的是纯相位型的空间光调制器,所以需要使用相位恢复算法得到目标光场的计算全息图。常见的二维相位恢复算法为 Gerchberg 和 Saxton 提出的 GS 算法^[14]以及一系列的改进后的类 GS 算法^[18-20],该类算法的基本原理是在全息面以及目标成像平面内通过傅里叶变换或

者菲涅耳衍射来进行正反多次迭代,使得相位趋于最优解。本文采用的改进 GS 算法^[21]则是在 GS 算法的基础上将全息面与目标平面的迭代过程改进为全息面与目标体积之间的迭代过程的算法,使用菲涅耳衍射和傅里叶变换结合的传播过程,在目标空间体积内的传播由菲涅耳衍射进行计算,而在傅里叶变换透镜 (FTL) 的前后焦面即全息面与透镜后焦面之间由傅里叶变换进行迭代计算。

3.1.1 初步计算

首先需要完成第一次衍射计算,来获得迭代优化

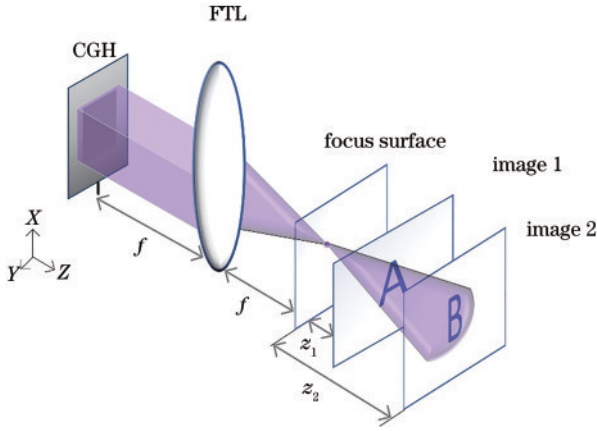


图 2 改进 GS 算法光路图

Fig. 2 Schematic of the optical path of the improved GS algorithm

的初始值。衍射计算过程中各像面的位置关系如图 2 所示,设全息面的光场复振幅为 $U(x, y)$, 像面 1 和像面 2 的复振幅分别为 $P(x, y)$ 和 $Q(x, y)$, 其中 $U(x, y)$ 为入射到空间光调制器上的平面波产生的复振幅, 表达式为

$$U(x, y) = C \exp[i\varphi(x, y)], \quad (1)$$

式中: C 为常数, 代表全息面光场的恒定振幅; $\varphi(x, y)$ 为全息面上光场的相位; (x, y) 为全息面的空间坐标。全息面与透镜后焦面之间光场满足薄透镜的傅里叶变换性质, 设 T_f 代表从全息面到透镜后焦面的传递函数, 则有 $U' = T_f U$, 透镜的后焦面的光场复振幅为 $U'(x, y)$:

$$U'(x, y) = \frac{1}{i\lambda f} \iint U(x', y') \times \exp[2\pi i(xx' + yy')/\lambda f] dx' dy', \quad (2)$$

式中: (x, y) 为透镜后焦面上的空间坐标; (x', y') 为全息面上的空间坐标; λ 为所用光源的波长; f 为傅里叶变换透镜的焦距。光场从透镜后焦面传播到像面 1 和像面 2 的过程满足菲涅耳衍射计算条件, 则像面 1 和像面 2 的复振幅表示为

$$P(x, y) = \iint \frac{U'(x', y')}{\sqrt{i\lambda z}} \exp\left\{\pi i\left[(x-x') + (y-y')\right]/\lambda z\right\} dx' dy', \quad (3)$$

$$Q(x, y) = \iint \frac{U'(x', y')}{\sqrt{i\lambda z}} \exp\left\{\pi i\left[(x-x') + (y-y')\right]/\lambda z\right\} dx' dy', \quad (4)$$

式中: (x, y) 为对应像面的空间坐标; (x', y') 为透镜后焦面上的空间坐标; z 是相应焦面到不同像面之间的纵向距离。样品的厚度为 d , 折射率为 n 时, 双层光场

在空气中的层间隔 Δz 为

$$\Delta z = \frac{d}{n}. \quad (5)$$

令 T_z 代表菲涅耳衍射的传递函数, 则有 $P = T_z U'$ 和 $Q = T_z U'$ 。由于光路具有可逆性, 如式(5), 对各像面先进行逆向菲涅耳衍射传播到焦面, 再进行傅里叶逆变换传播到全息面, 即可获得迭代优化前的相位全息图的初始相位, 表达式为

$$\varphi = \text{Arg} \left[\sum_{z \in Z} T_f^{-1} T_z^{-1} \sqrt{I_z} \exp(i\varphi_z) \right], \quad (6)$$

式中: I_z 为目标体积内各纵向深度像面处的光强; φ_z 为各像面处的相位, 此处取 $[0, 2\pi]$ 的随机相位^[22]; Arg 为取复振幅的相位角; φ 为各像面经反向衍射后在全息面上的叠加相位。

3.1.2 迭代优化

在获得初始叠加相位后, 需要在全息面和目标体积空间内的各像面之间进行正向和逆向的菲涅耳衍射和傅里叶变换的来回迭代, 从而获得最优的相位, 使得计算得到的像面振幅与目标像面振幅之间的差值收敛于一个比较小的数值, 定义均方误差和 (SSE) 为

$$S_{SE} = \frac{\sum_{z \in Z} \left[\sqrt{I_z} - \sqrt{I_z^k} \right]^2}{\sum_{z \in Z} I_z}, \quad (7)$$

式中: I_z^k 为第 k 次迭代计算后目标体积内各纵向深度像面处的光强。令 $S_{SE} < \epsilon$ ($\epsilon \rightarrow 0$)。具体的算法流程如图 3 所示。

1) 将初始叠加算法获得的初始相位与全息面的常数振幅组成 $U_0(x, y)$;

2) 通过傅里叶变换和菲涅耳衍射的过程将全息面的复振幅传播到各像面处, 并判断各像面处光场复振幅与目标振幅之间差距是否满足精度, 满足则输出步骤 1) 中的相位值为相位图, 不满足则进行步骤 3);

3) 保留计算得到的各像面处复振幅的相位, 用目标像面振幅替换其振幅;

4) 对施加振幅限制后的各像面处复振幅进行逆向菲涅耳衍射和傅里叶逆变换, 结果传播到全息面进行叠加;

5) 对叠加后的复振幅施加全息面常数振幅限制, 进入下一次循环迭代。

3.2 仿真复现双层光场

在计算得到相位全息图后, 对其进行傅里叶变换和菲涅耳衍射, 结果传播到不同的距离 z 处, 即可得到衍射再现光场。图 4 为 A、B 两层图像分别在距透镜后焦面 2 mm 及 4.06 mm 处所成的像。

进行相位全息图计算时, 傅里叶变换透镜的焦距为 50 mm, 若使用 100 mm 焦距的透镜, 则两层图像在层间距为 2.06 mm 时会出现明显串扰, 如图 5 所示。

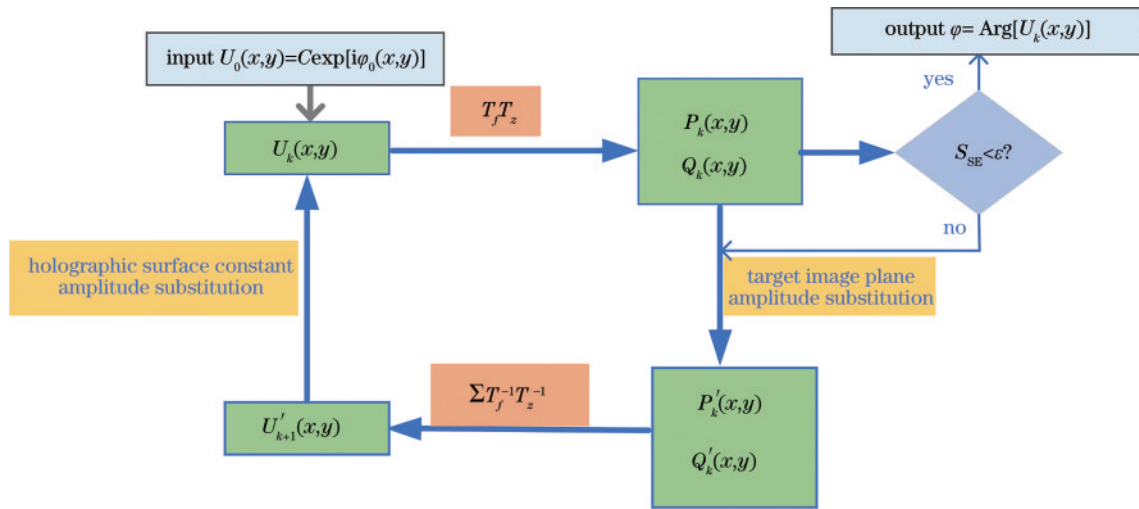


图 3 改进GS算法的迭代优化流程

Fig. 3 Flow chart of iterative optimization of improved GS algorithm

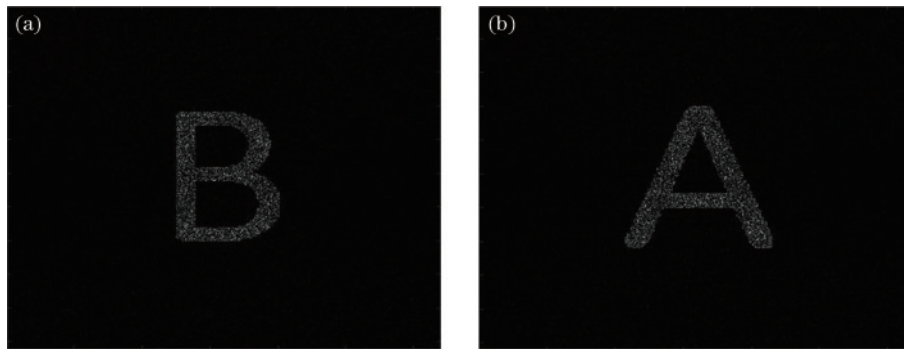


图 4 仿真计算的目标体积内不同深度处的光场再现像。(a)字母 B; (b)字母 A

Fig. 4 Reconstructed images of light field at different depths in the target volume calculated by simulation. (a) Letter B; (b) letter A

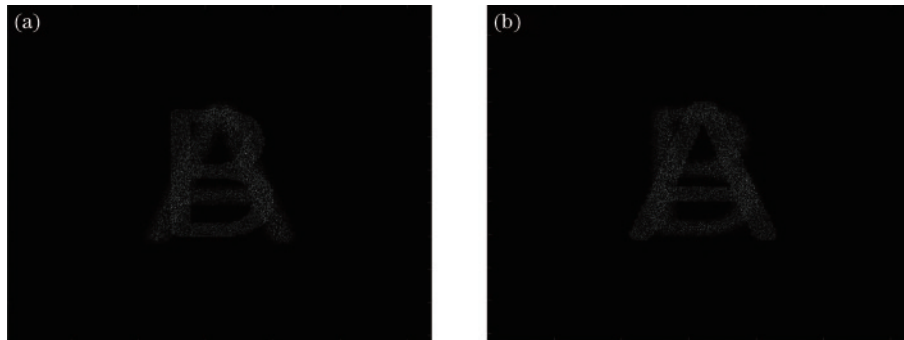


图 5 存在串扰时两层像面的仿真再现像。(a)字母 B; (b)字母 A

Fig. 5 Simulated images of two-layer image plane in the presence of crosstalk. (a) Letter B; (b) letter A

4 实验验证

4.1 系统搭建

为验证所提基于计算全息的双层光刻方法的可行性,搭建了如图 6 所示的基于计算全息的紫外光刻系统。该系统由曝光系统和光场观察系统两部分组成,曝光系统的光源采用波长为 405 nm 的紫外激光器,经衰减器、旋转漫射器、聚焦物镜、扩束器和分光棱镜后垂直入射到液晶空间光调制器上。空间光调制器为滨

松公司的 X15213-05,单像素尺寸为 12.5 μm,像素个数为 1024×1272,液晶靶面尺寸为长 15.9 mm 和宽 12.8 mm。经空间光调制器反射的光再经分光棱镜和傅里叶变换透镜后在设定的目标体积内成像。石英玻璃样品(材料为 JGS1,折射率 $n=1.4585\pm 4\times 10^{-4}$)通过夹持器固定,使光束垂直透过样品,即可在样品的前后表面同时进行图案化曝光。通过在目标体积处反复多次地移动样品夹持器下的工作台,实现阶梯曝光,可确定最佳像面的位置。使用双远心物镜、CMOS 相机

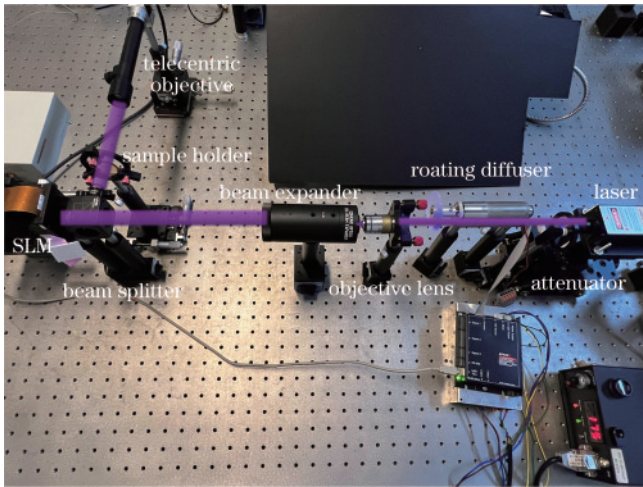


图 6 基于计算全息算法的双面光刻方法的实验系统图

Fig. 6 Diagram of experimental system of double-sided photolithography based on computer-generated holography algorithm

和工作台对目标体积内的各像面进行成像观察,通过移动 CMOS 相机下的工作台,观察目标体积内各平面成像情况。

4.2 分辨率分析

若仅考虑空间光调制器的衍射极限对分辨率的影响,则系统的分辨率和可实现的最大尺寸可表示为

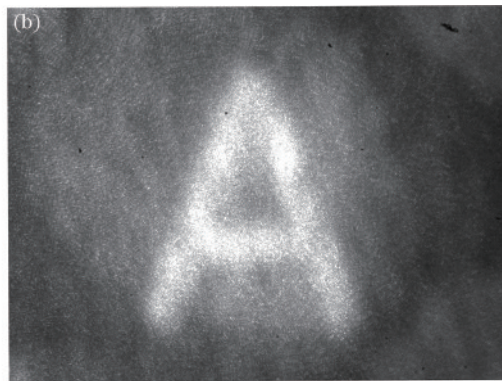


图 7 未消除散斑和杂散光时的像面。(a)存在散斑时的像面;(b)存在杂散光时的像面

Fig. 7 Image plane without eliminating speckle and stray light. (a) Image plane in the presence of speckle; (b) image plane in the presence of stray light

移动 CMOS 相机观察,图 8 分别为距离焦面 2 mm 的像面 B 和距离焦面 4.06 mm 的像面 A,可以发现面 A 和面 B 之间的串扰不明显,散斑较少,且由于离焦之后杂散光弥散,像相对杂散光的对比度高,降低了杂散光、散斑和串扰在曝光时对各像面产生的影响。

4.4 曝光实验

在确定好光场成像质量后,采用厚度为 3 mm 的石英玻璃作为基底,结合玻璃的厚度和折射率可以算出,若要在 3 mm 厚的石英玻璃的两个表面上同时成像,则在空气中生成的光场的层间距为 2.06 mm。在玻璃基底两表面涂上光敏树脂,用样品夹持器固定好

$$R_x = \lambda f / H, R_y = \lambda f / L, \Delta_{xy} = \lambda f / \rho, R_z = \lambda f^2 / H^2,$$

$$\Delta_z = \lambda f^2 / \rho H, \quad (8)$$

式中: ρ 为空间光调制器单个像素的尺寸; H 和 L 分别为空间光调制器的短边长和长边长; R_x 和 R_y 为横向 x 和 y 方向上的分辨率; R_z 为纵向分辨率,代表单层图形成像的焦深^[23]。在所使用激光器的波长及空间光调制器参数恒定的情况下,该实验系统对图像串扰影响最大的是傅里叶变换透镜的焦距,在同一层间距下,透镜焦深越短,两层图形间的串扰越小。为保证实验器材在空间摆放上的合理性,采用 5 cm 焦距的透镜进行实验,在上述波长与空间光调制器的参数下,理论可在 $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的目标体积内,单像素可实现横向分辨率为 $1.2 \text{ }\mu\text{m}$ 的两层目标图形光场的再现。

4.3 光场观察及优化

如图 7 所示,由于激光具有强相干性,激光会在像面上发生干涉,形成强烈的散斑,本实验采用旋转毛玻璃作为漫射器,来降低激光的相干性以匀化散斑。同时由于空间光调制器的像素填充率不可能达到百分之百,加上其玻璃表面的反射所形成的未调制光,会在焦面上对成像形成较强的干扰,在计算时对各像面给出一定的离焦量,使其尽可能地远离焦面,从而使杂散光弥散,降低对成像的影响。

后开始曝光,手动控制快门来控制曝光时间,曝光时间为 20 s,除去多余的光敏树脂。显微镜下观察的曝光结果如图 9 所示。

曝光后显微镜下观察到的图案最小线宽与 CMOS 相机上接收到的图案化光场的最小线宽基本吻合,曝光图案最小线宽为 $60 \text{ }\mu\text{m}$,与按照空间光调制器的衍射极限,对设计的图案的像素数进行理论计算得到的最小线宽基本相同。在纵向上,在该实验系统的参数下,按照理论计算,可实现的单层图形的焦深为 $6.48 \text{ }\mu\text{m}$,在 3 mm 层间距的条件下,层间串扰在曝光时可以忽略不计。基底上表面的图案 B 和下表面的图

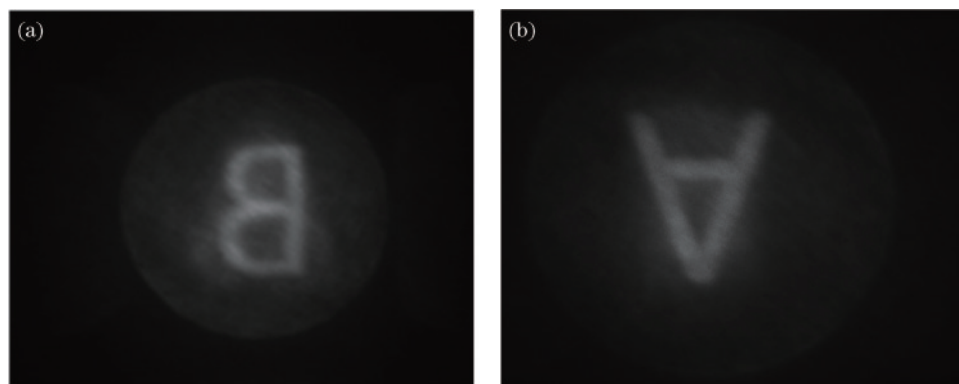


图 8 相机在不同位置观察到的各像面。(a)像面 B;(b)像面 A

Fig. 8 Image planes observed by the camera at different positions. (a) Image plane B; (b) image plane A

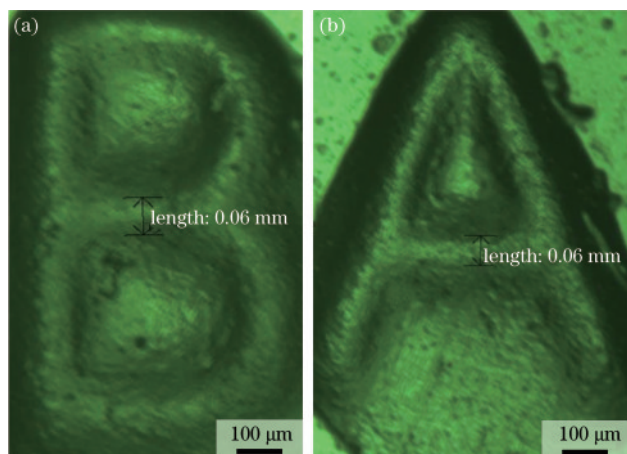


图 9 光敏树脂曝光结果。(a)基底前表面曝光结果;(b)基底后表面曝光结果

Fig. 9 Exposure results of photosensitive resin. (a) Exposure result of the front surface of the substrate; (b) exposure result of the posterior surface of the substrate

案 A 均为同一级次的衍射像,具有精确的相对位置,在双面光刻对准标记时可以降低对准误差。使用 AZ1500 系列光刻胶进行实验时,由于光刻胶在未曝光前吸收率高的性质,在基底前表面的光刻胶没有完全曝光前,光场无法完全透过前表面到达后表面,导致前表面过曝后,玻璃后表面的光刻胶才开始进行反应,无法使用同一级次的衍射像进行曝光,其前表面高级次衍射像和后表面零级像的曝光显影后的结果如图 10 所示。

在光刻工艺方面,由于光敏树脂具有流动性,可以看出光刻胶的分辨率明显优于光敏树脂,如果使用透过率更高的光刻胶,使前表面的光尽可能多地透过光刻胶到达后表面,使前后表面同一级次的像能够同时曝光且前表面不过曝,能够提高曝光图案的精度。在光路搭建方面,对激光器发出的光进行匀化处理,使分布在像面的光场更加均匀,可以提高曝光质量。在算法层面,由于所提改进 GS 算法无法得到全局最优解,故生成的光场质量受到一定影响。

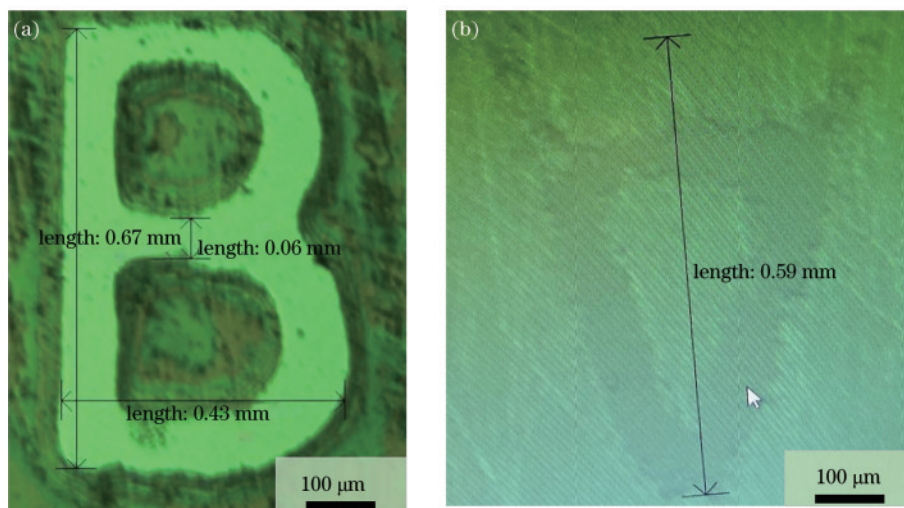


图 10 光刻胶曝光、显影后的结果。(a)基底前表面上高衍射级次曝光结果;(b)基底后表面上零级曝光结果

Fig. 10 Results after exposure and development of photoresist. (a) High diffraction order exposure on the front surface of the substrate; (b) zero order exposure on the posterior surface of the substrate

5 结 论

提出了一种基于改进 GS 算法获取双层光场的计算全息图,并将其加载到相位型液晶空间光调制器上对入射激光进行调制,以构建双层光场,在透明基底的上下表面进行同时光刻的方法。使用单个光源构建了双层图案化光场,分析并解决了光场生成时带来的杂散光、散斑及图像串扰问题,降低它们对像面曝光产生的影响。所提方法可以使用单张全息图在目标区域内进行多平面同时曝光。已在 3 mm 厚透明石英玻璃基底的双面实现一步曝光加工线宽为 60 μm 的图案,验证了所提方法单次曝光实现双面光刻的可行性。由于双面图案制作具有同轴性,即具有极高的双面对准精度,所提方法在双面微流控芯片、双面微光学元件制作等领域具有极大的潜力,同时在目标空间内生成了更多层的平面光场,未来可实现一步曝光并进行三维加工。

参 考 文 献

- [1] Mitchell J I, Park S J, Watson C A, et al. Laser direct write of silicon nanowires[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(10): 104301.
- [2] Zhang Y L, Chen Q D, Xia H, et al. Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing[J]. *Nano Today*, 2010, 5(5): 435-448.
- [3] Jia Y C, Wang S X, Chen F. Femtosecond laser direct writing of flexibly configured waveguide geometries in optical crystals: fabrication and application[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(10): 190042.
- [4] Zhang J, Tan D Z, Cao K Q, et al. Large area patterning of ultra-high thermal-stable structural colors in transparent solids[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(3): 030501.
- [5] Chen F. 3D direct writing of bandgap tunable nanocrystals in transparent material[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(1): 010502.
- [6] Chen Y F. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: a review[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 135: 57-72.
- [7] Altissimo M. E-beam lithography for micro-nanofabrication[J]. *Biomicrofluidics*, 2010, 4(2): 026503.
- [8] Joshi-Imre A, Bauerdick S. Direct-write ion beam lithography[J]. *Journal of Nanotechnology*, 2014, 2014: 1-26.
- [9] Park J S, Zhang S Y, She A L, et al. All-glass, large metalens at visible wavelength using deep-ultraviolet projection lithography[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8673-8682.
- [10] Kunwar P, Jannini A V S, Xiong Z, et al. High-resolution 3D printing of stretchable hydrogel structures using optical projection lithography[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(1): 1640-1649.
- [11] Liu X, Li R, Yuan X, et al. Fast customization of microneedle arrays by static optical projection lithography[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(50): 60522-60530.
- [12] Huang L, Liu C X, Zhang H, et al. Technology of static oblique lithography used to improve the fidelity of lithography pattern based on DMD projection lithography[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108666.
- [13] Lin W, Chen D H, Chen S C. Emerging micro-additive manufacturing technologies enabled by novel optical methods[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1827-1842.
- [14] Geisler E, Lecomperre M, Soppera O. 3D printing of optical materials by processes based on photopolymerization: materials, technologies, and recent advances[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(6): 1344-1360.
- [15] 马平, 杨春利, 胡松, 等. 新型 URE-2000S 型紫外单、双面深度光刻机研制[J]. *微纳电子技术*, 2005, 42(8): 388-391.
Ma P, Yang C L, Hu S, et al. Studies on URE-2000S-a new single & double-side UV depth-lithography system[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2005, 42(8): 388-391.
- [16] 高仰月. 双面对准曝光设备[J]. *电子工业专用设备*, 1994, 23(3): 26-28.
Gao Y Y. Double-sided quasi-exposure equipment[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 1994, 23(3): 26-28.
- [17] Yang D, Liu L P, Gong Q H, et al. Rapid two-photon polymerization of an arbitrary 3D microstructure with 3D focal field engineering[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2019, 40(8): 1900041.
- [18] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- [19] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, et al. Gerchberg-Saxton and Yang - Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 209-218.
- [20] Kuzmenko A, Iezhov P, Kim J T. Weighting iterative Fourier transform algorithm for kinoform implemented with phase-only SLM[C]//*Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2011*, May 9-11, 2011, Tokyo, Japan. Washington, D.C.: Optical Society of America, 2011: DTuC37.
- [21] Wu Y, Wang J, Chen C, et al. Adaptive weighted Gerchberg-Saxton algorithm for generation of phase-only hologram with artifacts suppression[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 1412-1427.
- [22] Makey G, Yavuz Ö, Kesim D K, et al. Breaking crosstalk limits to dynamic holography using orthogonality of high-dimensional random vectors[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 251-256.
- [23] Zhang J Z, Pégard N, Zhong J S, et al. 3D computer generated holography by nonconvex optimization[J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1306-1313.