



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111736442 B

(45) 授权公告日 2021.05.25

(21) 申请号 202010533214.0

(22) 申请日 2020.06.12

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111736442 A

(43) 申请公布日 2020.10.02

(73) 专利权人 北京理工大学
地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72) 发明人 黄玲玲 周宏强 王涌天 李晓炜

(74) 专利代理机构 北京正阳理工知识产权代理
事务所(普通合伙) 11639

代理人 张利萍

(51) Int. Cl.

G03H 1/04 (2006.01)

G03H 1/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109343321 A, 2019.02.15

CN 109459923 A, 2019.03.12

CN 107065490 A, 2017.08.18

CN 108008616 A, 2018.05.08

US 2016334758 A1, 2016.11.17

黄玲玲. 新型功能超颖表面波前调制技术的发展与应用.《红外与激光工程》.2019, (第10期),

周宏强. 深度学习算法及其在光学的应用.《红外与激光工程》.2019, (第12期),

审查员 刘益

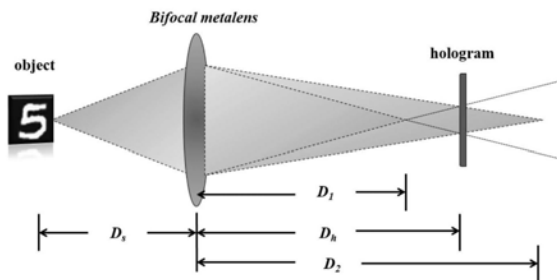
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法

(57) 摘要

本发明涉及基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法,属于微纳光学,超颖透镜领域。本发明提出了一种利用全介质双焦超颖透镜实现各向同性同轴数字全息图生成的方法。通过单次成像,结合压缩感知算法,可实现数字全息图的快速记录和再现,相比传统4f系统,大大简化了光路。同时,利用惠更斯超颖表面记录全息图的产生,其工作原理不依赖于复杂的偏振转换,因此可以提高实际的透射应用效率。对于高保真度重建,压缩重建方法可用于去除孪生图像和零阶项,并能抑制噪声。本发明对于在亚波长调制下用于白光消色差全息术和三维微/纳米活体非相干、超分辨率成像非常大的潜力。



1. 基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法, 其特征在于: 包括如下步骤:

步骤一、用于实现全息图产生的全介质双焦超颖透镜是由一系列不同几何尺寸的介质柱构成; 根据双焦透镜的相位分布和介质柱透过相位梯度构建双焦超颖透镜; 双焦超颖透镜可对入射的物光波在不同轴向位置产生两个相同的实像; 在两个像中间会产生干涉全息图, 利用CCD记录物体的全息图, 后期借助压缩重建的方法获得高质量的重建像; 所述的几何尺寸包括介质柱的高度H, 直径D, 以及双焦超颖透镜单元的周期P;

所述双焦透镜的相位分布如下所示:

$$\varphi_L = \arg \left[\sqrt{B_1} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x^2 + y^2 + f_1^2)} - f_1 \right) \right) + \sqrt{B_2} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x^2 + y^2 + f_2^2)} - f_2 \right) \right) \right] \quad (1)$$

其中两个焦点的焦距为 f_1, f_2 ; 工作波长为 λ ; B_1 表示焦距 f_1 的振幅, B_2 表示焦距 f_2 振幅; x, y 表示空间坐标, i 是虚数单位;

在物空间的所有物点满足菲涅尔传播的傍轴近似, 能够将物光波简化为轴上的一个点光源, 轴上和轴外的点光源均能够通过式(2)~(6)形成全息图并得到重建像;

通过双焦超颖透镜后产生的点源全息图表示为:

$$E = \left[G \left(\frac{1}{D_{c1} + D_h} \right) + G \left(\frac{f_2 - D_{c1}}{f_2 \cdot D_{c1}} + \frac{1}{D_h} \right) \right]^2 \quad (2)$$

定义菲涅尔传播因子 $G(b) = \exp \left[\frac{j\pi b}{\lambda} (x^2 + y^2) \right]$; b 表示距离, j 是虚数单位; 点光源在轴向位置成像, 第一个像到双焦超颖透镜的距离为 $D_{c1} = \frac{f_1 \cdot D_1}{f_1 - D_1}$; D_1 是从物空间到双焦透镜的

距离; 第二个像到双焦超颖透镜的距离为 $D_{c2} = \frac{f_2 \cdot D_{c1}}{f_2 - D_{c1}}$; 则全息图的位置到超颖透镜的距离

为: $D_h = \frac{2D_{c1} \cdot D_{c2}}{D_{c1} - D_{c2}}$; 式(2)变化为:

$$E' = I_1 + G \left[\frac{-1}{z_r} \right] + G \left[\frac{1}{z_r} \right] \quad (3)$$

I_1 是常数项, 定义为零级; $/$ 是孪生像; $/$ 是实像; 物空间平面上是一系列点光源的集合, 在全息图平面一系列的点源全息图叠加成整幅全息图像 I_g ; 则全息图像 I_g 的重建距离为:

$$z_r = \frac{(D_{c1} + D_h)(D_{c2} + D_h)}{D_{c2} - D_{c1}} \quad (4)$$

将记录的全息图利用菲涅尔衍射理论传播到 z_r 距离处得到重建像; 由于存在孪生像和零级项的干扰, 采用压缩重建的理论去除孪生像和零级项的干扰; 记录的全息图像 I_g 和理想的物信息 f 满足关系式:

$$I_g = \Phi f \quad (5)$$

其中, Φ 表示感知矩阵, 在压缩重建过程中, 通过求解式(5)的逆问题, 即得到:

$$\hat{f} = \arg \min_f \left\{ \|I_g - \Phi f\|_2^2 + \tau \|f\|_{TV} \right\} \quad (6)$$

其中, $\arg \min_f \{ \cdot \}$ 表示取函数最小值; $\|\cdot\|_2^2$ 表示1-2欧式范数; τ 表示权重系数;

$\|f\|_{TV} = \sum_i \sqrt{|\Delta_i^x f|^2 + |\Delta_i^y f|^2}$ 表示全变分约束; Δ_i^x 和 Δ_i^y 表示横向和纵向的局部微分; 通过估计全息图像 I_g 和在重构平面上重构的全息图之间的相关性, 使用压缩算法抑制孪生图像和零级项 I_1 ; 由于零级项 I_1 和孪生像趋向于引起重建像的模糊, 所以所述模糊与全息图像 I_g 的相关性较低; 同时, 来自零级项 I_1 的模糊图案不稀疏; 零级项引起的大多数估计误差被1-2欧式范数抑制; 对于孪生图像和随机噪声能够通过全变分约束去除; 全变分约束作为稀疏滤波器来抑制弥散孪生像干扰; 最后, 得到高质量的重建像;

步骤二、将介质双焦超颖透镜置于光路中, 物光波通过介质双焦超颖透镜后, 在两个不同轴向位置成两个物像, 在两个物像之间的合适位置将产生干涉全息图; 后期重建过程中借助压缩重建的方法获得清晰的物像; 这样便可实现任意微纳范围内的实物体的全息图产生和成像。

基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法,属于微纳光学,超颖透镜领域。

背景技术

[0002] 超颖表面可用于灵活地控制光的相位,幅度,偏振和其他属性,并且具有小型化和轻量化的特点。超颖表面提供了开发易于集成到紧凑平台的超薄设备的新机会。元表面在全息术,傅立叶光学,模拟计算等领域有着广泛的应用。惠更斯的超颖表面是一种重要的超颖表面,用于实现几乎100%的传输效率和灵活的相位控制。惠更斯的超表面可以充当强度相等的正交电偶极子和磁偶极子的组合。惠更斯原理指出,波前的每个点都可以视为第二个小波源。作为超表面的重要分支,超颖透镜因其平面,消色差的优点而备受关注。超颖透镜可以减小衍射透镜的体积,并且可以在超短距离内空间调制相位不连续性。因此,超颖透镜用于白光聚焦和全色成像。

[0003] 数字全息术是指使用数字传感器采集全息图的技术。通常,物波和参考波相互干扰以产生全息图,该全息图使用光学系统记录。随后,使用计算机对全息图进行处理和重建。与计算机生成的全息图相比,DH通过光学系统实时记录真实物体的全息图。因此,DH通常用于显微镜检查,3D全息存储和动态样品捕获。常规同轴全息记录方法利用衍射光学组件和/或空间光调制器(SLM)来记录数字全息图。由于同轴全息图在重建过程中,会存在孪生像和零级项的干扰。三步或四步相移技术被广泛用作消除孪生像的有效方法。然而,商用空间光调制器SLM具有特征性的微米像素尺寸,并且存在死区,该死区在没有调制的情况下反射或透射光,这可以导致零背景噪声。因此,这种方法对于实现微纳米尺寸的全息成像具有一些限制。另外,多幅全息图需要更多的记录操作,从而消耗大量时间。而且,用于多全息图记录的相移方法在机械运动或由于系统组件的干扰而引起的相位噪声的情况下,经常面临相位失配的挑战,尤其是在超光学实验系统中。

发明内容

[0004] 本发明公开的基于全介质各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法。将双焦透镜的相位编码成惠更斯超颖透镜。物光波透过双焦超颖透镜后会在不同轴向距离处成两个在焦的实像。在两个实像中间的合适的位置会有两个等大的离焦像。两个像将会有两个像干涉产生的全息图。采用CCD或者其他光电探测器件记录全息图。由于记录的全息图来自同轴干涉,重建过程中实像和孪生像不能在空间上分开。因此采用传统的菲涅尔重建的方法得到的像受到孪生像和零级的干扰。因此,采用压缩感知算法稀疏重建的特性滤除孪生像和零级的衍射散斑。介质双焦超颖透镜对于光的偏振态没有选择性,可大大提高能量利用效率。通过对入射物光波的干涉调制记录物体的全息图,具有灵活性高、微型化记录任意实物体的优势。并且,由于全息来自于物空间同一发光点被超颖透镜分光后的干涉,因此可以不依赖于光源的空间相干性。因此本发明的方法具备可记录非相干全息图等优

势。本发明的方法具有可用于白光消色差全息术和三维微/纳米活体荧光全息、非相干、超分辨率成像非常大的潜力。

[0005] 本发明目的是通过下述技术方案实现的。

[0006] 本发明公开的基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法,用于实现全息图产生的全介质超颖透镜在基底上的圆介质柱阵列构成。通过改变介质柱的半径,使平面光入射后出射光束能够在两个轴向位置产生两个不同的焦点聚焦。根据双焦透镜的相位分布确定惠更斯介质柱的几何尺寸,生成相应的加工文件。采用镀膜和电子束刻蚀的微纳加工工艺加工透射型双焦超颖透镜。介质双焦超颖透镜对于光的偏振态没有选择性,可大大提高能量利用效率。通过对入射物光波的干涉调制记录物体的全息图,具有灵活性高、微型化、可记录非相干全息图等优势。

[0007] 基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法,包括如下步骤:

[0008] 步骤一、用于实现全息图产生的全介质双焦超颖透镜是由一系列不同几何尺寸的介质柱构成。根据双焦透镜的相位分布和介质柱透过相位梯度构建双焦超颖透镜。双焦超颖透镜可对入射的物光波在不同轴向位置产生两个相同的实像。在两个像中间会产生干涉全息图,利用CCD或者其他光电器件记录物体的全息图,后期可借助压缩重建的方法获得高质量的重建像。所述的几何尺寸包括介质柱的高度H,直径D,以及双焦超颖透镜单元的周期P。

[0009] 所述双焦透镜的相位分布如下所示:

$$[0010] \quad \varphi_L = \arg \left[\sqrt{B_1} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x^2 + y^2 + f_1^2)} - f_1 \right) \right) + \sqrt{B_2} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x^2 + y^2 + f_2^2)} - f_2 \right) \right) \right] \quad (1)$$

[0011] 其中两个焦点的焦距为 f_1, f_2 。工作波长为 λ 。 B_1 表示焦距 f_1 的振幅, B_2 表示焦距 f_2 振幅。 x, y 表示空间坐标, i 是虚数单位。

[0012] 在物空间的所有物点满足菲涅尔传播的傍轴近似,因此能够将物光波简化为轴上的一个点光源,轴上和轴外的点光源均能够通过式(2)~(6)形成全息图并得到重建像。

[0013] 通过双焦超颖透镜后产生的点源全息图表示为:

$$[0014] \quad E = \left| G \left(\frac{1}{D_{c1} + D_h} \right) + G \left(\frac{f_2 - D_{c1}}{f_2 D_{c1}} + \frac{1}{D_h} \right) \right|^2 \quad (2)$$

[0015] 定义菲涅尔传播因子 $G(b) = \exp \left[\frac{j\pi b}{\lambda} (x^2 + y^2) \right]$ 。 b 表示距离, j 是虚数单位;点光源

在轴向位置成像,第一个像到双焦超颖透镜的距离为 $D_{c1} = \frac{f_1 D_1}{f_1 - D_1}$ 。 D_1 是从物空间到双焦透

镜的距离;第二个像到双焦超颖透镜的距离为 $D_{c2} = \frac{f_2 D_{c1}}{f_2 - D_{c1}}$ 。则全息图的位置到超颖透

镜的距离为: $D_h = \frac{2D_{c1} D_{c2}}{D_{c1} - D_{c2}}$ 。式(2)变化为:

$$[0016] \quad E' = I_1 + G \left[\frac{-1}{z_r} \right] + G \left[\frac{1}{z_r} \right] \quad (3)$$

[0017] I_1 是常数项,定义为零级。 $G[1/z_r]$ 是孪生像。 $G[-1/z_r]$ 是实像。物空间平面上是一系列点光源的集合,在全息图平面一系列的点源全息图叠加成整幅全息图像 I_g 。则全息图像 I_g 的重建距离为:

$$[0018] \quad z_r = \frac{(D_{c1} + D_h)(D_{c2} + D_h)}{D_{c2} - D_{c1}} \quad (4)$$

[0019] 将记录的全息图利用菲涅尔衍射理论传播到 z_r 距离处得到重建像。由于存在孪生像和零级项的干扰,采用压缩重建的理论去除孪生像和零级项的干扰。记录的全息图像 I_g 和理想的物信息 f 满足关系式:

$$[0020] \quad I_g = \Phi f \quad (5)$$

[0021] 其中, Φ 表示感知矩阵,在压缩重建过程中,通过求解式(5)的逆问题,即得到:

$$[0022] \quad \hat{f} = \arg \min_f \left\{ \|I_g - \Phi f\|_2^2 + \tau \|f\|_{TV} \right\} \quad (6)$$

[0023] 其中, $\arg \min_f \{ \cdot \}$ 表示取函数最小值。 $\|\cdot\|_2^2$ 表示1-2欧式范数。 τ 表示权重系数。

[0024] $\|f\|_{TV} = \sum_i \sqrt{|\Delta_i^x f|^2 + |\Delta_i^y f|^2}$ 表示全变分约束。 Δ_i^x 和 Δ_i^y 表示横向和纵向的局部微分。

通过估计全息图像 I_g 和在重构平面上重构的全息图之间的相关性,使用压缩算法抑制孪生图像和零级项 I_1 。由于零级项 I_1 和孪生像趋向于引起重建像的模糊,所以所述模糊与全息图像 I_g 的相关性较低。同时,来自零级项 I_1 的模糊图案不稀疏。因此,零级项引起的大多数估计误差被1-2欧式范数抑制。对于孪生图像和随机噪声能够通过全变分约束去除。全变分约束作为稀疏滤波器来抑制弥散孪生像干扰。最后,得到高质量的重建像。

[0025] 步骤二、将介质双焦超颖透镜置于光路中,物光波通过介质双焦超颖透镜后,在两个不同轴向位置成两个物像,在两个物像之间的合适位置将产生干涉全息图。后期重建过程中借助压缩重建的方法获得清晰的物像。这样便可实现任意微纳范围内的实物体的全息图产生和成像。

[0026] 有益效果

[0027] 1、本发明公开的基于各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法。本发明一种利用双焦超颖透镜实现各向同性的同轴数字全息图生成的方法。本发明的方法基于惠更斯超颖透镜原理采用全像素实现双焦点聚焦,具有透射效率高的优点。

[0028] 2、另外,全息图的产生具有各向同性的优势,不依赖于入射光的偏振态,因此可以提高器件的实际的应用前景。压缩重建方法可用于快速去除孪生图像和零阶项,并抑制噪声。

[0029] 3、本发明公开的基于全介质双焦超颖透镜原位产生全息图的方法,该方法可用于白光/非相干光消色差全息术和三维微/纳米活体非相干、超分辨率成像非常大的潜力。

附图说明

[0030] 图1是本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图及重建示意图;

[0031] 图2是本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的方法同轴全息产生的原理图;

[0032] 图3是本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的结构单元和设计示意图;其中,图a为本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的方法单元结构;图b为本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的透射相位与振幅图;图c为本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的惠更斯结构相位结构示意图;图d为本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的实验光路图;

[0033] 图4是本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的实物图和轴向强度测量图;其中,图a为本发明的超颖透镜扫描电子显微镜俯视图,b为本发明的超颖透镜扫描电子显微镜45侧视图;图c为本发明的模拟轴向聚焦光强图;图d为本发明的实验测量轴向聚焦光强图;

[0034] 图5是本发明的基于双焦超颖透镜单次曝光产生各向同性全息图的方法产生的全息图(a-g)及菲涅尔重建像(h-n)和压缩重建像(o-u)。

具体实施方式

[0035] 下面结合附图和实施例,对本发明方法做进一步详细说明。

[0036] 实施例1

[0037] 实施例公开的基于全介质各向同性双焦超颖透镜的单次曝光产生全息图的方法,过程如附图1所示,在800nm波长的光照射下对出射光束的相位进行调控,具体实现方法如下:

[0038] 步骤一:用于实现全息图产生的全介质双焦超颖透镜是由一系列不同几何尺寸的介质硅柱构成。根据优化得到的双焦透镜的相位分布和扫描选取的全介质柱(非晶硅,Si)构建双焦超颖透镜。双焦超颖透镜可对入射的物光波在不同轴向位置产生两个相同的实像。在两个像中间会产生干涉全息图,利用CCD或者其他光电器件记录物体的同轴全息图,后期可借助压缩重建的方法获得高质量的重建像。所述的几何尺寸包括介质硅柱的高度H,直径D,以及双焦超颖透镜像素单元的周期P。

[0039] 首先,基于有限时域差分方法确定介质硅柱的高度H,双焦超颖透镜像素单元的周期P,扫描介质硅柱的直径D。针对入射工作波长800nm,实施例所用圆介质硅柱的折射率为 $n_{Si}=3.693+0.006i$ 。通过扫描介质硅柱的直径的D得到沿x轴或y轴方向的线偏振光透过介质硅柱的电场分布情况,由扫描的电场分布数据得到同偏振出射方向通过不同尺寸的介质硅柱后的相位 ϕ_s 以及透射强度 t_s ,选取八个不同直径的介质硅柱,使相位 ϕ_s 可以覆盖 $0\sim 2\pi$ 等间隔分布,同时透射强度 t_s 应尽量高,接近100%。超颖透镜的结构单元选好之后,将八个介质柱对应优化的双焦透镜相位离散成 2π 范围内的八阶相位分布。不同尺寸的戒指硅柱分别对应双焦透镜的八阶相位点。这样便得到双焦超颖透镜。物光波通过双焦超颖透镜后会在轴向方向的两个不同距离成实像。原理如附图2所示。在两个实像中间的合适位置,两个等大的离焦像会进行干涉,形成全息图。采用CCD或者其他光学元件记录全息图。将记录的全息图采用压缩重建的方法得到高质量的再现像。

[0040] 步骤二:生成的全介质双焦超颖透镜加工文件,

[0041] 根据步骤一确定的几何尺寸生成加工文件。确定介质硅柱的直径范围在120nm-190nm,如附图3a、b、c、d所示。相位满足 $0-2\pi$ 的相位调制,并且其透过强度接近100%。将双

焦透镜的相位分布离散成八阶的相位图。将介质硅柱按照八阶相位图一一排布成全介质双焦超颖透镜,生成相应超颖透镜的加工文件。

[0042] 步骤三:利用步骤二所得超颖透镜的加工文件,通过介质硅镀膜和电子束刻蚀的微纳加工方法,制备透射型介质超颖表面。通过对物光波的调制和成像在两个实像中间约1/2处的位置记录干涉全息图,后期通过压缩重建的方法得到高质量的重建像。

[0043] 步骤四:全息图记录和压缩重建,

[0044] 将加工好的全介质双焦超颖透镜放置实验光路中,如附图4a、b、c、d所示。实验之前采用平面光照明,测量所加工的全介质双焦超颖透镜的焦距。设计的焦距为1400和1600 μm 。而测量的焦距分别为1340和1580 μm 。实验测量的焦距与预期的焦距大小基本吻合。误差可能来源于加工精度和实验测量的误差等。将标准分辨率板作为物体,放置于双焦超颖透镜前方D1距离处,微调整分辨率板与全介质双焦超颖透镜和CCD的位置,找到轴向位置的两个像,并在两个像中间约1/2处位置记录全息图。全息应有清晰地干涉条纹。用面探测器件(如CCD)记录清晰的数字全息图。将采集的全息图借助计算机采用压缩感知的算法,在合适的衍射传播距离处得到重建像。压缩重建算法可以有效地抑制同轴全息图在重建过程中孪生像和零级项以及其他随机噪声。因为本发明的方法对记录位置的具有极高的容忍度和稳定性。本实施例中,微调了实验中CCD的前后位置,记录了多幅全息图。最后得到高质量的重建结果如附图5所示。图5的(a-g)为记录的全息图,图5的(h-n)为传统菲涅尔算法重建的结果,图5的(o-u)为压缩重建结果。对比传统菲涅尔重建的结果和压缩重建结果发现,压缩重建能够有效地抑制重建过程中的孪生像和零级项噪声的干扰,从而得到高质量的重建像。为表征本器件的成像能力,本方法设计的实验重建的点源的半高全宽是2.58 μm 。另外记录的全息图是分辨率板的第五组阿拉伯数字1至6。利用相同的方法对全息进行重建(重建的线宽:4.83 μm ,4.19 μm ,3.54 μm ,3.87 μm ,3.22 μm ,2.9 μm)。

[0045] 以上所述的具体描述,对发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

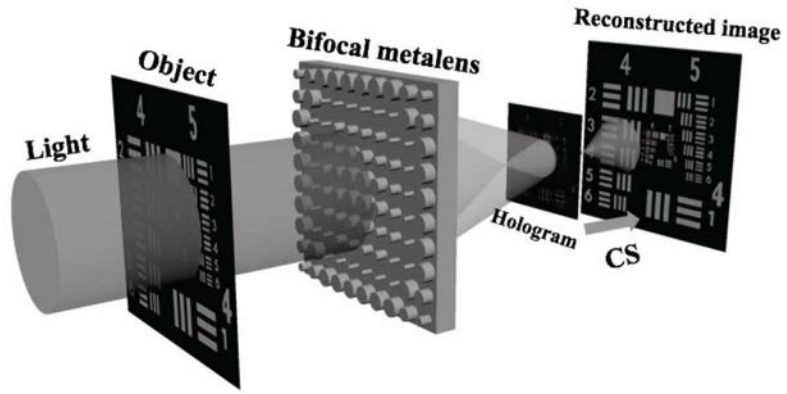


图1

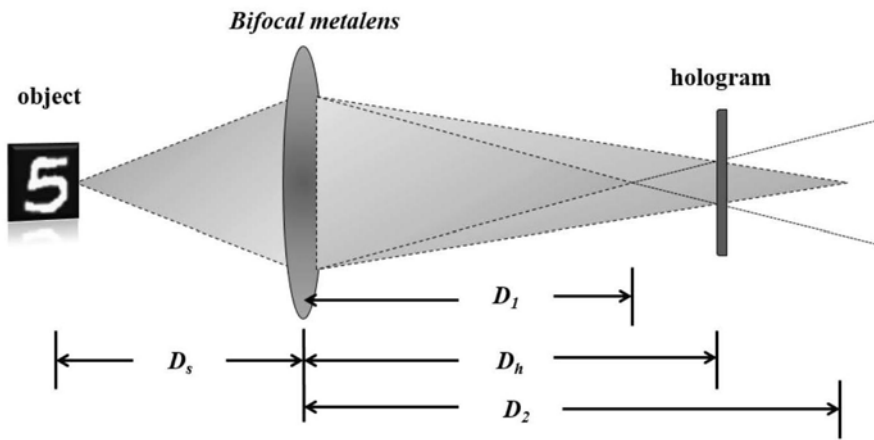


图2

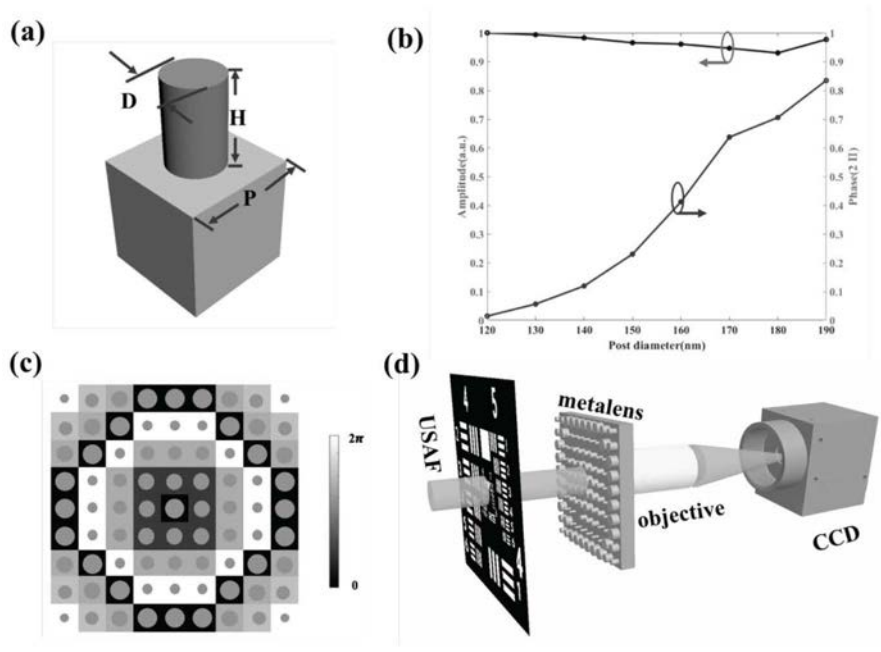


图3

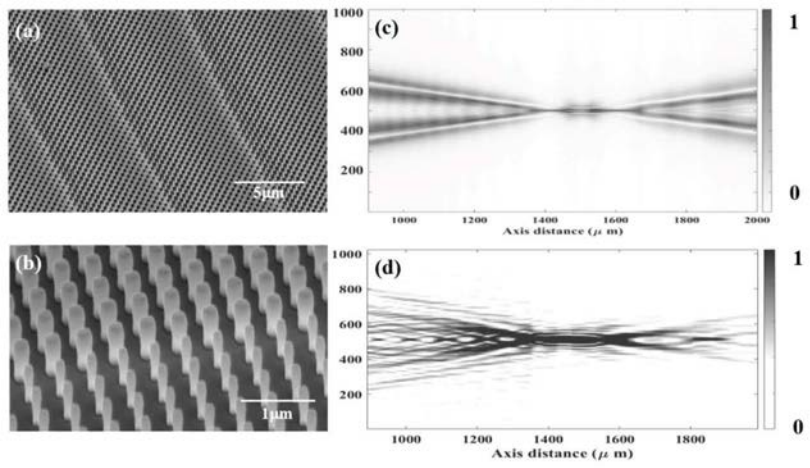


图4

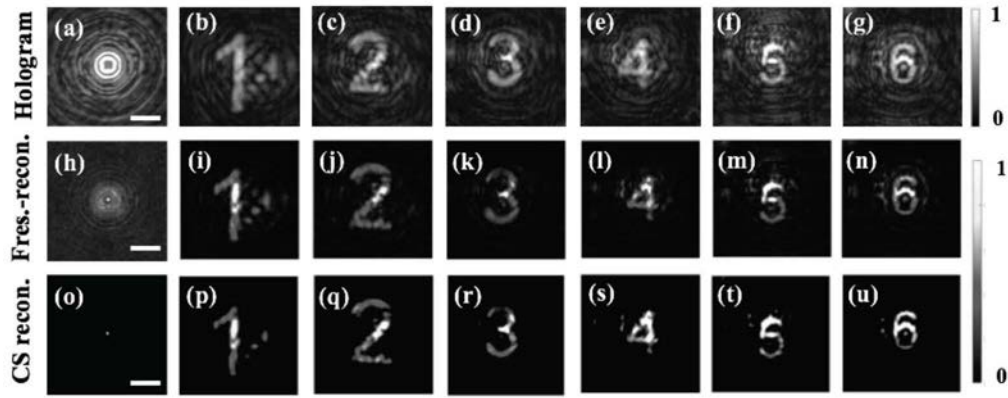


图5