

文章编号 1004-924X(2017)07-1727-11

基于光学傅里叶变换的周期性微结构缺陷检测

董明利*, 李波, 张帆, 孙鹏

(北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘要: 为了实现大视场周期性微结构缺陷检测, 提出了一种基于光学傅里叶变换(FT)的大视场周期性微结构缺陷检测方法, 并搭建相关实验系统进行实验验证。首先, 对周期性微结构的像进行二维快速傅里叶变换, 获取周期性微结构的空频谱; 然后, 选取一级衍射斑点中的一个斑点做快速傅里叶逆变换, 得到周期性微结构的幅值分布图; 最后, 根据幅值分布图中的幅值突变位置确定缺陷的位置以及根据幅值突变的剧烈程度来定性地判断缺陷处的点偏离原来位置的位移。实验结果表明: 该套系统的测量视场能达到 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, 测量分辨率能达到 $0.5 \mu\text{m}$ 以上, 在保证分辨率达到要求的前提下, 大大地提高了检测视场, 能够快速、高效、便捷地在大视场下对周期性微结构进行缺陷检测。

关键词: 傅里叶变换; 大视场; 周期性微结构; 缺陷检测

中图分类号: O438.2; TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1727

Detection of periodic microstructure defect based on optical Fourier transform

DONG Ming-li*, LI Bo, ZHANG Fan, SUN Peng

(Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology,
Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

* Corresponding author, E-mail: dongml@bistu.edu.cn

Abstract: In order to achieve defect detection of periodic microstructure in a large field of view, a defect detection method based on optical Fourier transform was proposed and relevant experimental system was established. Firstly, the periodic microstructure imaging was subject to two-dimensional fast Fourier transform for deriving spatial frequency spectrum of periodic microstructure. Then, a spot among first-order diffraction spots was chosen to be processed by fast Fourier transform for obtaining the amplitude histogram. According to the mutation location in the amplitude histogram, defect positions were determined. The deviation of defects was proportional to the intensity of the amplitude mutations. The experimental result shows that the system can provide a measurement field of view of $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ and the measurement resolution over $0.5 \mu\text{m}$, improving the detection field greatly on the premise of an adequate resolution. The proposed method enables fast, efficient and convenient defect detection of periodic microstructure in a large field of view.

Key words: Fourier transform; wide field; periodic microstructure; defect detection

收稿日期: 2017-02-22; 修订日期: 2017-04-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61605011); 教育部创新团队项目

1 引 言

随着微纳技术和集成光路的发展,光电器件的尺寸逐渐趋于微纳尺度。光栅、光子晶体等周期性微结构被广泛应用于各种新型的微型光电器件中^[1]。周期性微结构在制造过程中如果存在局部缺陷,整个周期性微结构的性质将发生改变。例如,光栅中存在的局部缺陷会影响光栅周期的均匀性,当它作为载体来测量物体变形时,由于光栅周期的均匀性直接决定了测量结果的准确性,所以测量结果会出现误差^[2];光子晶体中存在缺陷,并且缺陷满足一些特定的条件时会形成缺陷模,缺陷模会使光子禁带中出现品质非常高的杂质态。这些杂质态可以透过一些特定频段的光子,从而打破光子禁带的禁光性^[3-4]。周期性微结构也可以用作增透膜,研究表明,亚波长的周期性微结构具有明显的增透减反作用。周期性微结构的周期决定了增透的波段,当周期性微结构存在缺陷时,增透的波段也会受到影响^[5]。由此可见,缺陷对于周期性微结构的性质具有很大的影响。

周期性的聚二甲基硅氧烷(ploydimethylsiloxane, PDMS)微柱阵列可用来测量细胞收缩力。将细胞接种在周期性的 PDMS 微柱阵列上,细胞发生收缩,该区域的微柱就会发生位移,对位移区域进行检测就能获取细胞力的矢量场^[6]。实际应用中经常需要比较相邻细胞的收缩力,高倍显微镜成像的方法无法满足大视场要求,因此,研究大视场下周期性微结构缺陷的缺陷检测对周期性微结构材料的发展与实际应用具有十分重要的现实意义^[7]。

当前,国内大多采用人工目检法对周期性微结构的缺陷进行检测。首先通过高倍显微镜人工目测周期性微结构是否存在缺陷,然后对存在缺陷的周期性微结构进行人工标记和分类存放。为了提高检测效率,一些学者在此基础上引入了机器视觉,利用电动二维平移台、步进电机和缺陷检测软件来实现周期性微结构缺陷的自动检测^[8]。此外,国内外经常利用云纹法来检测周期性微结构的缺陷,特别是用来检测光栅局部变形引起的局部缺陷。云纹法最早是由 Weller 和 Shepard 在 1948 年提出的^[9],通过变形前和变形后的周期性结构相互叠加产生云纹,从云纹中能够获取缺

陷信息。随着微纳材料的发展,国内外学者在此基础上分别提出了原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)云纹法、透射电子显微镜(Transmission Electron Microscopy, TEM)云纹法、扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)云纹法和扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)云纹法等,通过显微镜的扫描线做参考栅来进行微尺度的缺陷测量^[10]。高分辨率透射电镜(High Resolution Transmission Electron Microscopy, HRTEM)和几何相位法(Geometric Phase Analysis, GPA)相结合的手段也可用来检测周期性微结构缺陷^[11-12]。GPA 是 M. J. Hytch 教授于 1998 年在 Ultramicroscopy 杂志上提出的。理想周期性微结构的高分辨率像可以看作是不同空间频率的傅里叶叠加。将被测的周期性微结构高分辨率像进行一次傅里叶变换后得到频谱图,选择其中两个非线性相关的衍射斑点进行傅里叶逆变换,得到被测周期性微结构的相位分布,与理想周期性微结构的相位相减,从而得到缺陷区域的相位场^[13-14]。

人工目检和机器视觉的方法中用到了高倍显微镜,由于分辨率与视场是一对相互矛盾的参数,分辨率越高,视场越小,在 $60\times$ 物镜下,普通光学显微镜的分辨率最大能达到 $0.5\ \mu\text{m}$,视场只能达到 $150\ \mu\text{m}\times 150\ \mu\text{m}$ 左右。GPA 方法通过图像处理实现周期性微结构的傅里叶变换,检测精度依赖于成像分辨率,检测视场依赖于高分辨率透射电镜的视场,分辨率虽然可达到 $0.2\ \text{nm}$,但此时的视场只有 $50\ \text{nm}\times 50\ \text{nm}$ 左右,所以难以同时获得较大的视场和较高的分辨率。云纹法相比于以上 3 种方法虽然检测视场有所增加,但是它仅对连续、均匀的缺陷比较敏感,对局部的突变(例如单个结构的缺失)不敏感。因此这些方法均不能实现对大面积周期性微结构缺陷的快速检测。

为了保证分辨率达到要求的前提下扩大检测视场,本文提出了一种基于光学傅里叶变换的大视场下周期性微结构缺陷检测系统。该系统的检测视场能达到 $1.5\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$,是传统缺陷检测方法的几十倍,其分辨率能达到 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上,并且具有成本低、快速高效、操作简便等特点。

2 系统原理及仿真

2.1 系统原理

基于光学傅里叶变换的周期性微结构缺陷检测系统如图 1 所示。点激光器发出的激光经过透镜 L_1 聚焦在直径为 $25 \mu\text{m}$ 的针孔上,针孔用来滤除高斯光束中的高频杂散光。通过针孔的光经过透镜 L_2 准直以及扩束镜扩束后,成为一束强度均匀的光束^[15],平行照射在样品即物面 P_1 上。样品由一系列周期性点阵组成,各点的直径均为 $3 \mu\text{m}$,除缺陷区域,其余点之间的间距为 $9 \mu\text{m}$,样品可分为 10×10 个区域,每个区域包含了 11×11 个点阵。所有缺陷的产生都是由于该区域的中心点分别向右和向下发生了微小位移,并且位

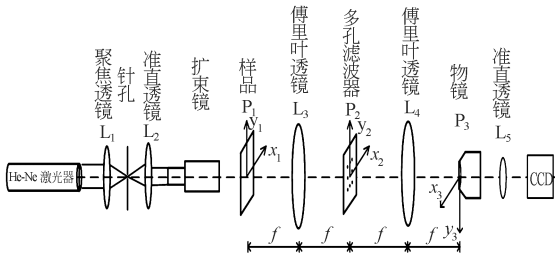


图 1 基于光学傅里叶变换的周期性微结构缺陷检测系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of periodic microstructure defect detection system based on Fourier transform

移向右和向下逐渐增大,相邻两区域中心点同向的位移差在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右。图 2 展示了该样品在 $400 \times$ 光学显微镜下的一个局部放大图,若样品的复振幅透过率为 $f(x_1, y_1)$,经过透镜 L_3 的傅里叶变换后,在频谱面 P_2 上的复振幅分布为:

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x_1, y_1) \exp[-i2\pi(ux_1 + vy_1)] dx_1 dy_1, \quad (1)$$

其中: $u = \frac{x_2}{\lambda f'}$, $v = \frac{y_2}{\lambda f'}$ 。

在频谱面 P_2 上插入特制的多孔滤波器,让一级衍射斑点中的某个强衍射斑点通过,从而滤除低频直流和高频杂散信号,保留二维点阵的空间频率信息(空间频率为 $9 \mu\text{m}^{-1}$)。若滤波器的复振幅透过率 $t(x_2, y_2) = H(u, v)$,滤波器的脉冲响应为 $h(x, y)$,则透过滤波器的光场复振幅分布为:

$$U_2(x_2, y_2) = F(u, v)H(u, v). \quad (2)$$

最后经过透镜 L_4 进行第二次傅里叶变换,在 P_3 面的光场复振幅分布为:

$$U_3(x_3, y_3) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta)h(x_3 - \xi, y_3 - \eta) d\xi d\eta. \quad (3)$$

在 P_3 面上放置一个 $10 \times$ 的显微物镜用来放大,然后经过透镜 L_5 准直后在 CCD 上成像并利用 CCD 的配套软件将采集到的图形记录下来。

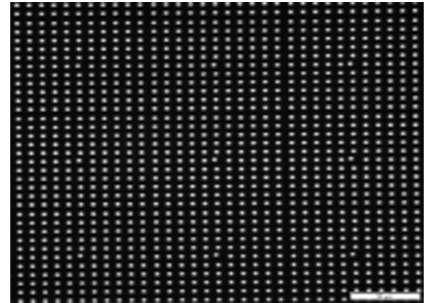


图 2 被测样品在 $400 \times$ 光学显微镜下的局部图
Fig. 2 Local image of measured samples under $400 \times$ optical microscope

理想的周期性微结构的周期是恒定的,对其频谱图中的某个频点进行傅里叶逆变换后得到的幅值图是一个常数。如果周期性微结构中存在缺陷,那么它的频谱也会发生变化,选取频谱图中一级衍射斑点中某个强衍射斑点进行傅里叶逆变换,得到的幅值图中存在幅值突变。因此通过观察 CCD 记录下来的幅值分布图是否有幅值突变,来确定周期性微结构是否存在缺陷。

2.2 系统仿真

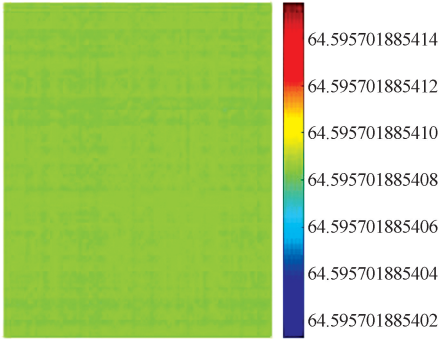
在搭建实验系统之前,需要根据系统原理进行相关的仿真实验,以验证该方法的可行性。首先利用图像处理技术对不包含缺陷与包含缺陷的周期性二维点阵进行傅里叶变换、滤波、傅里叶逆变换等处理,对比二者的幅值分布差异,仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,不包含缺陷的周期性二维点阵经过 $4f$ 空间滤波系统后,像面幅值是恒定不变的,当周期性二维点阵存在缺陷时,缺陷附近的像面幅值会发生突变,如图 3(e) 所示。通过仿真还可以发现空间滤波器选取的点不同,得到的幅值图也不同。图 3(f) 是图 3(c) 的频谱图,将一级衍射斑点进行标号,分别选取这 8 个衍射斑点进行滤波,再经过傅里叶逆变换得到幅



(a) 不含缺陷的点阵图

(a) Lattice without defect



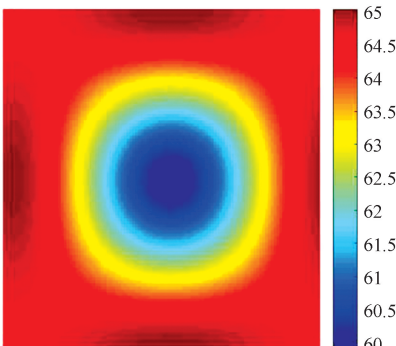
(b) 图(a)的幅值分布

(b) Amplitude distribution of Fig. (a)



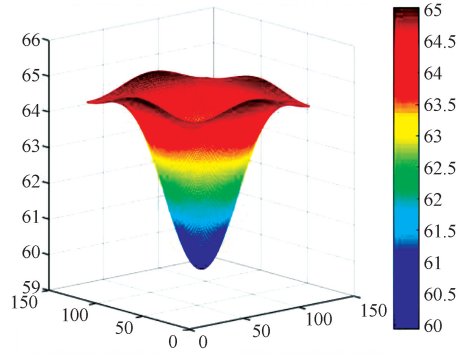
(c) 含缺陷的点阵图

(c) Lattice with defect



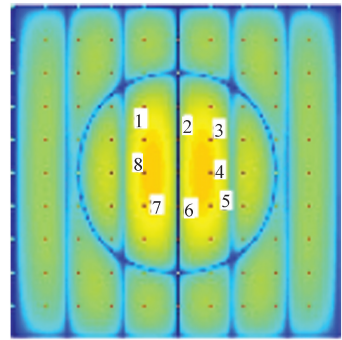
(d) 图(c)的幅值分布

(d) Amplitude distribution of Fig. (c)



(e) 图(d)的三维显示

(e) 3D surface of image in Fig. (c)



(f) 图(c)的频谱图

(f) Spectrum of Fig. (c)

图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

值分布,选取这 8 个频点进行滤波主要是因为这几个频点的光强较大,并且不包含低频直流成分,能够保证最后得到的幅值图整体幅值较高,容易分辨,在实验中采集到的幅值图像光强也较强,易于采集实验结果。

通过仿真发现对角线上的频点 1,3,5,7 对水平和竖直方向上的位移都敏感,频点 2,6 只对水平方向的位移敏感,频点 4,8 只对竖直方向上的位移敏感。当选取对角线上的频点进行滤波时,傅里叶逆变换之后得到的幅值图能够根据幅值突变的位置较好地反映出周期性微结构的缺陷位置;而选取边线中点处的频点进行滤波得到的幅值分布不能准确反映出缺陷位置。因此,实验中选取对角线上的频点进行滤波。

之后再通过 Photoshop 软件,将被测样品的二维点阵分布绘制出来,用作仿真的原始图形,如图 4 所示。该图形可分为 10×10 个区域,每个区

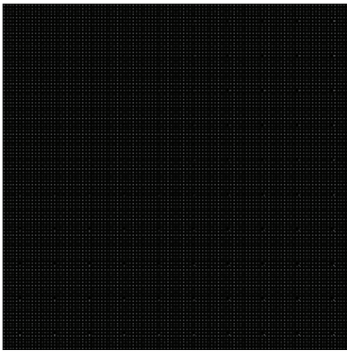


图 4 利用 Photoshop 绘制的二维点阵图

Fig. 4 Two-dimensional lattice image drawn by Photoshop

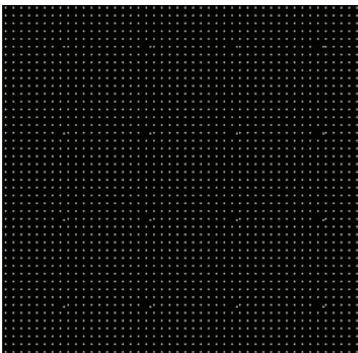


图 5 图 4 的局部放大图

Fig. 5 Local amplification of Fig. 4

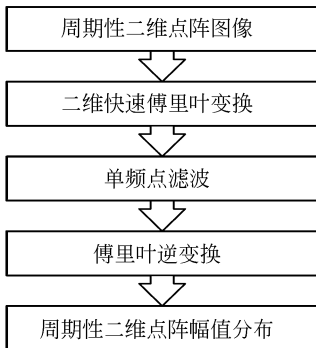


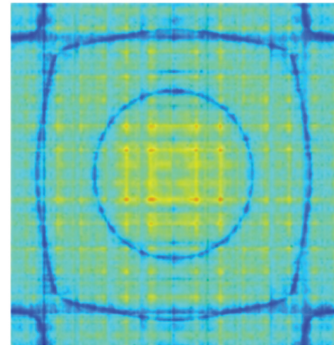
图 6 程序分析步骤图

Fig. 6 Flow chart of image processing

域包含了 11×11 个点阵,所有缺陷的产生都是由于该区域的中心点分别向右和向下发生了微小位移,并且位移逐渐增大。图 5 为图 4 的局部放大图。利用 Matlab 软件对被测图形进行二维快速傅里叶变换、滤波、傅里叶逆变换等处理,考虑到点阵中预设的变形方向为向右、向下以及向右下

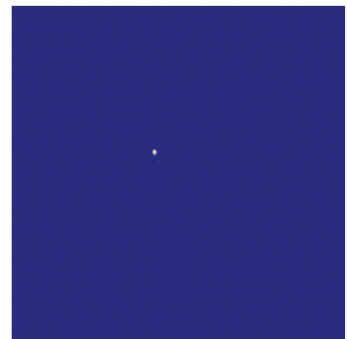
3 个方向,为了快速确定缺陷位置,选取频点 1 进行滤波,具体的分析步骤如图 6 所示。

图 7(a)是将图 4 中的二维点阵进行一次傅里叶变换得到的频谱图。选取一级衍射斑点中的一个频点进行傅里叶逆变换,得到的幅值分布图如图 7(c)所示,图 7(b)该过程中用到的滤波器。利用 mesh() 函数绘制点阵的三维幅值分布图,如图 7(d)所示。



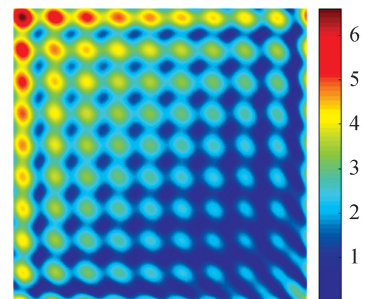
(a) 频谱图

(a) Spectrogram of 2D lattice after first Fourier transform



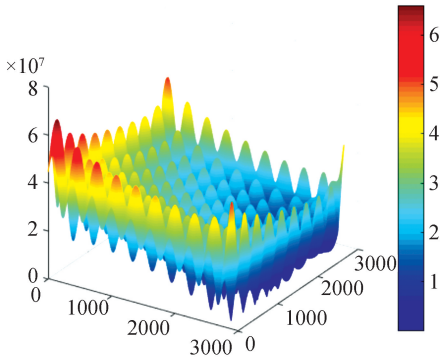
(b) 滤波器

(b) Filter



(c) 幅值图

(c) Amplitude of 2D lattice



(d)图(c)的三维显示

(d)3D demonstration of Fig. (c)

图 7 程序运行结果图

Fig. 7 Results of image processing

从图 7(d)可以非常明显地看出,整个 10×10 的区域存在缺陷的地方,周期性微结构的幅值都会发生突变,并且随着各区域缺陷处的点偏离原来位置的位移增大,各区域的峰值会逐渐减小。将整个幅值图分成 10×10 个区域,用行号和列号的组合来表示各个区域,求出各区域的峰值,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,整个幅值图各区域的峰值随着缺陷处的点偏移距离的增大而逐渐减小。因此从理论上证明了这种方法能够实现大视场下检测周期性微结构缺陷的目的。

表 1 各区域峰值

Tab. 1 Peak value in each region

行列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6.55	5.60	5.28	4.95	4.73	4.54	4.38	4.24	4.13	4.07
2	5.63	4.80	4.47	4.15	3.93	3.74	3.58	3.43	3.33	3.07
3	5.26	4.46	4.11	3.81	3.58	3.31	3.15	3.07	3.00	2.92
4	4.97	4.16	3.75	3.48	3.24	3.05	2.86	2.71	2.69	2.60
5	4.72	3.90	3.52	3.21	3.03	2.81	2.62	2.50	2.41	2.26
6	4.43	3.72	3.33	3.04	2.76	2.53	2.43	2.20	2.18	2.05
7	4.30	3.58	3.15	2.90	2.58	2.42	2.21	2.14	2.13	1.98
8	4.19	3.46	3.02	2.72	2.45	2.29	2.12	1.98	1.88	1.75
9	4.14	3.44	3.00	2.52	2.43	2.31	2.23	1.88	1.75	1.65
10	3.41	3.53	2.67	2.41	2.64	2.46	2.08	1.87	1.77	2.76
所有幅值平均	2.13									

3 实验系统搭建及实验结果分析

3.1 实验系统搭建

为了得到一束光强度分布均匀的激光光束,同时也为了避免实验中某些镜面上的污渍灰尘产生的散射光与其它光发生干涉,在实验系统前端应加入空间针孔滤波光路,让未经散射的零级光通过,滤除高频杂散光^[16]。空间滤波光路见图 8,实际搭建的光路见图 9,实验中所用器件的具体参数及型号见表 2。

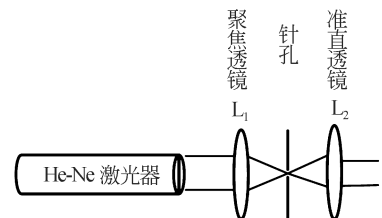


图 8 空间滤波光路图

Fig. 8 Light path of spatial filtering

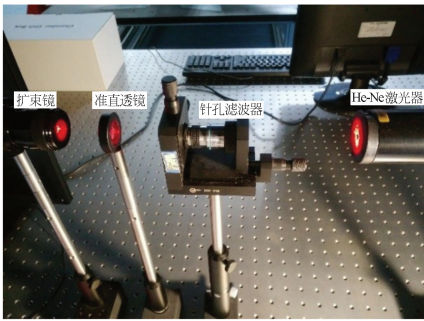


图 9 实际搭建的光路图

Fig. 9 Photo of experimental light path



图 10 准直扩束后的光束

Fig. 10 Beam after collimating and expanding

表 2 各器件的参数及厂家型号

Tab. 2 Parameters and manufacturer of devices

器件	主要参数	厂家、型号
He-Ne 激光器	$\lambda=632.8 \text{ nm}, 35 \text{ mW}$	Newport, R14309
聚焦透镜 L_1	$40\times, \text{NA}=0.65$	Olympus, GCO-21
针孔	$\Phi=25 \mu\text{m}$	GCO-010A
准直透镜 L_2	$f=30 \text{ mm}, \Phi=20 \text{ mm}$	GCL-010217
扩束镜	扩束比 $5\times-10\times$	GCO-2506
傅里叶透镜 L_3	$f=400 \text{ mm}, \Phi=100 \text{ mm}$	GCO-0203M
多孔滤波器	$\Phi=2 \text{ mm}$	定制加工
傅里叶透镜 L_4	$f=400 \text{ mm}, \Phi=100 \text{ mm}$	GCO-0203M
10 倍显微物镜	$10\times, \text{NA}=0.25$	Nikon, MRP00102
CCD 相机	$6.45 \mu\text{m}\times 6.45 \mu\text{m}$	DH-SV1410FM

He-Ne 激光器发出的光通过 $40\times$ 奥林巴斯显微物镜 L_1 汇聚于一点。将针孔放置在显微物镜 L_1 的焦点附近,随着上下左右调节针孔位置,不断地将针孔向 L_1 焦点方向移动,直到在针孔后方得到一个非常亮而且亮度均匀的光斑为止。此时经过准直透镜 L_2 准直,再通过扩束镜扩束后,可以得到一束亮度均匀、较为干净且相干性非常好的平行光。经过准直扩束后的平行光照射在白屏上的光斑如图 10 所示。

被测样品是通过光刻工艺加工得到的含有一系列点阵的掩模版,点阵通光,其他区域不通光,如图 11 所示。经过处理后的激光照射在被测样品上,经过位于样品 400 mm 处的傅里叶透镜 L_3 ,进行第一次傅里叶变换,得到样品频谱。在傅里叶透镜 L_3 的焦点处放置一个特制的多孔滤

波器,滤波器设计图如图 12 所示。选取一级衍射斑点中对角线上的一个斑点通过滤波器,将滤波器其它孔堵住,在距离滤波器 400 mm 处放置第二个傅里叶透镜 L_4 ,进行第二次傅里叶变换,得到该频点下样品的幅值分布。然后经过位于第二个傅里叶透镜 L_4 后方 400 mm 处的尼康 $10\times$ 显微物镜放大,最后用 CCD 相机记录放大后的幅值分布。



图 11 被测样品实物图

Fig. 11 Photo of measured sample

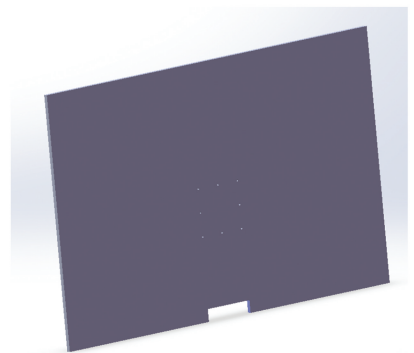


图 12 多孔滤波器设计图

Fig. 12 Schematic diagram of porous filter

其中,多孔滤波器的孔径和位置将直接影响成像质量以及最终的测试精度,通过 Zemax 对光路的前半部分——针孔滤波、准直、扩束和第一次傅里叶变换进行仿真建模,得到多孔滤波器的最优参数:孔径为 2 mm,相邻孔间距为 28 mm。搭建好的实验系统如图 13 所示。为了达到更好的实验效果,本实验是在光学暗室中进行的。

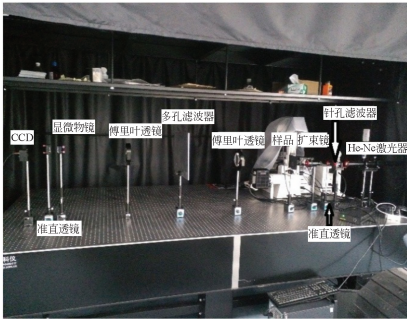


图 13 微结构缺陷检测实验光学系统

Fig. 13 Optical system of microstructure defect detection

3.2 实验结果与分析

实验中,对整个缺陷区的幅值图进行记录,并利用 Matlab 分别将对应的三维幅值图绘制出来,CCD 记录的幅值图如图 14 所示。

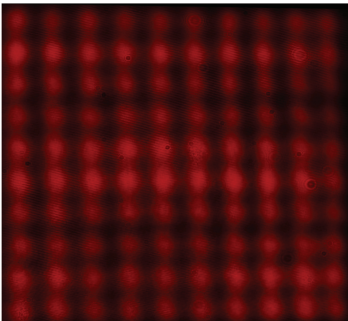


图 14 CCD 记录的幅值图

Fig. 14 Amplitude image recorded by CCD

由于被测样品经过该光学系统后成上下左右互相颠倒的像,因此需要将上图进行上下翻转和左右翻转后,再用 Matlab 绘制出被测样品所对应的三维幅值图,如图 15 所示。

由图 15 可以看出,存在缺陷的区域,周期性微结构的幅值会发生突变,与仿真结果相似。对各区域的幅值进行量化分析,首先根据各峰值的

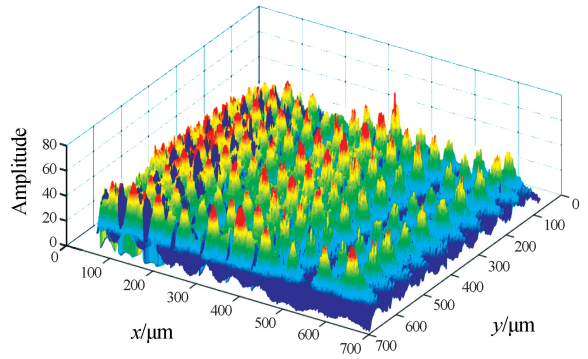


图 15 三维幅值图

Fig. 15 3D amplitude figure

位置将整个幅值图分成 10×10 个区域,用行号和列号的组合来表示各个区域,然后通过程序寻找各区域的峰值位置,以峰值点为中心,将峰值点处 3×3 区域的幅值均值求出,得到峰值均值表。具体程序分析步骤如图 16 所示,各区域峰值均值如表 3 所示。

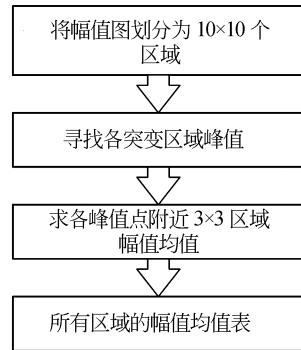


图 16 峰值步骤分析

Fig. 16 Analysis steps of peak values

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2	.	\	\	\	\	\	\	\	\	\
3	.	\	\	\	\	\	\	\	\	\
4	.	\	\	\	\	\	\	\	\	\
5	.	\	\	\	\	\	\	\	\	\
6	.	\	\	\	\	\	\	\	\	\
7	.	\	\	\	\	\	\	\	\	\
8	.	\	\	\	\	\	\	\	\	\

图 17 样品位移场

Fig. 17 Displacement field of sample

通过高倍显微镜测量各区域的中心点位移分布,结果如图 17 所示,箭头代表位移方向,线段长

度代表位移大小,第一行和第一列的数字代表行列号。

表 3 各区域峰值均值

Tab. 3 Average of peak values in different regions

行列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	57.1	59.0	59.8	64.9	62.8	63.7	64.3	48.0	51.6	63.8
2	62.7	68.8	66.6	67.3	67.7	66.2	65.4	64.0	60.9	66.6
3	53.4	61.6	64.6	66.2	64.6	65.0	64.9	60.7	59.0	66.1
4	41.2	54.6	56.1	51.3	53.4	49.7	54.4	45.8	43.8	48.2
5	49.4	59.0	58.9	58.2	58.2	57.9	57.1	56.9	52.0	56.8
6	58.2	56.9	59.2	60.8	56.1	57.0	57.4	54.2	50.8	62.4
7	43.3	56.9	54.6	53.1	53.6	53.2	52.7	48.1	45.7	45.2
8	30.7	40.8	40.3	35.9	38.8	38.3	36.3	35.9	35.0	36.1
9	31.2	36.2	35.5	35.3	34.7	34.7	34.3	33.8	32.9	37.7
10	36.7	37.7	38.7	40.1	35.1	39.2	21.7	38.1	38.5	41.8
所有幅值平均	33.1									

由表 3 可以看出,除去边缘区域误差较大的部分后,中间部分(表 3 中加粗区域)的峰值均值基本遵循着从左往右,从上往下逐渐减小的趋势。由图 17 可以看出,被测样品各区域中心点的位移分布是从左往右,从上往下缺陷处的点偏移距离呈逐渐增大的趋势,也就是说各区域缺陷处点的位移将会影响到该区域的峰值。根据各区域是否存在幅值突变可以判断是否存在缺陷,若存在幅值突变,可根据各区域峰值来定性地判断各区域中心点的位移。由于被测样品各区域中心点的最小位移为 $0.5 \mu\text{m}$,并且幅值分布图中该区域存在明显的幅值突变,由此得出该方法的分辨率能达到 $0.5 \mu\text{m}$ 以上。图 18 为被测样品幅值图在整个 CCD 视场中的占比情况。利用 Photoshop 提供的标尺工具,测得被测样品的幅值图的长宽均为 22.38 cm ,整幅图的长为 40 cm ,宽为 38.75 cm ,由于被测区域的实际尺寸为 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$,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 $0.9 \times 40 / 22.38 \text{ mm} = 1.61 \text{ mm}$,最大宽度为 $0.9 \times 38.75 / 22.38 \text{ mm} = 1.56 \text{ mm}$,因此该套系统的测量视场在 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 以上。而在同等分辨率的前提下,显微镜观测的视场在 $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$

左右。因此,该套系统实现了大视场下周期性微结构的缺陷检测。

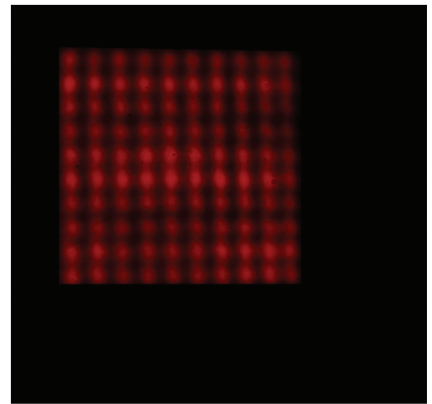


图 18 被测样品幅值在 CCD 视场中的位置
Fig. 18 Position of measured samples in CCD fields

4 结 论

本文根据光学傅里叶变换原理,提出了一种在大视场下周期性微结构的缺陷检测方法。该方法具有方便快捷、成本低、检测视场大等优点。实验结果表明,该方法分辨率在 $0.5 \mu\text{m}$ 以上,检测视场能达到 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$,是传统缺陷检测

方法视场的几十倍。该方法能够快速地检测周期性微结构中是否存在缺陷,并且定性地判断缺陷处的点偏离原来位置的位移。该方法通过在光学 $4f$ 系统中加入特定滤波器,提取出包含周期性微结构空间频率信息的幅值图,根据幅值图中是否

存在幅值突变来判断所检测的样品在视场区域是否存在缺陷,同时可以根据幅值突变的剧烈程度定性地判断缺陷处的点偏离原来位置的位移,从而为工业上周期性微结构缺陷的快速检测提供了一种更为有效的解决方案。

参考文献:

- [1] NIH B, WANG M, LI L, *et al.*. Photonic-crystal-based optical fiber bundles and their applications [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 2400213.
- [2] YANG S, ZHU J G, HUANG Y L, *et al.*. Fabrication of micro-scale gratings for Moiré method with a femtosecond laser [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2016, 6(4): 171-175.
- [3] 刘杰, 铁生年, 卢辉东. 多信道二维光子晶体滤波器[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1021-1027.
LIU J, TIE SH N, LU H D. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1021-1027. (in Chinese)
- [4] VUCKOVI J, LONCAR M, MABUCHI H, *et al.*. Design of photonic crystal microcavities for cavity QED [J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2001, 65(2): 016608.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] ZHANG F, ANDERSON S, ZHENG X, *et al.*. Cell force mapping using a double-sided micropillar array based on the moiré fringe method [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 033702.
- [7] FEI S, SUN Y F, SHI X Q, *et al.*. Techniques for nano-scale deformation measurement [C]. *Proceedings of the 6th Electronics Packaging Technology Conference, IEEE*, 2004: 729-734.
- [8] WANG Y W, FENG C, LIU X L, *et al.*. Correction and extraction of the encoder grating image full-barcode [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 889-890: 1042-1047.
- [9] WELLER R, SHEPARD B M. Displacement measurement by mechanical interferometry [J]. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, 1948, 6(1): 35-38.
- [10] 朱向冰, 何世平, 付绍军, 等. 云纹法检测变线距光栅的线密度[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3): 285-289.
ZHU X B, HE SH P, FU SH J, *et al.*. Measurement of the line-density of a varied-line-space grating by Moiré fringe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 285-289. (in Chinese)
- [11] IMAI T, PUTAUX J L, SUGIYAMA J. Geometric phase analysis of lattice images from algal cellulose microfibrils [J]. *Polymer*, 2003, 44(6): 1871-1879.
- [12] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1636-1644.
HU H, LIANG J, TANG ZH ZH, *et al.*. Measurement of full-field deformations in metal sheet welding processes by image correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1636-1644. (in Chinese)
- [13] HÝTCH M J, PUTAUX J L, PÉNISSON J M. Measurement of the displacement field of dislocations to 0.03Å by electron microscopy [J]. *Nature*, 2003, 423(6937): 270-273.
- [14] HÝTCH M J, SNOECK E, KILAAS R. Quantitative measurement of displacement and strain fields from HREM micrographs [J]. *Ultramicroscopy*, 1998, 74(3): 131-146.
- [15] BI H B, HARTSOUGH C, HAN B. Nano-pattern recognition and correlation technique for Nano-scale deformation measurement [C]. *ASME 2007 InterPACK Conference collocated with the ASME/JSME 2007 Thermal Engineering Heat Transfer Summer Conference, ASME*, 2007: 831-838.
- [16] 张登臣, 郝道银. 实用光学设计方法与现代光学系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 314-317.

ZHANG D CH, YU D Y. *Practical Optical Design Method and Modern Optical System* [M].

Beijing: Mechanical Industry Press, 1995: 314-317. (in Chinese)

作者简介:



董明利(1965—),女,辽宁省鞍山人,教授,1989年于合肥工业大学获得硕士学位,2009年于北京理工大学获得博士学位,主要从事视觉测量技术和生物医学检测技术方面的研究。E-mail: dongml@bistu.edu.cn



李波(1992—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,2015年于北京信息科技大学获得学士学位,主要从事生物医学检测技术方面的研究。E-mail: boboy@mail.bistu.edu.cn