

利用级联超构表面同时测量径向角位移和纵向线位移

张振宇 张伟 刘睿 张婧英 李文昊

Simultaneous measurement of radial angular displacement and longitudinal linear displacement with cascade metasurfaces

ZHANG Zhen-yu, ZHANG Wei, LIU Rui, ZHANG Jing-ying, LI Wen-hao

引用本文:

张振宇, 张伟, 刘睿, 张婧英, 李文昊. 利用级联超构表面同时测量径向角位移和纵向线位移[J]. *中国光学*, 2025, 18(5): 1016-1026. doi: 10.37188/CO.2025-0033

ZHANG Zhen-yu, ZHANG Wei, LIU Rui, ZHANG Jing-ying, LI Wen-hao. Simultaneous measurement of radial angular displacement and longitudinal linear displacement with cascade metasurfaces[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1016-1026. doi: 10.37188/CO.2025-0033

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向偏振成像的超构表面研究进展

Recent advances in metasurfaces for polarization imaging

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 973 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0234>

人工原子间耦合: 超构表面调控电磁波的新自由度

Coupling between Meta-atoms: a new degree of freedom in metasurfaces manipulating electromagnetic waves

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 717 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0030>

超构表面的振幅调控及其功能器件研究进展

Research development of amplitude-modulated metasurfaces and their functional devices

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 886 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0017>

纳流通道-谐振腔耦合结构测量荧光物质微位移

Nanofluidic channel-resonant cavity structure for measuring micro-displacement of fluorescent substances

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 145 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0076>

微细正交切削过程原位观测中位移补偿方法

Displacement compensation method for in-situ observation of micro orthogonal cutting process

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 476 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0032>

基于双各向异性超构表面的多样化表面波

Diverse surface waves supported by bianisotropic meta surfaces

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 782 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0098>

文章编号 2097-1842(2025)05-1016-11

利用级联超构表面同时测量 径向角位移和纵向线位移

张振宇^{1,2}, 张 伟¹, 刘 睿^{1,2}, 张婧英^{1,2}, 李文昊^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了解决现有超构表面位移测量技术无法同时测量多个物理量的问题, 本文设计了一种超构表面级联结构, 可用于同时测量径向角位移和纵向线位移。首先, 根据级联超构表面对圆偏振光的联合相位调制阐述了位移测量的工作原理。接着, 利用琼斯传输矩阵分析了相位延迟携带的位移信息, 推导了角位移与线位移的数学表征。然后, 以设计目标作为约束条件优化单元结构参数, 构建超构表面模型。最后, 采用时域有限差分法对超构表面结构进行模拟, 验证方法可行性并分析器件测量性能。结果表明, 在 633 nm 的工作波长下, 角位移灵敏度为 0.9716, 理论分辨率为 34.27 μrad , 线位移灵敏度为 0.0041, 理论分辨率为 8.12 nm。该方法提高了超构表面位移测量技术的测量自由度, 并有望进一步扩展到六维, 以此实现对待测目标的完全姿态确定。

关键词:超构表面; 角位移; 线位移; 位移测量; 多物理量

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0033 CSTR: 32171.14.CO.2025-0033

Simultaneous measurement of radial angular displacement and longitudinal linear displacement with cascade metasurfaces

ZHANG Zhen-yu^{1,2}, ZHANG Wei¹, LIU Rui^{1,2}, ZHANG Jing-ying^{1,2}, LI Wen-hao^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: liwh@ciomp.ac.cn*

Abstract: To solve the problem of existing metasurface displacement measurement techniques unable to measure multiple physical quantities simultaneously, this paper proposes a metasurface cascade structure that

收稿日期: 2025-03-03; 修订日期: 2025-03-26

基金项目: 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队项目 (No. YSBR-103); 中国科学院青年创新促进会 (No. 2021220); 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项 (No. 2024SYHZ0018); 吉林省科技发展计划科技条件与平台建设计划 (No. 20220505001ZP)

Supported by CAS Project for Young Scientists in Basic Research (No. YSBR-103); Chinese Academy of Sciences Youth Innovation Promotion Association (No. 2021220); Jilin Province and CAS Science and Technology Cooperation in High-Tech Industrialization of Special Projects (No. 2024SYHZ0018); Jilin Provincial Science and Technology Development Program of Science and Technology Conditions and Platform Construction Program (No. 20220505001ZP)

can measure radial angular displacement and longitudinal linear displacement simultaneously. First, the working principle of displacement measurement is described according to the joint phase modulation of circular polarized light by a cascade metasurface. Secondly, the displacement information carried by the phase delay is analyzed using the Jones transport matrix, and the angular and linear displacements are mathematically characterized. Then, the design objective is used as a constraint to optimize unit structure parameters and create metasurface models. Finally, the finite-difference time-domain method is used to simulate the metasurface structures, validate the method's feasibility, and evaluate the device's measurement performance. The results show that the angular displacement sensitivity is 0.9716 with a theoretical resolution of 34.27 μrad , and the linear displacement sensitivity is 0.0041 with a theoretical resolution of 8.12 nm at the working wavelength of 633 nm. The measurement freedom of metasurface displacement measurement technology is improved by this method. It is hoped to be further expanded to six dimensions so that the measured target's entire attitude can be determined.

Key words: metasurface; angular displacement; linear displacement; displacement measurement; multiple physical quantities

1 引言

光学测量方法具有精度高、非接触、测速快等优点,广泛应用于机械制造、量子物理、半导体工业、航空航天等领域^[1-4]。位移测量是光学测量中的一个重要测量分支,按照被测物理量可进一步细分为角位移测量和线位移测量。例如,导航系统需要通过俯仰角、偏航角和滚转角来确定设备的运动状态^[5];精密制造设备的刀具需要线位移传感器进行精准定位,对加工品进行切削^[6]。传统的角位移测量方案是自准直仪和角度干涉仪^[7-8]。自准直仪通过光电探测器接收反射光束并检测其位置,从而确定目标的角位移;角度干涉仪基于干涉测量原理,通过干涉条纹相移计算角位移值。而线位移测量常用仪器为激光干涉仪和光栅尺^[9-10]。激光干涉仪通过分振幅法产生两路或多路相干光进行干涉,并根据由光程差的变化引起的干涉条纹相移计算线位移值;光栅尺则是基于多普勒频移原理,通过求解相位差变化实现线位移的测量。

近些年来,研究人员相继对以上技术手段进行改进。Chen等人使用飞秒激光和衍射光栅代替传统的单色激光和反射镜,利用不同频率光具有唯一确定的衍射光束,实现了分辨率达1.08角秒的绝对角度测量^[11];Zhou等人将二维光栅结合角锥棱镜,配合光学频率梳(OFC)产生五束衍射

光,通过解析相位谱实现测量精度达0.088角秒的角度测量^[12]。Zhang等人从工艺方面进行改进,他们利用扫描反应离子束刻蚀技术制作具有大尺寸和偏振无关的二维光栅,可用于高分辨率、长量程和多自由度的光栅位移测量^[13];Zhou提出了一种双向Littrow双光栅干涉测量系统,通过提高光学细分的倍数实现X方向2 nm分辨率的位移测量,相比传统光栅干涉测量系统,误差降低了30%,分辨率提高了50%^[14]。然而,上述方案通常具有复杂的光路,对环境稳定性提出了很高要求;而复杂的光路又必然用到诸多的光学元件和电子元器件,从而导致系统体积大,无法小型化。在显微成像和芯片制造系统中,其将众多组成部件集成在一起,留给测量系统的空间十分有限,这使得传统的光学位移测量手段存在局限性。

超构表面具有亚波长尺寸的特征结构,能够精确调控光的偏振、相位、振幅等信息,被广泛应用于波-信息-物质之间的相互作用和控制^[15-19],为环境稳定性和系统小型化的高精度位移测量提供了新的发展方向。例如,Yue等人利用超构表面和线偏振片产生空间强度呈花瓣状分布的光束,通过跟踪花瓣质心在空间中的移动,在180°测量范围内实现灵敏度为0.01°的角位移测量^[20];Zhang等人设计了像素编码超构表面,配合光频梳将不同频率的光对应于不同的反射角,该方法相当于利用光频梳改进的自准直仪^[21];Zang等人设计了可用于横向位移测量的偏振编码超构表面,将超

构表面的横向位移通过几何相位编码到出射光的偏振方向变化中,根据马吕斯定律读出结果。该方法具有纳米级的分辨率,不确定度在 100 皮米量级^[22]。Cao 等人设计了一种基于传播相位的双焦点超透镜,通过测量两个焦点附近光强比值的变化,实现了纵向线位移测量,但是受焦深限制,测量范围十分有限^[23]。上述研究利用超构表面只实现了对角位移或线位移的单一测量,但在许多情况下,需要对目标的角位移和线位移进行同时测量。

为解决上述问题,本文提出将多个介质超构表面进行级联,实现对径向角位移和纵向线位移的同时测量。设计思路基于偏振光的相干叠加,选用 3 个超构表面。令一个超构表面将入射光分为两束偏振态相互正交的子光束,使其再经过一个与之完全相同的超构表面,这样在透射和传播过程中角位移和线位移信息将被赋予到光束的相位延迟中。第三个超构表面用于将不同偏振态的光在空间上分离。前两个超构表面之间的径向角位移和纵向线位移可以根据光束相干叠加后的强度变化来确定。基于以上思路建立数学模型,开展仿真测试,验证该方法的角位移和线位移测量能力。对于角位移,测量灵敏度为 0.9716,理论分辨率为 34.27 μrad ;对于线位移,测量灵敏度为 0.0041,理论分辨率为 8.12 nm。该方法提高了超构表面位移测量方法的测量自由度,并有望扩展

至更高的测量维度。

2 位移测量装置的设计及其原理

2.1 位移测量装置的设计

整个超构表面位移传感装置示意图如图 1 所示,测量装置包含光源模块、超构表面位移传感模块和探测模块 3 个部分。其中,光源模块使用工作波长为 633 nm 的 He-Ne 激光器发出激光,并经过准直器准直为平行光出射,再经过与 X 轴夹角为 45°的半波片后变为偏振态为 $[1,1]^T$ 的线偏振光,然后使用偏振分束棱镜 (PBS) 分为水平偏振态的透射光 $[1,0]^T$ 和垂直偏振态 $[0,1]^T$ 的反射光,两束光的能量均分。随后两束光分别经过两个声光调制器 (AOM),声光调制器连接射频信号源,使用软件端控制其射频信号的输出来控制声光调制器快速交替运作,作为光开关来使用,以实现水平线偏振光和垂直线偏振光的交替出射。在 AOM 后面放置另一偏振分束棱镜并由一块四分之一波片转换光的偏振态,当第一个声光调制器打开时,水平线偏振光输出并被转换为右旋圆偏振光;当第二个声光调制器打开时,垂直线偏振光输出并被转换为左旋圆偏振光。从而可自由控制使不同旋向的圆偏振光作为输入光,并照射到后续的超构表面位移传感模块。

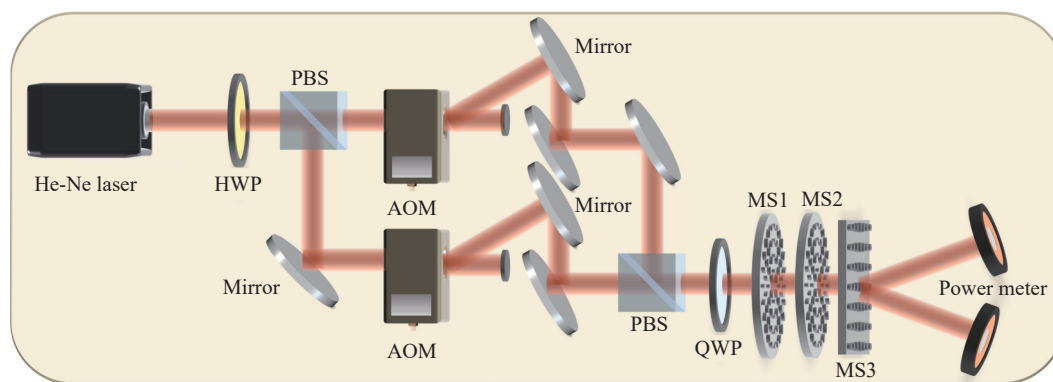


图 1 超构表面位移传感装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the metasurface displacement sensing device

超构表面位移传感模块由三块超构表面级联构成,按照光束经过它们的顺序分别记作第一超构表面,第二超构表面和第三超构表面。三块超构表面均利用几何相位对光场进行调控。其中,第一超构表面和第二超构表面采用完全相同的设计,其作用是实现空间位置的编码。当圆偏振光

入射到第一超构表面后变为两束光,一束光保持与入射光相同的偏振态,另一束光则与入射光的偏振态正交,通过这个过程就实现了对空间位置的编码。两束透射光继续向前传输经过第二个超构表面。在经过第二个超构表面后,两束光各自分别再次分成两束光。这四束光按照其偏振态的

变化进行命名,分别为共-共极化光(co-co),共-交叉极化光(co-cross),交叉-共极化光(cross-co),交叉-交叉极化光(cross-cross)。这四束光紧接着经过第三个超构表面,第三个超构表面设计为圆偏振分束超构表面(circular polarization beam splitter metasurface, CPBSM)。它将左旋圆偏振光和右旋圆偏振光赋予符号相反的梯度相位,使其分别沿原光轴向两侧偏折传输,因此,四束光中两束左旋圆偏振光和两束右旋圆偏振光实现了分离传播。由于沿同一方向传播的光具有相同的偏振态,且具有相位差,因此会产生相干叠加的现象,即发生干涉。通过探测模块对相干叠加后光束的强度进行测量,可以实现空间位置变化量的解码,计算出第二超构表面相对第一超构表面产生的径向角位移和纵向线位移。

2.2 技术原理

为了详细阐述角位移和线位移测量的实现过程,使用琼斯传输矩阵来描述超构表面对光束的调控作用,其工作示意图如图2所示。

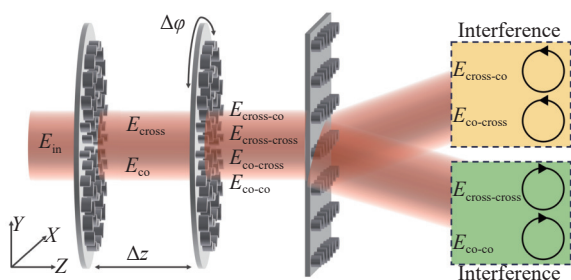


图2 位移测量超构表面的工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of the metasurface for displacement measurement

对于第一超构表面,要使其实现所描述的功能,其琼斯矩阵 \mathbf{J}_1 应该写作:

$$\mathbf{J}_1 = \eta_1 \mathbf{I} + \eta_2 (e^{i\varphi} |\mathbf{R}\rangle\langle \mathbf{L}| + e^{-i\varphi} |\mathbf{L}\rangle\langle \mathbf{R}|) \quad (1)$$

其中 \mathbf{I} 是单位矩阵,表示未受到超构表面的相位调控,与入射光保持相同传播方向和相同偏振态的光, η_1 和 η_2 是复振幅系数,表示对光束振幅的调制。 $e^{i\varphi}$ 和 $e^{-i\varphi}$ 代表几何相位的调控效果, l 是拓扑荷数, φ 是空间方位角,该因子代表和空间方位角相关的涡旋相位。 $|\mathbf{R}\rangle = [1 \ i]^T$ 和 $|\mathbf{L}\rangle = [1 \ -i]^T$ 分别代表左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, $\langle \mathbf{R}|$ 和 $\langle \mathbf{L}|$ 是它们的共轭转置矩阵。 $|\mathbf{R}\rangle\langle \mathbf{L}|$ 和 $|\mathbf{L}\rangle\langle \mathbf{R}|$ 表示圆偏振光之间的偏振态转化,由此说明这部分

出射光的偏振态与入射光的偏振态正交,且附带了几何相位。根据式(1),当一束右旋圆偏振光 $|\mathbf{R}\rangle$ 入射到第一超构表面后,出射光 \mathbf{E}_{out_1} 的形式为:

$$\mathbf{E}_{out_1} = \mathbf{J}_1 |\mathbf{R}\rangle = \eta_1 |\mathbf{R}\rangle + \eta_2 e^{-i\varphi} |\mathbf{L}\rangle \quad (2)$$

根据式(2)可知,右旋圆偏振光 $|\mathbf{R}\rangle$ 入射后的出射光包含两部分:一部分保持右旋圆偏振,称作共极化分量,复振幅被调制为原来的 η_1 倍;另一部分变为左旋圆偏振,称作交叉极化分量,复振幅被调制为原来的 η_2 倍,且附带了 $e^{-i\varphi}$ 的涡旋相位。同理,当一束左旋圆偏振光入射到第一超构表面后,其出射光的形式为:

$$\mathbf{E}_{out_1} = \mathbf{J}_1 |\mathbf{L}\rangle = \eta_1 |\mathbf{L}\rangle + \eta_2 e^{i\varphi} |\mathbf{R}\rangle \quad (3)$$

出射光同样包含两部分:一部分是保持原偏振态的共极化分量,另一部分是偏振态发生转换并附带几何相位的交叉极化分量。

继续以右旋圆偏振光作为入射光进行分析。 \mathbf{E}_{out_1} 在空间中传播,考虑其传播到某一位置 z 时,其光场的分布情况可以表示为:

$$\mathbf{E}_{out_1} = \eta_1 e^{ikz} |\mathbf{R}\rangle + \eta_2 e^{ikz} e^{-i\varphi} |\mathbf{L}\rangle \quad (4)$$

其中 k 表示总波矢, k_z 表示交叉极化分量的光沿 z 方向传播的波矢。第二超构表面与第一超构表面采用完全相同的设计,因此第二超构表面的琼斯矩阵 \mathbf{J}_2 初始形式与 \mathbf{J}_1 相同。当第二超构表面相对第一超构表面具有 $\Delta\varphi$ 的角位移和 Δz 的线位移时,穿过第二超构表面后的透射光 \mathbf{E}_{out_2} 可以表示为:

$$\mathbf{E}_{out_2} = \mathbf{J}_2(\varphi + \Delta\varphi) \mathbf{E}_{out_1}(\Delta z) \quad (5)$$

对公式(5)进行展开, \mathbf{E}_{out_1} 中共极化分量的光穿过第二超构表面后变为两束光,分别表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{co-co} = \eta_1^2 e^{ik\Delta z} |\mathbf{R}\rangle \\ \mathbf{E}_{co-cross} = \eta_1 \eta_2 e^{ik\Delta z} e^{-i[l(\varphi - \Delta\varphi) + 2\Delta\varphi]} |\mathbf{L}\rangle \end{cases} \quad (6)$$

其中,下角标表示这部分光场分量的偏振态转化情况,co表示共极化,cross表示交叉极化。 \mathbf{E}_{out_1} 中交叉极化分量的光穿过第二超构表面后,同样变为两束光,分别表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{cross-co} = \eta_1 \eta_2 e^{ik\Delta z} e^{-i\varphi} |\mathbf{L}\rangle \\ \mathbf{E}_{cross-cross} = \eta_2^2 e^{ik\Delta z} e^{-i(l-2)\Delta\varphi} |\mathbf{R}\rangle \end{cases} \quad (7)$$

$\mathbf{E}_{\text{out}_2}$ 随后经过第三超构表面, 第三超构表面会将左/右旋圆偏振光完全转换为对应的交叉极化圆偏振光, 并且附带 $\pm e^{ik_x x}$ 的线性相位梯度, 第三超构表面的琼斯矩阵 \mathbf{J}_3 形式为:

$$\mathbf{J}_3 = \eta_2 (e^{ik_x x} |\mathbf{R}\rangle \langle \mathbf{L}| + e^{-ik_x x} |\mathbf{L}\rangle \langle \mathbf{R}|) \quad (8)$$

由于线性相位梯度的作用, 透射光中的左/右旋圆偏振光在空间上发生分离, 并且沿着原光轴的两侧对称传播, 将其按传播方向重新分类, 写作:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\text{co-co-cross}} = \eta_1^2 e^{ik\Delta z} e^{-ik_x x} |\mathbf{L}\rangle \\ \mathbf{E}_{\text{cross-cross-cross}} = \eta_2^2 e^{ik\Delta z} e^{-i(l-2)\Delta\varphi} e^{-ik_x x} |\mathbf{L}\rangle \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\text{cross-co-cross}} = \eta_1 \eta_2 e^{ik\Delta z} e^{-il\varphi} e^{ik_x x} |\mathbf{R}\rangle \\ \mathbf{E}_{\text{co-cross-cross}} = \eta_1 \eta_2 e^{ik\Delta z} e^{-i[l*(\varphi-\Delta\varphi)+2\Delta\varphi]} e^{ik_x x} |\mathbf{R}\rangle \end{cases} \quad (10)$$

由于左/右旋圆偏振光分离后沿同一方向传播的子光束偏振态相同, 因此会发生相干叠加, 公式 (9) 和公式 (10) 中的光场各自相干叠加后的强度分布可表示为:

$$\begin{cases} I_{\text{Rin_Rout}} = 2\eta_1^2 \eta_2^2 [1 + \cos((k-k_x)\Delta z + (l-2)\Delta\varphi)] \\ I_{\text{Rin_Lout}} = \eta_1^4 + \eta_2^4 + 2\eta_1^2 \eta_2^2 \cos[(k\Delta z - k_x \Delta z) + (l-2)\Delta\varphi] \end{cases}, \quad (11)$$

其中 $I_{\text{Rin_Rout}}$ 表示入射光为右旋圆偏振光时, 最终出射的右旋圆偏振光分量相干叠加后的光强, 其余相似形式依此类推。相应地, 如果将初始的入射光切换为左旋圆偏振光, 那么对应出射的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光也将各自发生相干叠加, 其光强可表示为:

$$\begin{cases} I_{\text{Lin_Lout}} = 2\eta_1^2 \eta_2^2 [1 + \cos((k-k_x)\Delta z - (l-2)\Delta\varphi)] \\ I_{\text{Lin_Rout}} = \eta_1^4 + \eta_2^4 + 2\eta_1^2 \eta_2^2 \cos[(k\Delta z - k_x \Delta z) - (l-2)\Delta\varphi] \end{cases} \quad (12)$$

通过优化单元结构, 可以使得调制效率最高, 此时 $\eta_1 = 0.5 \times (1+i)$, $\eta_2 = 0.5 \times (1-i)$, 在该条件下, 公式 (11) 中的两个项式形式相同, 公式 (12) 中的两个项式形式也相同, 将这两个公式合并重新写作:

$$\begin{cases} I_{\text{Lin_L/Rout}} = 1/2 [1 + \cos((k-k_x)\Delta z - (l-2)\Delta\varphi)] \\ I_{\text{Rin_R/Lout}} = 1/2 [1 + \cos((k-k_x)\Delta z + (l-2)\Delta\varphi)] \end{cases} \quad (13)$$

从公式 (13) 可以看出, 其光场强度的变化规律是一个三角函数的形式, 光强的变化只与第二

超构表面相对第一超构表面发生的角位移 $\Delta\varphi$ 和线位移 Δz 有关, 且两个相干叠加的光场变化规律不同。通过分析归一化强度的相位, 可以直接获得位移信息, 即:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \frac{1}{2(l-2)} [\arccos(1-2I_{\text{Rin}}) - \arccos(1-2I_{\text{Lin}})] \\ \Delta z = \frac{1}{2(k-k_x)} [\arccos(1-2I_{\text{Rin}}) + \arccos(1-2I_{\text{Lin}})] \end{cases} \quad (14)$$

因此, 通过测量相干叠加光场的强度并进行求解, 可以同时测量角位移和线位移。

3 超构表面的设计与优化

所设计的两种超构表面均采用非晶硅圆柱体和二氧化硅基底构建单元结构。对于使用几何相位的超构表面, 其单元结构的调控作用可以用琼斯矩阵 $\mathbf{J}(\theta)$ 来描述:

$$\mathbf{J}(\theta) = \frac{1}{2} (t_o e^{i\varphi_o} + t_e e^{i\varphi_e}) \mathbf{I} + \frac{1}{2} (t_o e^{i\varphi_o} - t_e e^{i\varphi_e}) (e^{i2\theta} |\mathbf{R}\rangle \langle \mathbf{L}| + e^{-i2\theta} |\mathbf{L}\rangle \langle \mathbf{R}|), \quad (15)$$

其中 $\eta_1 = 1/2(t_o e^{i\varphi_o} + t_e e^{i\varphi_e})$, $\eta_2 = 1/2(t_o e^{i\varphi_o} - t_e e^{i\varphi_e})$, t_o 和 t_e 是振幅透过率, φ_o 和 φ_e 分别是对应的相位延迟。 θ 是单元结构长轴与 x 轴的夹角。对于编码超构表面, 根据公式 (1), 为了通过几何相位引入空间方位角相位 $e^{i\varphi}$, 应使得 $\theta = 1/2 \cdot l\varphi$, 其中 φ 是坐标 (x, y) 处对应的空间方位角。对于圆偏振分束超构表面, 为了引入沿 X 方向的相位梯度 k_x , 应使得 $\theta = 1/2 \cdot k_x x = \pi x/T$, 其中 T 是单元结构沿 X 方向变化的周期。将编码超构表面的拓扑荷数 l 设置为 4, 圆偏振分束超构表面的周期 T 设置为 $3 \mu\text{m}$, 在该情况下两种超构表面的相位分布与相位相应的单元结构排布情况, 如图 3(彩图见期刊电子版) 所示。

为了使两种超构表面单元结构的琼斯矩阵能够满足理论推导形式, 编码超构表面的单元结构应满足 $1/4$ 波片条件, 圆偏振分束超构表面的单元结构应满足半波片条件, 即:

$$\begin{cases} t_o = t_e = 1, |\varphi_o - \varphi_e| = \pi/2, \text{ for QWP} \\ t_o = t_e = 1, |\varphi_o - \varphi_e| = \pi, \text{ for HWP} \end{cases} \quad (16)$$

图 4(a)(彩图见期刊电子版) 给出了两种单元

结构的侧视图和俯视图。为了选取合适的单元结构参数, 使用时域有限差分算法 (FDTD) 进行电磁学仿真。非晶硅和二氧化硅材料的折射率分别为 $3.88 \pm 0.0189i$ 和 $1.46^{[24]}$ 。非晶硅纳米椭圆柱的高度 H 为 410 nm, 单元结构周期 P 为 300 nm, 阵列周期小于入射波长, 以有效避免高阶衍射。长轴半径 r_e 和短轴半径 r_o 的变化范围为 30~110 nm, 变化间隔为 1 nm。使用 Lumerical FDTD 软件进行仿真, 其中 X 方向和 Y 方向采用周期性边界条件, Z 方向采用完美匹配层 (PML), 仿真区域的 X 和 Y 方向跨度与单元结构的周期一致。使用 633 nm 的平行光源从基底入射, 数据监视器距离单元结构半个波长以上, 避免潜在的倏逝波对结果产生干扰。得到不同结构参数下共极化分量和交叉极化分量的电场复振幅透过率以及对应的相位延迟, 如图 4(b)(彩图见期刊电子版) 所示。用叉号标记编码超构表面单元结构, 星号标记圆偏振分束超构表面单元结构。根据参数扫描结果, 编码超构表面单元结构的长轴半径 r_e 选定为 97 nm, 短轴 r_o 选定为 43 nm, 可以将其看作性质良好的四分之一波片。圆偏振分束超构表面单元结构的长轴半径 r_e 选定为 76 nm, 短轴 r_o 选定为 52 nm, 可看作高效的半波片。单元结构也可以通过拓扑优化的方式进行设计, 进一步提高超构表面的能量利用效率和响应带宽^[25]。

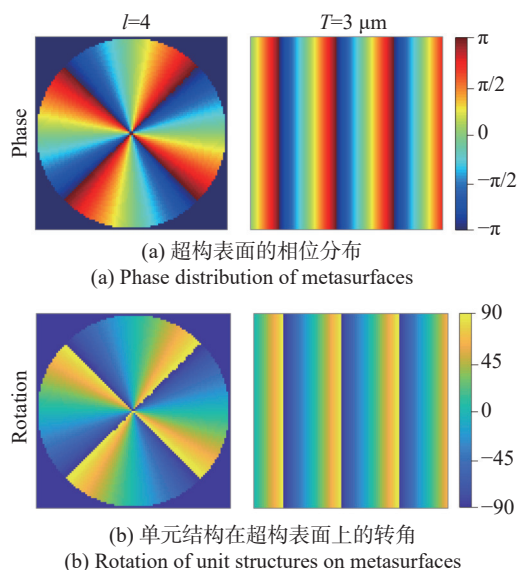
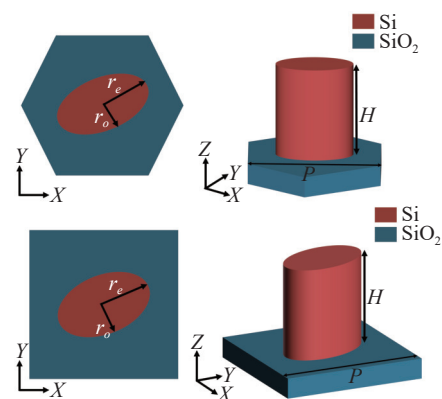


图 3 两种超构表面的设计

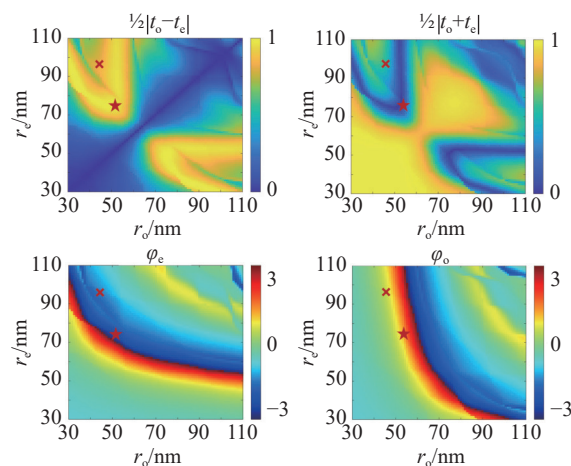
Fig. 3 Design of two types of metasurfaces

完成单元结构参数优化, 选取合适的单元结构后, 构建这两种超构表面的模型, 图 4(c)(彩图

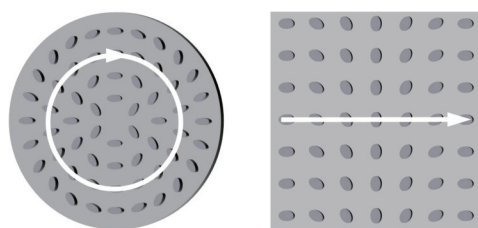
见期刊电子版) 展示了所设计的两种超构表面, 并用箭头线段指示了单元结构转角的变化路径。



(a) 单元结构的侧视图和俯视图
(a) Side and top views of the unit structures



(b) 参数扫描结果。选定的单元结构在图中进行了标记
(b) Parameter scanning results. Selected unit structures are marked in the figure



(c) 超构表面的结构示意图
(c) Structural diagram of metasurfaces

图 4 超构表面的设计与优化

Fig. 4 Design and optimization of metasurfaces

4 超构表面功能与位移测量模拟

4.1 编码超构表面数值模拟

通过时域有限差分法验证所设计的超构表面是否能够实现所设计的功能。首先对编码超构表面进行仿真, 超构表面的直径为 $10 \mu\text{m}$, 仿真区域

将整个超构表面包含在内, XYZ 方向均使用完美匹配层边界条件。使用圆偏振光入射单个编码超构表面, 监视器得到出射光的近场分布, 利用软件自带的 'farfieldexact3d' 指令提取近场信息, 并且编写脚本对信息做进一步处理, 得到指定位置处出射光的远场分布情况, 结果如图 5(彩图见期刊电子版) 所示。

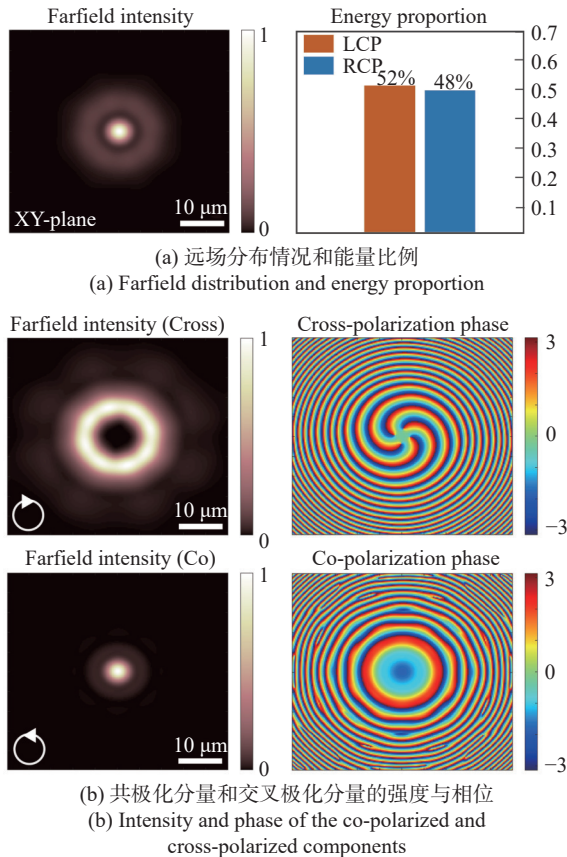


图 5 编码超构表面的仿真结果
Fig. 5 Simulation results of encoding metasurface

由图 5(a) 可以观察到一亮光斑和一环形光斑。将光场的左旋与右旋分量进行分离, 如图 5(b) 所示, 其强度都做了归一化处理。可以看出圆光斑的偏振态与入射光的偏振态相同, 而环形光斑的偏振态则与入射光的偏振态正交, 其中正交极化分量由于受超构表面的调制附加了与空间方位角相关的涡旋相位, 所以出射后变成了涡旋光, 其环形的能量分布和涡旋相位是涡旋光的显著特征, 根据相位分布可知其拓扑荷数 $l=4$ 。此外, 还计算了各自的能量占比, 得知两种偏振态的光束能量占比接近 1:1, 与理论设计结果一致。

4.2 圆偏振分束超构表面数值模拟

紧接着对圆偏振分束超构表面进行仿真, 使

用左旋圆偏振光和右旋圆偏振光同时入射, 得到光束照射超构表面后的传播情况和远场分布, 如图 6(彩图见期刊电子版) 所示。所设计的超构表面尺寸为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, 周期 $T=3\ \mu\text{m}$, 根据广义斯涅尔定律计算偏离角 $\beta = \arcsin(\lambda/T) \approx 12^\circ$ 。分离左旋圆偏振分量和右旋圆偏振分量进行观察, 可以看出两束光分别是完全的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 能量占比为 1:1, 且偏离角 β 与理论值一致。由此可知, 所设计的超构表面能够实现不同旋向的圆偏振光在空间上分离传播。

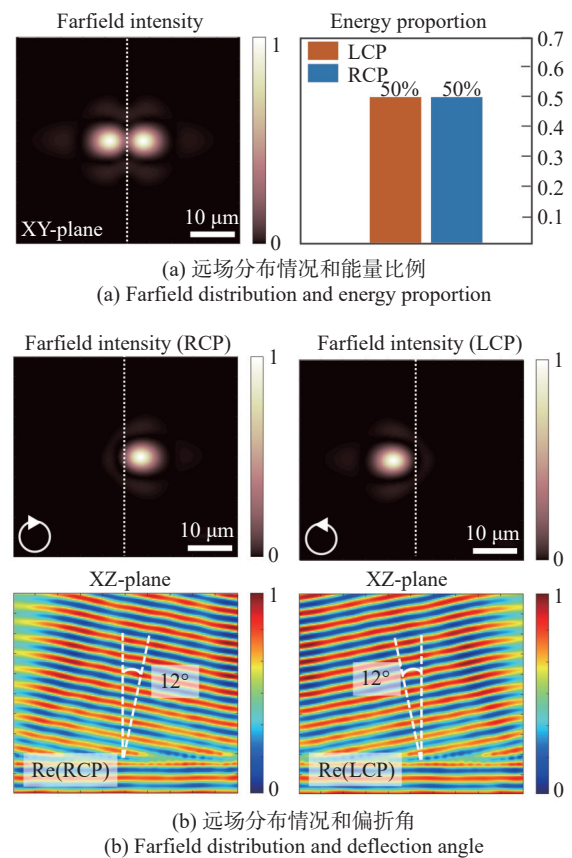


图 6 圆偏振分束超构表面的仿真结果
Fig. 6 Simulation results of circular polarization beam-splitting metasurface

4.3 位移测量模拟与性能分析

将三个超构表面按照所设计的方法进行排列, 其中第二超构表面和第三超构表面之间的距离固定设置为 $1\ \mu\text{m}$ 。在实际应用中, 可以通过胶合的方式将这两块超构表面固定在一起。分别使用左旋圆偏振光和右旋圆偏振光作为入射光, 在一定范围内改变第二超构表面的位置和旋转角度, 得到角位移和线位移与测得光强的关系, 如图 7(彩图见期刊电子版) 所示, 数据经过归一化处理。

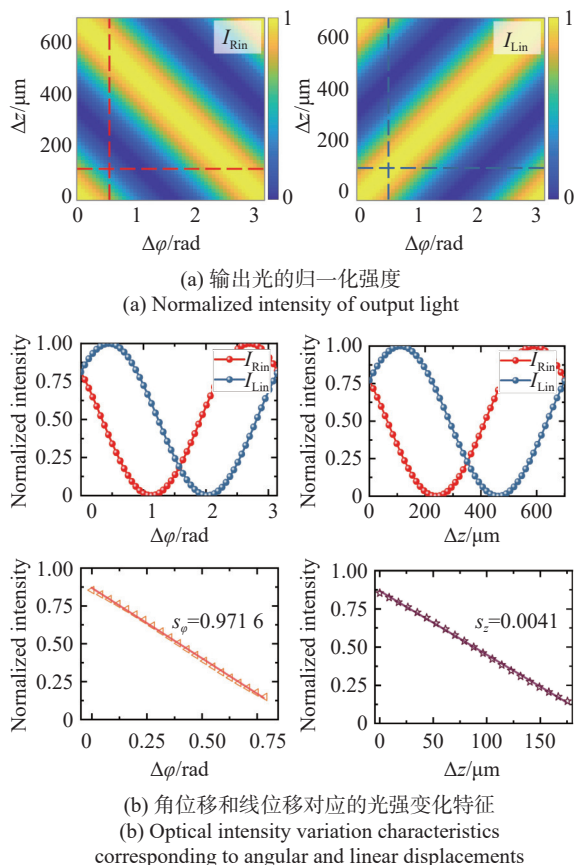


图7 超构表面的位移测量特性

Fig. 7 Displacement measurement characterization of metasurfaces

可以看出,其光强分别沿着不同的方向进行周期性变化。在图中分别针对角位移和线位移取剖面线,得到其角位移和线位移引起的光强变化关系。所有的剖面均为一个余弦信号,其解析式为:

$$\begin{cases} I_\phi(\Delta\phi) = \frac{1}{2}[1 + \cos((l-2)\Delta\phi + \Phi_\phi)] \\ I_z(\Delta z) = \frac{1}{2}[1 + \cos((k-k_z)\Delta z + \Phi_z)] \end{cases}, \quad (17)$$

其中, Φ_ϕ 和 Φ_z 分别是 $\Delta\phi$ 和 Δz 固定时产生的恒定相位项。根据拟合结果分别计算光强随角位移和线位移变化的周期。其中,根据公式(17)计算得到角位移变化的周期为 $2\pi/(l-2) = 3.14$ rad, 线位移变化的周期为 $2\pi/(k-k_z) = 698.13$ μm 。仿真得到的角位移变化周期为 3.15 rad, 线位移变化的周期为 701.26 μm , 与理论结果一致。

对角位移和线位移的灵敏度进行分析。为了确定位移测量方法的灵敏度,选取仿真结果中的线性区域,在线性区域中光强近似为线性变化。根据仿真结果进行线性拟合,得到角位移灵敏度 $s_\phi = 0.9716$, 线位移灵敏度 $s_z = 0.0041$ 。根据公式(17),

角位移和线位移的理论灵敏度为:

$$\begin{cases} s_\phi(\Delta\phi) = \frac{dI_\phi}{d\Delta\phi} = \frac{1}{2}(l-2)\sin((l-2)\Delta\phi + \Phi_\phi) \\ s_z(\Delta z) = \frac{dI_z}{d\Delta z} = \frac{1}{2}(k-k_z)\sin((k-k_z)\Delta z + \Phi_z) \end{cases}. \quad (18)$$

根据公式(18),理论上角位移灵敏度的最大值 $s_{\phi_{\max}} = 1$, 线位移灵敏度的最大值 $s_{z_{\max}} = 0.0045$ 。理论灵敏度和拟合的灵敏度一致性较高。

进一步分析了所提出方法的理论分辨率,根据公式(17)和灵敏度 s 的表达式,分辨率 $\Delta\phi^{\text{res}}(\Delta z^{\text{res}})$ 可以表示为 $\Delta\phi^{\text{res}}(\Delta z^{\text{res}}) = \Delta I_{\min}/s_\phi(s_z)$ 。其中 ΔI_{\min} 是能检测到的最小光强变化, ΔI_{\min} 越小,则系统的理论分辨率越高。目前常用的一款光功率计 THORLAB PM16-120 能够检测到的最小光功率变化为 $\Delta P_{\min} = 1$ nW。进行归一化处理后 $\Delta I_{\min} = 3.33 \times 10^{-5}$ (a.u.), 也就是说当光强的变化为 3.33×10^{-5} (a.u.) 时,对应的位移量可以被分辨出来。通过计算可得当 $l=4$ 时,角位移分辨率为 $\Delta\phi^{\text{res}}_{l=4} = 34.27$ μrad , 线位移分辨率 $\Delta z^{\text{res}}_{l=4} = 8.12$ nm。

通过一些方法可以进一步提高所提方法的灵敏度,例如,通过设计更高拓扑荷 l 的编码超构表面,可以进一步提高灵敏度。以拓扑荷提高一倍 ($l=8$) 为例,则角位移的灵敏度 s_ϕ 将提高到 3, 理论分辨率 $\Delta\phi^{\text{res}}_{l=8} = 11.1$ μrad ; 线位移的灵敏度 s_z 将提高到 0.0165, 理论分辨率 $\Delta z^{\text{res}}_{l=8} = 2.02$ nm; 相比 $l=4$ 时具有显著的提升。

4.4 超构表面的制造容差和对准精度分析

目前有多种微纳结构加工工艺,如电子束光刻、聚焦离子束、纳米压印光刻、定向自组装等。以电子束光刻工艺为例,目前的技术条件下,硅纳米柱的特征尺寸在 5 nm 左右^[26]。因此,使用精度为 5 nm 的微纳加工设备加工的偏振编码超构表面单元结构的长轴直径 d_e 在 (194 ± 5) nm 之间,短轴直径 d_o 在 (86 ± 5) nm 之间。在理想情况下,单元结构的振幅透过率和相位延迟应满足公式(16)。对上述范围内单元结构执行参数扫描,并且分别计算其长短轴的振幅透过率之比 $|t_o|/|t_e|$ 和长短轴相位延迟差值 $|\phi_o - \phi_e|$, 结果如图 8(彩图见期刊电子版)所示。结果表明,随着单元结构的长短轴在指定范围内变化,振幅透过率之比保持在 0.92 ~ 1.1 之间,始终在 1:1 附近,而相位延迟差保持在 1.53 ~ 1.68 rad,也就是始终保持在 $\pi/2$ 附近。说

明在该范围内, 编码超构表面的单元结构能够较好地满足公式 (16) 的 $1/4$ 波片条件, 证明该设计具有良好的制造容差。

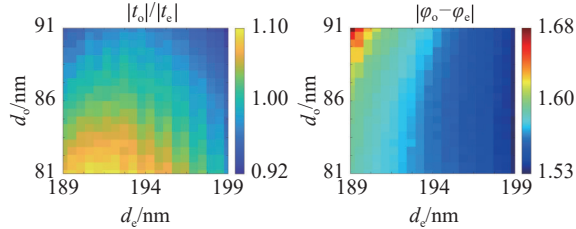


图 8 编码超构表面的制造容差

Fig. 8 Fabrication tolerances of encoding metasurface

此外, 进一步分析了超构表面的对准精度。本方法将 3 个超构表面沿光轴级联排布, 其中两个相同编码超构表面的对准精度将影响测量效果, 所以需要分析未完全对准对测量产生的影响。假设第二个超构表面与第一个超构表面不共轴, 第二个超构表面沿 XY 平面具有一个微小的位置偏差, 在此情况下将第二超构表面单元结构按旋转角排布, 重新写作 $\theta' = 1/2l\varphi'$ 。在此情况下, 以右旋圆偏振分量的出射光为例, 同偏振的两个子光束电场形式为:

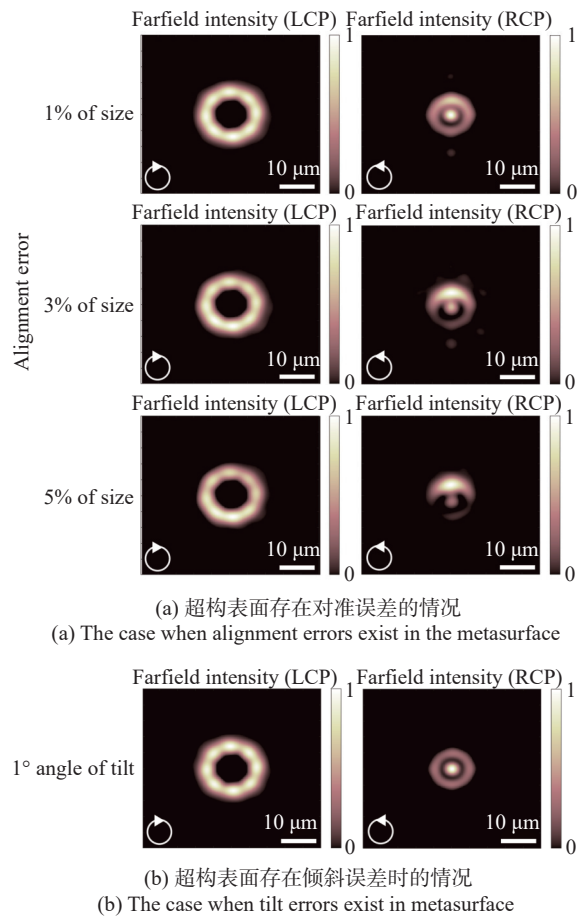
$$\begin{cases} \mathbf{E}'_{\text{cross-co-cross}} = \eta_1 \eta_2 e^{ik_z \Delta z} e^{-il\varphi} e^{ik_x x} |\mathbf{R}\rangle \\ \mathbf{E}'_{\text{co-cross-cross}} = \eta_1 \eta_2 e^{ik_z \Delta z} e^{-i[l(\varphi' - \Delta\varphi) + 2\Delta\varphi]} e^{ik_x x} |\mathbf{R}\rangle \end{cases} \quad (19)$$

两束光发生相干叠加后产生新的光强, 表达式可写作:

$$I'_{\text{Rin-R}} = 1/2 [1 + \cos((k - k_z)\Delta z + (l - 2)\Delta\varphi + l(\varphi' - \varphi))]. \quad (20)$$

可以看出, 相对于原来的光强表达式, 干涉项中增加了由于位置偏移产生的额外相位项 $l(\varphi' - \varphi)$ 。该项会使光强函数的分布发生变化, 然而该相位项仅由位置偏移量决定, 属于线性误差, 因此在实际测量中可以通过重复性测量并通过与先验真值对比对该误差进行补偿, 从而依然能够实现对角位移和线位移的精确测量。使用 FDTD 仿真软件仿真了第二超构表面存在对准误差时出射光的情况, 偏移量分别为超构表面尺寸的 1%, 3%, 5%, 结果如图 9(a)(彩图见期刊电子版) 所示。可见, 随着偏移量的增加, 光斑逐渐发生变形。仿真结果同时揭示了在实际测量中, 可以通过 CMOS 传感器观察光斑的形变来确定超构表

面是否对准, 并装调校正。此外, 还仿真了第二超构表面存在旋转误差, 即两个超构表面不平行时的情况。将第二超构表面设置 1° 倾斜, 结果如图 9(b) 所示。这种情况相当于光束斜入射超构表面, 可以把光束分解为垂直超构表面和平行超构表面的一组正交分量, 其中平行分量不受超构表面调制, 因此倾斜误差仅会影响到最终出射光的能量。对于圆偏振光束超构表面, 其作用是将不同圆偏振光的光束分量在空间分离, 因此该超构表面与编码超构表面是否严格共轴并不影响其功能的实现。



(a) 超构表面存在对准误差的情况
(a) The case when alignment errors exist in the metasurface

(b) 超构表面存在倾斜误差时的情况
(b) The case when tilt errors exist in metasurface

图 9 超构表面的对准精度

Fig. 9 Alignment accuracy of the metasurfaces

5 结 论

综上所述, 本文提出了一种基于级联超构表面的位移测量方法, 可用于同时测量径向角位移和纵向线位移。通过测量由超构表面调制后的同偏振态光束相干叠加后光强的变化, 可以精确获得第二超构表面相对第一超构表面的径向角位移

和纵向线位移。在 633 nm 的工作波长下,角位移灵敏度为 0.9716,理论分辨率为 34.27 μrad ,线位移灵敏度为 0.0041,理论分辨率 8.12 nm。通过提高所设计编码超构表面的拓扑荷数 l 可以进一

步提高测量精度。该方法有望通过结合多个相同装置以进一步增加位移测量的自由度,为实现紧凑、高精度的多自由度位移传感器提供了新的可能性。

参考文献:

- [1] KRIEG M, FLÄSCHNER G, ALSTEENS D, *et al.*. Atomic force microscopy-based mechanobiology[J]. *Nature Reviews Physics*, 2019, 1(1): 41-57.
- [2] KNOBEL R G, CLELAND A N. Nanometre-scale displacement sensing using a single electron transistor[J]. *Nature*, 2003, 424(6946): 291-293.
- [3] ORJI N G, BADAROGLU M, BARNES B M, *et al.*. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(10): 532-547.
- [4] ADE P A R, AGHANIM N, ANSARI R, *et al.*. Planck early results. VI. The high frequency instrument data processing[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 536: A6.
- [5] DO K D. Robust adaptive tracking control of underactuated ODINs under stochastic sea loads[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 72: 152-163.
- [6] EL MELEGY A, YOUNES M A. Positioning errors and accuracy of CNC machine tools[J]. *Engineering Research Express*, 2024, 6(4): 045415.
- [7] ZHOU S Y, JIANG R L, ZHANG R X, *et al.*. Absolute angular position measurement by dual-comb spectroscopy of an autocollimation diffracted beam[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(5): 1104-1107.
- [8] SONG N F, XU X B, ZHANG Z CH, *et al.*. Advanced interferometric fiber optic gyroscope for inertial sensing: a review[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(13): 4023-4034.
- [9] YE G Y, YUAN T, ZHANG Y L, *et al.*. Recent progress on laser interferometry based on vortex beams: status, challenges, and perspectives[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 172: 107871.
- [10] 吕强, 王玮, 刘兆武, 等. 五维自由度衍射光栅精密测量系统(英文)[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 189-202.
LV Q, WANG W, LIU ZH W, *et al.*. Grating-based precision measurement system for five-dimensional measurement[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 189-202.
- [11] CHEN Y L, SHIMIZU Y, TAMADA J, *et al.*. Laser autocollimation based on an optical frequency comb for absolute angular position measurement[J]. *Precision Engineering*, 2018, 54: 284-293.
- [12] ZHOU S Y, LE V, XIONG SH L, *et al.*. Dual-comb spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 243-251.
- [13] ZHANG W, LI W H, ZHANG T, *et al.*. A large-size and polarization-independent two dimensional grating fabricated by scanned reactive-ion-beam etching[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(21): 4649-4657.
- [14] ZHOU W Y, LIU ZH W, SUN Y J, *et al.*. Bidirectional Littrow double grating interferometry for quadruple optical interpolation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110751.
- [15] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, *et al.*. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [16] DENG L G, DENG J, GUAN ZH Q, *et al.*. Malus-metasurface-assisted polarization multiplexing[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 101.
- [17] 周俊焯, 郝佳, 余晓畅, 等. 面向偏振成像的超构表面研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(5): 973-995.
ZHOU J ZH, HAO J, YU X CH, *et al.*. Recent advances in metasurfaces for polarization imaging[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 973-995. (in Chinese).
- [18] ZHENG P X, DAI Q, LI Z L, *et al.*. Metasurface-based key for computational imaging encryption[J]. *Science Advances*, 2021, 7(21): eabg0363.
- [19] ZHANG ZH D, ZHANG H N, LIANG J, *et al.*. Double Fano resonance and refractive index sensors based on parallel-arranged Au nanorod dimer metasurface arrays[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 961-971.
- [20] YUE F Y, AGLIERI V, PICCOLI R, *et al.*. Highly sensitive polarization rotation measurement through a high-order vector beam generated by a metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(5): 1901008.

- [21] GU W H, ZHANG X F, LIU J CH, *et al.*. Optical angle barcodes enabled by a pixelated metasurface for absolute micro-angle measurement[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(2): 2300831.
- [22] ZANG H F, XI ZH, ZHANG ZH Y, *et al.*. Ultrasensitive and long-range transverse displacement metrology with polarization-encoded metasurface[J]. *Science Advances*, 2022, 8(41): eadd1973.
- [23] CAO D L, LI D, HU J Y, *et al.*. Off-axis bifocal metalens for displacement measurement[J]. *Nanotechnology*, 2024, 35(21): 215203.
- [24] PALIK E D. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. Orlando: Academic Press, 1997.
- [25] 洪鹏, 胡琬夏雨, 周子昕, 等. 光子学逆向设计研究进展 (特邀)[J]. *光子学报*, 2023, 52(6): 0623001.
HONG P, HU L X Y, ZHOU Z X, *et al.*. Advances of inverse design in photonics (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(6): 0623001. (in Chinese).
- [26] 李涵梦. 光学超构透镜的制备与性能研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.
LI H M. *Fabrication and performance of optical metalenses*[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese).

作者简介:



李文昊 (1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 研究员, 2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要研究方向为平面、凹面全息光栅的理论设计及光栅精密位移测量技术。E-mail: liwh@ciomp.ac.cn