

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210745

基于4f光学系统的周期性结构微小形变检测^{*}

张帆,樊文强,朱疆,祝连庆

(北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192)

摘要:为了快速、直观地检测出周期性结构的微小偏移,提出了基于4f光学系统的周期性结构微小偏移检测方法。首先使用VirtualLab Fusion光学仿真软件进行理论研究,建立预设偏移的周期性微结构模型,构造了光学传递函数,利用4f空间滤波方法,获得与周期性微结构对应的像面幅值图。经分析得出在透明基底的周期性结构中,不论尺寸大小,若偏移量在相邻特征尺寸间距的80%范围内,经拟合后幅值变化与微结构偏移量呈线性关系,且幅值变化位置与微结构偏移位置一致。依据仿真的光学系统参数搭建了实验系统,实验结果与仿真一致,并且该套系统可以实现3.4 mm×2.6 mm的测量视场,分辨率可达5 μm,能够实时快速地对周期性结构材料进行位移或缺陷检测。

关键词:位移检测;4f光学系统;光强分布;VirtualLab Fusion

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Periodic structure micro displacements detection based on the 4f optical system

Zhang Fan, Fan Wenqiang, Zhu Jiang, Zhu Lianqing

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument,
Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To quickly and intuitively detect the small offset of periodic structures, a 4f optical system-based method for detecting the small offset of periodic structures is proposed. Firstly, the VirtualLab Fusion optical simulation software is used for the theoretical study to formulate the model of periodic microstructure with preset offset, construct the optical transfer function, and obtain the image plane magnitude map corresponding to the periodic microstructure by using the 4f spatial filtering method. The analysis shows that in periodic structures of transparent substrates, regardless of size, if the offset is within 80% of the spacing between adjacent feature sizes, the fitted amplitude change is linear in relation to the microstructure offset and the location of the amplitude change is consistent with the location of the microstructure offset. The experimental system is established based on the simulated optical system parameters, and experimental results are consistent with the simulation. The system can achieve a measurement field of view of 3.4 mm×2.6 mm and a resolution of 5 μm, which is capable of real-time and rapid displacement or defect detection of periodic structural materials.

Keywords: displacement detection; 4f optical system; light intensity distribution; VirtualLab Fusion

0 引言

随着微纳加工技术的发展与进步,许多新型材料出现在人们的眼前,一些周期性结构材料具备了传统材料不具备的特殊性能,被广泛应用于各种领域,比如用于隐身技术的频率选择表面^[1]、用于等离子体激元的光子晶

体^[2]以及用于生物传感器的超表面^[3-5]。若这些周期性结构的材料在加工过程中,其局部结构发生破坏或偏移,则会影响整体的周期性,从而改变材料的性能。例如超表面太赫兹传感器是一种人工排布的二维周期性亚波长结构阵列^[6],当器件结构存在偏移时,结构变化会引起透射光谱的改变、谐振峰的移动^[7]以及 Q 值的变化^[8],周期性金属薄膜具有亚波长结构的圆孔阵列时,在可见光

收稿日期:2022-11-19 Received Date: 2022-11-19

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61875237, 61975019, 61605011)、北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ202011232050)、北京市属高校建设支持计划2022年度优秀青年人才项目(BPHR202203227)资助

波段具有透射增强功能^[9],周期性结构的周期决定了增透的波段,当结构发生偏移时,其增透的波段也会受到影响^[10]。由此可见,周期性结构的微小偏移变化对于材料性能具有很大的影响。

目前的周期性结构的微小偏移主要采用光学显微镜技术进行检测,通过高倍显微镜对周期性微结构进行成像,其测量精度通常在微米级别,在60×物镜下,普通光学显微镜的分辨率最大能达到0.5 μm,然而由于分辨率与视场相互制约,相应的测量视场只有150 μm×150 μm左右。随着电子显微技术的发展,扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)利用高能电子束扫描样品表面能够直接表征材料的微结构,此外使用原位扫描电子显微镜技术与数字图像相关技术相结合可以测量微小尺度的形变^[11-12],其测量精度可以达到纳米级别,但是测量样品必须处于真空条件下,测量环境比较苛刻。扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)利用量子力学的隧道效应能够对材料表面进行表征,同时可以用来检测表面结构的微小缺陷或者偏移,但是使用这种方法样品不仅需要安装电极进行导电处理,而且还需在超高真空环境中原位进行^[13]。除了显微镜技术之外,莫尔条纹的放大作用也可应用于微小位移或形变测量^[14]中,两个周期性图案以较小倾斜角度叠加产生莫尔条纹,通过细分条纹间距能够测得位移量^[15-16],同时从参考光栅与变形光栅叠加得到的扭曲莫尔条纹中,也可计算出形变量^[17]。显微镜技术虽有着较高的测量分辨率,但是其测量视场因使用高倍物镜而受到限制,并且对测量环境要求都比较高,而莫尔条纹法由于误差平均效应,对局部的变形量具有平均的作用,从而对局部的微小偏移量检测不灵敏。因此这些方法,均不适用于大视场周期性结构微小偏移或形变的快速实时检测。

为了保证一定测量分辨率的前提下扩大测量视场,本文提出了一种基于4f光学系统的周期性结构微小偏移检测方法,通过光学软件仿真验证像面幅值变化与偏移大小的关系,并且通过增大光强提高了幅值图的信噪比,同时采用一般精度的电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)搭建了相关的光学系统,实现了周期性结构微小位移的检测,其检测视场可达3.4 mm×2.6 mm,测量分辨率可达5 μm以上,并且具有成本低、快速、大面积实时检测的特点。

1 系统测量原理及光学仿真

1.1 系统测量原理

基于4f光学系统的周期性结构微小偏移检测系统如图1所示。波长632.8 nm的氦氖激光器发出一束激光,其光强由中性密度滤光片调节,经过针孔滤波器将高

频杂散光滤除,之后经过准直透镜L1,获得一束亮度均匀的相干平面波,经过反射镜M1垂直照射至样品上,提取样品的信息,经反射镜M2变为水平方向传输的平面衍射波,此时它包含了样品衍射光波的各种频率的角谱分量,即不同方向传播的平面波分量。

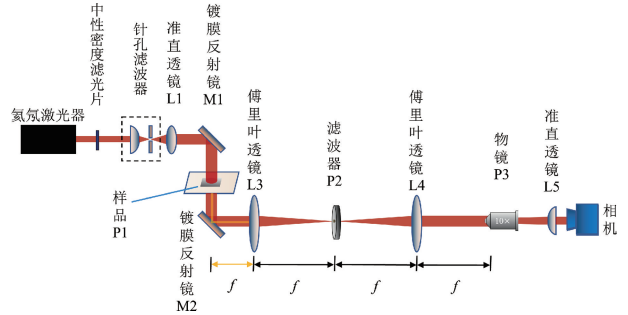


图1 基于4f光学系统的周期性结构微小偏移检测系统
Fig.1 Periodic structure small offset detection system based on the 4f optical system

P1平面上待测样品的周期性结构的衍射屏函数可展开为傅里叶级数,若将未变形的正弦光栅作为参考光栅,则经过傅里叶透镜L3后,在P2频谱面上的光强分布可以用二维傅里叶变换来表示:

$$G_0(x, y) = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n \exp \{ j [2\pi n (x f_x + y f_y) + n \phi_0(x, y)] \} \quad (1)$$

式中: A_n 是傅里叶分量; f_x 是未变形的参考光栅在 X 方向上的频率, f_y 是未变形的参考光栅在 Y 方向上的频率; $\phi_0(x, y)$ 是未变形光栅像的初始相位。

变形后的光栅,其初始相位将会变为 $\phi(x, y)$, 则变形后的光强分布可展开为傅里叶级数:

$$G(x, y) = r(x, y) \sum_{-\infty}^{\infty} A_n \exp \{ j [2\pi n (x f_x + y f_y) + n \phi(x, y)] \} \quad (2)$$

式中: $r(x, y)$ 为待测物体表面非均匀的反射率。

根据傅里叶变换的可分离性,式(2)可变为:

$$G(x, y) = \sum_{-\infty}^{\infty} q_n(x, y) \times \exp [2\pi j \times n (x f_x + y f_y)] \quad (3)$$

其中, $q_n(x, y) = A_n r(x, y) \times \exp [j n \phi(x, y)]$ 。

频谱面上的光分布与物的结构是密切相关的,原点附近一般为物结构的傅里叶低频分量,通常也位于光轴上,而离光轴较远的频率信息,即物结构的傅里叶高频分量^[18]。在P2平面上放置一个自制空间滤波器,对光路中输入图像的频谱进行空间滤波处理,使得对应周期性结构空间频率的衍射斑点通过,将除此之外的低频和高频杂散信号滤除。经过傅里叶透镜L4后,变形后的光栅

像面光强分布为二维逆傅里叶变换:

$$g(x, y) = q_1(x, y) \times \exp\{2\pi j[x(f_x + \Delta f_x) + y(f_y + \Delta f_y)]\} \quad (4)$$

未变形的光栅其光强分布为:

$$g_0(x, y) = q_0(x, y) \times \exp[2\pi j(xf_x + yf_y)] \quad (5)$$

由此可发现变形的光栅,其变形的部位的周期性被改变,此处的频率会远小于未发生变形的区域,即式(4)中的 Δf_x 和 Δf_y 是一个负值。所以对应到物的像面幅值分布,变形的光栅其变形部位的幅值峰值会小于未发生过变形部位的幅值,并且变形程度越大,对应区域的幅值峰值会越小。

在 P3 平面上放置 10 倍或 20 倍物镜将滤波后的光强信息进行成像放大,再经过一个准直透镜 L5 后,由 CCD 相机记录像面幅值图。

若样品为周期性结构,并且其微结构没有发生偏移,则通过透镜 L4 的像面幅值图是一个常数,不会产生幅值的变化。而当周期性的微结构产生偏移,此时通过二维傅里叶变换可以解调出变形区域内各单元偏移量^[19],即通过分析像面幅值图的幅值突变位置及大小,可获得偏移信息。

1.2 基于 VirtualLab Fusion 的光场仿真分析

使用 VirtualLab Fusion 光学仿真软件对系统进行建模仿真分析,以验证方法的可行性。该软件可实现光学系统的统一化建模,能够对各种自由空间传输进行计算^[20-21]。该软件从光源到光学元件再到探测器之间的光路传播是以麦克斯韦方程组的场矢量传播规律来实现的。每个光学元件都是基于电磁场的程序模块,其元件参数可根据建模需求进行设置。

1) 周期性结构建模

在 VirtualLab Fusion 软件中,利用软件自带光栅工具箱中的 Metagrating Optical Setup,进行超表面太赫兹传感器的建模,如图 2 所示。元件之间的连线代表光路,箭头为传播方向。本文建立的样品模型是太赫兹柔性超表面,由金圆盘与聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 基底构成,其中金属圆盘的直径为 3 μm ,中心间距为 6 μm 。样品局部远场成像结果如图 3 所示,金盘不透光,其余部分透光。



图 2 光栅工具箱中的超表面光栅光学设置

Fig. 2 Metagrating optical setup in the grating toolbox

光栅元件一般模拟的是周期性微结构,因此难以实现非周期结构的建模。为了实现非周期结构的建模,基

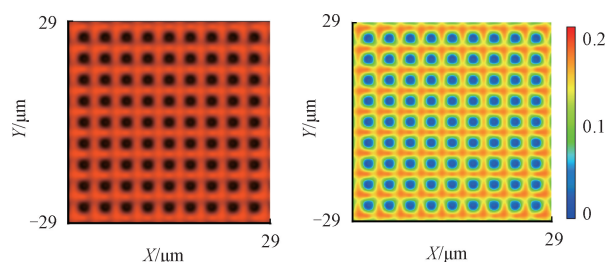
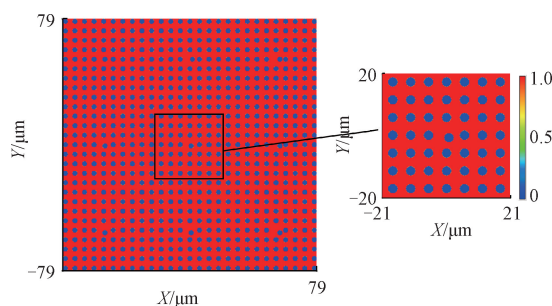


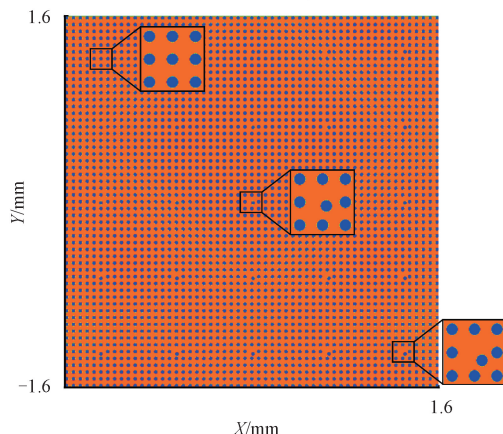
图 3 金盘阵列的远场成像及伪色图

Fig. 3 Far field imaging of gold disk array

于上述周期性结构的光场效果设置了不同尺寸的振幅型传输函数,可作为发生偏移的周期金盘阵列。为研究不同尺寸下发生偏移的周期性结构的像面幅值分布,设置了两个传输函数,此时光场振幅分布为像素阵列圆孔,圆孔不透光,其余部分透光。如图 4 所示,尺寸较小的振幅传输函数的直径为 3 μm ,中心间距为 6 μm ,分为 3×3 区域,每个区域含有 9×9 圆孔阵列,区域中心的圆孔从左到右、从上到下发生偏移,步长 800 nm,最大偏移量为 2.4 μm 。尺寸较大的振幅传输函数的直径为 30 μm ,中心间距为 60 μm ,分为 5×5 区域,每个区域含有 11×11 圆孔



(a) 直径为 3 μm 的偏移金盘阵列传输函数
(a) Offset gold disk array transfer function with a diameter of 3 μm



(b) 直径为 30 μm 的偏移金盘阵列传输函数
(b) Offset gold disk array transfer function with a diameter of 30 μm

图 4 偏移金盘阵列建模

Fig. 4 Offset gold disk array modeling

孔阵列,左上角第一个区域内圆孔的偏移量为0,其余区域偏移量遵循向右和向下依次增大 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的规律,最大偏移量为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。在远场成像系统中利用传输函数元件代替光栅结构进行传输,与远场成像图效果一致。

2) 4f 光学空间滤波系统仿真

为简化建模流程,减小计算量,省略对高斯光源的空间滤波步骤。具体建模操作如下:新建一个 OS,选择单色平面波,存储函数元件,两个 2f-step 元件,孔径以及相机探测器模块,如图 5 所示。其中光源的波长设置为 632.8 nm ,大小为 1.22 mm ,存储函数设置的是非周期金盘阵列的振幅传输函数。2f-step 是使用聚焦透镜进行傅里叶变换的设置,它可以严格设置前后相等的焦距,适用于高通和低通滤波器等光学滤波问题,因此选择其作为光学傅里叶透镜元件,设置其焦距为 100 mm 。孔径的大小及位置由频谱图中的一级衍射斑点的距离和大小决定。

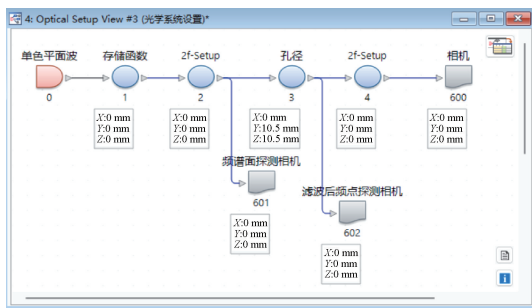


图5 4f 光学空间滤波系统建模示意图

Fig. 5 Diagram of 4f optical spatial filtering system modeling

首先利用该系统对尺寸较小的周期性金盘阵列与偏移金盘阵列进行场追迹,可得到频谱图以及小孔滤波后的频点图以及像面幅值图,仿真结果如图 6 所示。图 6(a)为频谱图,选取其中一个一级衍射斑点进行空间滤波处理,衍射斑点的位置可以利用软件的 Piont Marker 工具来确定其空间坐标位置。经滤波之后得到像面幅值图,由于像面与物面是上下左右相互颠倒的,故将最后的幅值图上下左右翻转,图 6(c)为未偏移金盘阵列,其像面幅值图是恒定不变的常数,图 6(d)为偏移金盘阵列,其像面幅值图在结构发生偏移的位置出现明显的幅值突变,且幅值突变最大值处的坐标与发生偏移的位置基本吻合,这说明最后得到的幅值分布图可以直观地定位周期性结构发生偏移的位置。

将图 6(a)中光强较强的 8 个一级衍射斑点进行标号,再分别选取来进行滤波处理,记录对应的像面幅值图,观察到中心对称的两个衍射斑点进行滤波后得到的像面幅值图完全相同,如图 7 所示。其中频点 1、5 的波峰可以反映出偏移前的位置,但是无法反映偏移的方向。频点 2、4、6、8 无法反映出偏移的方向,成像效果也不佳。

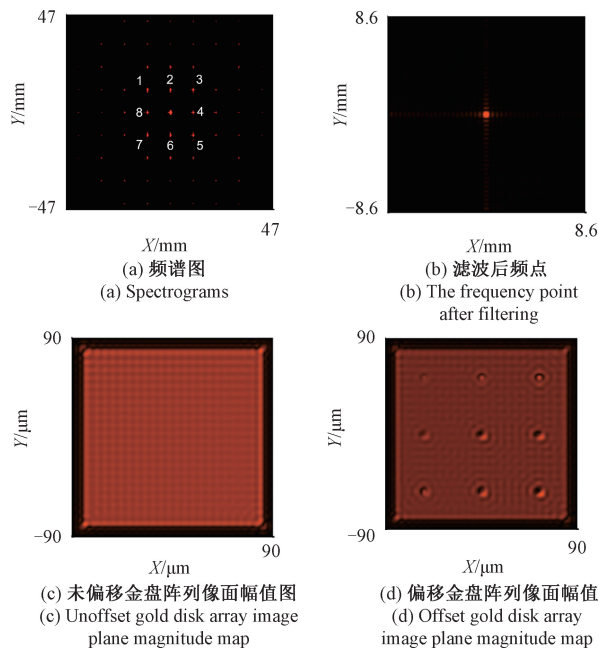


图6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

而频点 3、7 包含幅值突变的波峰与波谷,其中波峰可以反映出发生位移的位置也可以反映出偏移的方向,而且背景光强比较均匀,信噪比高,效果最佳。因此,实验中可以使用时频点 3 进行滤波处理。

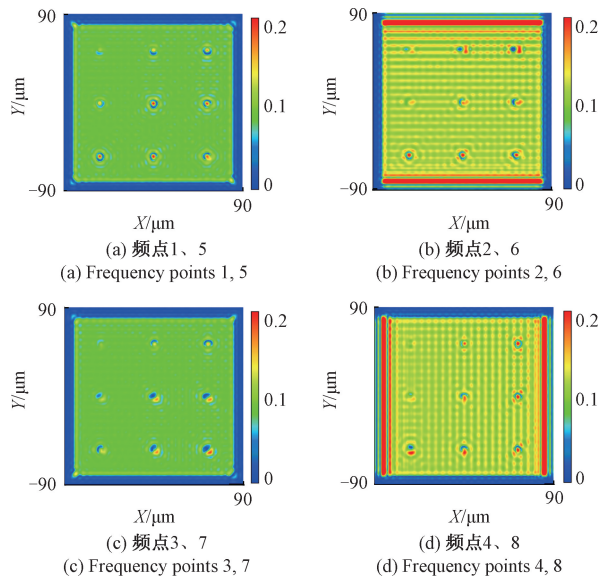


图7 不同频点的像面幅值图

Fig. 7 Image plane amplitude map of different frequency points

为确定最佳的滤波器大小,选定频点 3,改变孔径的大小进行滤波,滤波器大小为 $1\sim 20\text{ mm}$,步长为 1 mm 。记录对应像面幅值图的信噪比变化如图 8 所示。其中信噪比的计算方法是将幅值突变最大强度除以背景强度。

从图 8 可以看出,滤波器大小为 2~11 mm 时,由于没有引入该特征尺寸为 3 μm 的周期微结构一级衍射频点的全部信息,此时得到的像面幅值图中不包含突变的幅值信息,导致其背景强度和最大强度几乎一样。当滤波器大小为 12 mm 时,衍射斑点的大部分信息通过,像面幅值图中开始检测到幅值突变的具体信息,信噪比明显增大,而当滤波器大小为 17 mm 时(约为相邻一级衍射斑点间距离两倍的 85%),该频点的信息全部通过,信噪比得到了显著提升,并且此时幅值图背景光强较均匀,幅值突变的位置明显。随着滤波器大小的进一步增大,虽然提升了信噪比,但其实是引入了其他一级衍射斑点的信息,导致突变的最大幅值强度剧增进而引起信噪比的增大,此时背景包含其他频点信息而产生噪声。

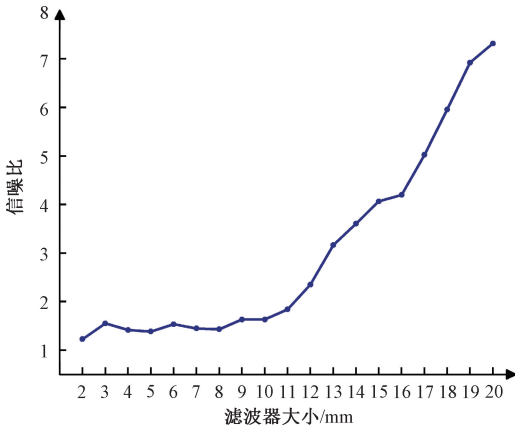


图 8 滤波器大小对像面幅值图信噪比的影响

Fig. 8 Influence of filter size on signal-to-noise ratio of image plane amplitude diagram

基于上述,选定频点 3 以及滤波器大小为 17 mm,通过适当增大光强,当光强调至为幅值突变的最大值时,每个发生偏移的位置的幅值突变只包含幅值突变的波谷,发现此时像面幅值图的对比度明显得到了提升。如图 9 所示,像面幅值图的成像效果明显更佳。

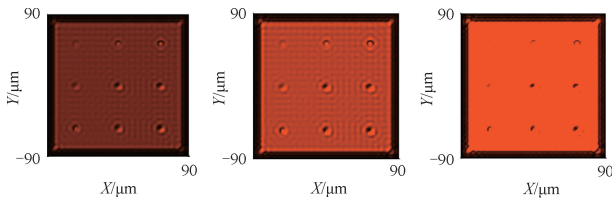


图 9 依次增大光强对像面幅值图的影响

Fig. 9 The effect of sequentially increasing light intensity on the image plane magnitude map

基于上述对直径为 30 μm 的偏移金盘阵列进行同等操作,选择频点 3,滤波器大小经分析后为 4 mm,进行光学空间滤波处理,其滤波结果如图 10 所示。通过比较不

同尺寸大小的周期性结构的偏移,发现其幅值效果类似,在偏移位置处的幅值都发生了突变。

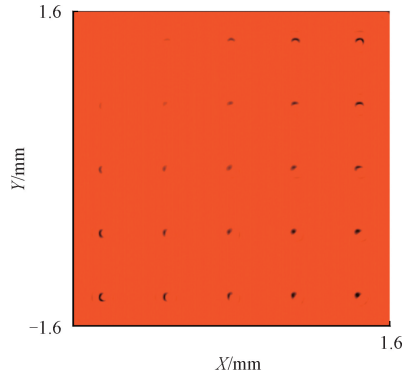


图 10 直径为 30 μm 偏移金盘阵列像面幅值图

Fig. 10 Offset gold disk array image plane magnitude map with a diameter of 30 μm

为进一步确定像面幅值分布与偏移量大小对应的关系,需要将偏移值与对应的幅值进行标定。具体的标定过程如下:参照上述两个尺寸的偏移金盘阵列进行建模,构建 27 $\times$ 27 的金盘阵列,其中除正中心的金盘发生偏移外,其余的都为周期性排列,构造一系列偏移金盘阵列的光学传输函数,如图 11 所示。

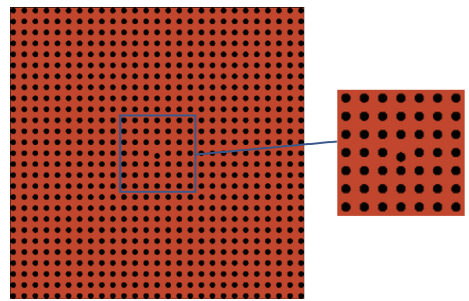
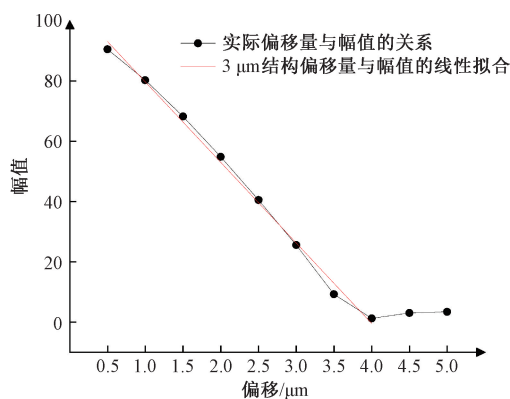


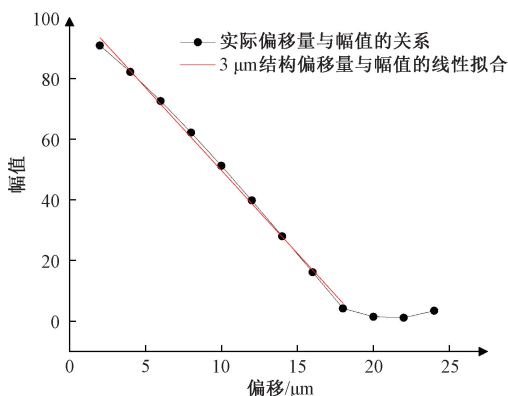
图 11 光学传递函数标定图及其局部放大图

Fig. 11 Optical transfer function calibration chart and its local magnification

设置直径为 3 μm 的金盘阵列中心偏移量为 0~2.4 μm ,步长为 0.3 μm ,直径为 30 μm 的金盘阵列中心偏移量为 0~24 μm ,步长为 2 μm 。将这些传输函数放置于上述的 4f 光学滤波仿真系统中,得到一系列像面幅值图,测量对应幅值图中幅值突变的最小值(即突变处幅值的波谷值),得到不同偏移量对应的幅值系统响应如图 12 所示。图 12 中,经分析拟合曲线后可以得到两者存在的线性关系,随着周期性微结构偏移量的增大,对应的幅值突变值减小,并且在周期性排布结构中,不论尺寸大小,其偏移量处于特征尺寸间距的 80% 内,其偏移量与对应的幅值呈线性关系。



(a) 3 μm 偏移结构标定
(a) 3 μm offset structure calibration



(b) 30 μm 偏移结构标定
(b) 30 μm offset structure calibration

图12 不同偏移量与幅值分布的系统响应

Fig. 12 System response with different offsets and amplitude distributions

2 光学系统搭建与验证分析

2.1 实验系统搭建

基于上述理论,按照图1搭建了实验验证系统,首先使用波长为 632.8 nm,输出功率为 35 mW 的氦氖激光器搭建 4f 光学空间滤波系统,其中 CCD 的分辨率为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$,如图13所示。使用预设偏移的胶片掩膜版作为样品进行验证实验,掩膜版上的圆孔阵列的直径为 $30 \mu\text{m}$,中心间距 $60 \mu\text{m}$,该样品制作周期短,且尺寸大,适用于前期实验验证。掩膜版上的圆孔阵列透光,其余部分不透光,经光学系统滤波处理后其像面幅值图为振幅调制,与仿真一致设置了 5×5 的偏移区域,并且只在每个区域的中心发生偏移,胶片掩膜版的偏移为 $0 \sim 20 \mu\text{m}$,步长为 $5 \mu\text{m}$ 。本实验是在光学暗室中进行的,以方便实现更好的光学滤波效果。

2.2 实验结果与分析

将胶片掩膜版放在样品台上,首先使用未滤波的 4f 光学空间滤波系统以及 CCD 相机对预设具有偏移区域

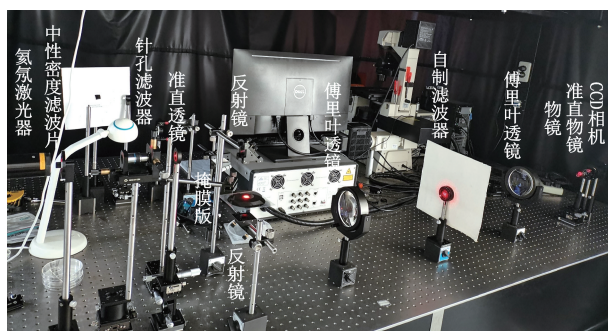
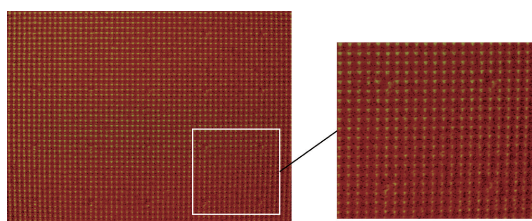


图13 4f 光学空间滤波系统

Fig. 13 The 4f optical spatial filtering system

的掩膜版样品进行成像,如图14(a)所示。因成像视场限制,只呈现了 4×5 的偏移区域,由于胶片版的精度较低,有些圆孔成像不均匀。从局部放大图可以看出,每个区域的中心圆孔分别向右和向下发生了微小位移,并且位移逐渐增大。其次,在频谱面加入自制滤波器对其进行滤波处理,依据仿真以及衍射斑点的距离,调节滤波器的大小为 4 mm,进行滤波处理,并调节合适的光强记录对应的像面幅值图。如图14(b)所示,CCD 记录的预设偏移区域的像面幅值图与光学仿真结果一致,在发生偏移的位置,幅值发生了突变,图中一些噪声,是由于部分相机杂散光影响了成像效果,对整体的幅值分布情况影响较小。



(a) 未滤波的偏移掩膜版成像及其放大图

(a) Unfiltered offset mask version imaging and its enlargement



(b) 经4f系统得到的像面幅值分布

(b) The image plane amplitude distribution obtained by the 4f system

图14 4f 光学系统测量结果

Fig. 14 The 4f optical system measurement results graph

三维幅值图如图15所示,可以看出,预设发生偏移的地方,其大部分像面幅值随着偏移的增大而减小。将幅值图划分为 4×5 个区域,使用其行号和列号相组合来表示各个区域,并求出各区域的最小幅值,结果如表1所示。

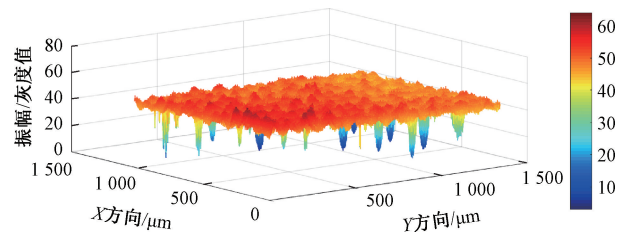


图 15 三维幅值图
Fig. 15 3D amplitude plot

表 1 各区域幅值突变处的最小值

灰度值	1	2	3	4	5
1	52	44	38	14	23
2	32	23	34	12	7
3	20	26	27	8	7
4	17	15	5	7	6

由表 1 可以看出,多数幅值的最小值随着位移增强而逐渐减小的变化规律,与光学仿真结果相似,而部分点不遵循这个规律,可能是因为胶片掩膜版精度较低,除透光区域也发生透光,导致光强受到干扰。但该系统已初步验证可以用来定性的检测周期性结构的微小位移。

由于掩膜版的大部分区域是周期性排布的,仅在局部设置了已知的偏移量区域,为了能够尽快找到这片区域,在其周围设置了一个数字图案以便能够快速定位测量预设偏移处的幅值变化,如图 16 所示。由于该区域为非周期性区域,同时也是低频区域,在进行空间滤波时,这部分区域的光强会明显降低。根据已知尺寸的预设定位区域(图 16 黑色方框)在视场的占比情况可以求得此时系统的测量视场。幅值图长宽均为 27.52 cm(图 16 黑色矩形),整幅图的长为 47.41 cm,宽为 36.12 cm,由于被测区域的实际尺寸为 1.98 mm×1.98 mm,根据其幅值图在整个 CCD 视场中所占的比例,该套系统所能测量的最大长度为 1.98×47.41/27.52 mm=3.41 mm,最大宽度为 1.98×36.12/27.52 mm=2.60 mm,因此该套系统的测量视场在 3.4 mm×2.6 mm 以上。由于被测样品各区域中心点的位移步长为 5 μm,而对应于 5 μm 的变化,其幅值图也有相应的变化,因此系统的最小分辨率为 5 μm。并且幅值分布图中该区域存在明显的幅值突变,由此得出该微小位移测量方法的分辨率能够优于 5 μm。

针对于 4f 光学系统,其测量视场相比于传统的方法得到了极大的提升,但其视场大小仍受限于 P3 成像平面处的物镜参数,降低物镜的放大倍数可以进一步

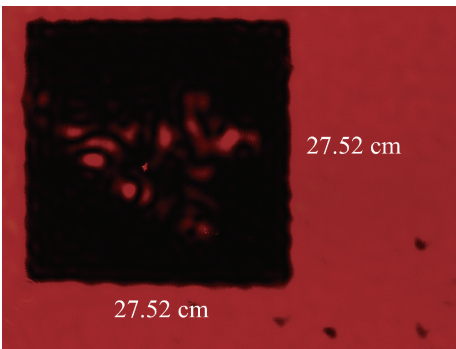


图 16 预设低频区域在 CCD 视场的位置
Fig. 16 Preset the position of the low frequency region in the CCD field of view

增大视场,但成像的分辨率可能会受到一定的影响。通过增加输入激光束的功率可以提高光强度分布的信噪比,但在强照明下,小位移的检测可能会受到影响(图 14(b))。傅里叶透镜的孔径光阑对于测量分辨率也具有一定影响,实验中发现透镜孔径光阑较大时对应的输出图像包含更多的细节,较大的孔径通常可以收集到大角度的衍射光,也即更多的高频信息,这些衍射光到达像平面时可以相干叠加出较多的细节。而孔径较小时,高频信息无法进入镜头,频谱面也缺少了高频谱,滤波后其像面相应的信息也会丢失。同时透镜的焦距会影响频谱面一级衍射斑点的距离,导致高频信息的损失,为进一步提高测量分辨率,可选择焦距较小、孔径较大的傅里叶透镜。

3 结 论

本文提出了一种基于 4f 光学系统的周期性微结构微小形变检测方法,通过 VirtualLab Fusion 物理光学仿真软件验证了该系统利用像面幅值分布测量周期性结构微小偏移的可行性,并对仿真过程中的频点选择、滤波窗口大小进行分析,确定了最优值。在此基础上,验证了微小偏移量在周期结构相邻特征尺寸距离的 80% 范围内,偏移量与幅值分布呈线性关系。通过搭建实验系统,实验结果的像面幅值图与仿真结果基本一致,并且实验结果表明,该系统的微小位移的测量视场可达 3.4 mm×2.6 mm,测量分辨率能达到 5 μm。而且该方法能够快速实时地检测透明基底的周期性结构的微小偏移的位置和大小,为周期性结构的缺陷及偏移检测提供了一种有效方案,并且将来还可用于测量由细胞引起的柔性基底的位移场从而直观反映细胞力,利用该系统的大视场可能在一次测量中横向比较多个细胞力,对细胞力学的相关研究具有重要的现实意义。

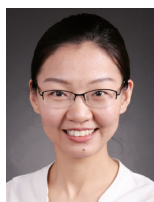
参考文献

- [1] 徐记伟,张政,黄勇,等. 周期性结构材料在隐身中的应用[J]. 飞航导弹,2009(4): 57-61.
XU J W, ZHANG ZH, HUANG Y, et al. Application of periodic structural materials in stealth [J]. Aerospace Technology, 2009(4): 57-61.
- [2] XIONG L, FORSYTHE C, JUNG M, et al. Photonic crystal for graphene plasmons [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4780.
- [3] CHEN T, LI S, SUN H. Metamaterials application in sensing[J]. Sensors, 2012, 12(3): 2742-2765.
- [4] 陈颖,张敏,丁志欣,等. 基于全介质超表面的微流体折射率传感器[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 94-103.
CHEN Y, ZHANG M, DING ZH X, et al. Microfluidic refractive index sensor based on all-dielectric metasurfaces [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 94-103.
- [5] 何明霞,李净延,刘冠林. 太赫兹可控功能器件的研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(7): 567-576.
HE M X, LI J Y, LIU G L. Progress of terahertz active control functional devices [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(7): 567-576.
- [6] 赵静,王加贤,高丽贞,等. 基于全介质纳米圆柱孔超表面的传感特性研究[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-10 [2023-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220714.1210.152.html>.
ZHAO J, WANG J X, GAO L ZH, et al. Sensing characteristics based on all-dielectric nanocylindrical holes metasurface [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-10 [2023-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220714.1210.152.html>.
- [7] 王晶,田浩. 基于双重共振响应的太赫兹柔性可拉伸超表面(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 357-362.
WANG J, TIAN H. Terahertz flexible stretchable metasurface based on double resonance response (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 357-362.
- [8] 曾庆鹏,胡放荣,周远,等. 基于双椭圆结构的高Q值太赫兹超材料传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 199-205.
ZENG Q P, HU F R, ZHOU Y, et al. High Q-value terahertz metamaterial sensor based on double ellipse structure [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 199-205.
- [9] GARCÍA-VIDAL F J, MARTÍN-MORENO L, EBBESEN T W, et al. Light passing through subwavelength apertures[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82: 729-787.
- [10] 程轲,王书杰,付冬伟,等. 单晶硅表面周期性微结构的减反射特性及光伏特性[J]. 高等学校化学学报, 2010, 31(8): 1647-1650.
CHENG K, WANG SH J, FU D W, et al. Antireflection and photovoltaic properties of microstructures design on the single crystalline silicon surface [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2010, 31(8): 1647-1650.
- [11] JIN H, LU W Y, KORELLIS J. Micro-scale deformation measurement using the digital image correlation technique and scanning electron microscope imaging[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2008, 43(8): 719-728.
- [12] TAO R, ZHU J, ZHANG Y, et al. Quantifying the 2D anisotropic displacement and strain fields in graphite-based electrode via in situ scanning electron microscopy and digital image correlation [J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 35: 100635.
- [13] 姚钢,刘灿华,贾金锋. 基于扫描隧道显微镜的原位表征技术[J]. 电子显微学报, 2018, 37(5): 408-413.
YAO G, LIU C H, JIA J F. STM based in situ techniques for physical characterizations [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2018, 37(5): 408-413.
- [14] 段成丽,蒋亚东,魏鸿雁,等. 光栅式大应变传感器结构与特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 504-508.
DUAN CH L, JIANG Y D, WEI H Y, et al. Design and characteristics investigation of grating large-scale strain sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(6): 504-508.
- [15] WU J, YUAN B, WANG L. New displacement measurement method based on digital Moiré fringes formed by a single grating [J]. Infrared and Laser

- Engineering, 2014, 43: 3404-3409.
- [16] 刘小康, 陈自然, 王先全, 等. 空间精密位移信号软细分方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (3): 540-545.
- LIU X K, CHEN Z R, WANG X Q, et al. Soft interpolating method of precision spatial displacement signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (3): 540-545.
- [17] ZHENG X, ZHANG X. Optical Moiré as a visualization tool for living vascular cell contraction force mapping[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93 (16): 164106.
- [18] 于雪冰, 王伟. 空间滤波的实验研究[J]. 物理实验, 2018, 38 (1): 8-13.
- YU X B, WANG W. Experimental study of spatial filtering[J]. Physics Experimentation, 2018, 38 (1): 8-13.
- [19] 温娜, 张帆. 基于傅里叶变换的细胞牵引力测量研究[J]. 应用光学, 2021, 42 (2): 317-326.
- WEN N, ZHANG F. Research on cell traction measurement based on Fourier transform[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42 (2): 317-326.
- [20] WYROWSKI F, KUHN M. Introduction to field tracing[J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58: 449-466.
- [21] 王驰, 毕书博, 王利, 等. 超小自聚焦光纤探头研究用场迹数值模拟技术[J]. 物理学报, 2013, 62 (2): 348-357.

WANG CH, BI SH B, WANG L, et al. Field-tracing based numerical simulation technique for the investigation of ultra-small self-focusing optical fiber probe[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (2): 348-357.

作者简介



张帆 (通信作者), 分别在 2010 年和 2015 年于清华大学获得学士学位和博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为生物 MEMS、生物医学检测等。

E-mail: zhangfan@bistu.edu.cn

Zhang Fan (Corresponding author) received her B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tsinghua University in 2010 and 2015, respectively. She is currently an associate professor and a M. Sc. supervisor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include bio-MEMS and biomedical detection, etc.



樊文强, 2020 年于井冈山大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为生物传感与医学仪器。

E-mail: fanwenqiang397@163.com

Fan Wenqiang received his B. Sc. degree from Jinggangshan University in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include biosensors and medical instruments.