



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104166316 B

(45)授权公告日 2016. 11. 30

(21)申请号 201410421815.7

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2014.08.26

G03F 7/20(2006.01)

G01M 11/02(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104166316 A

审查员 邵文莉

(43)申请公布日 2014.11.26

(73)专利权人 中国科学院上海光学精密机械研究所

地址 201800 上海市嘉定区800-211邮政信箱

(72)发明人 吴飞斌 唐锋 王向朝 李杰 李永

(74)专利代理机构 上海新天专利代理有限公司 31213

代理人 张泽纯 张宁展

权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

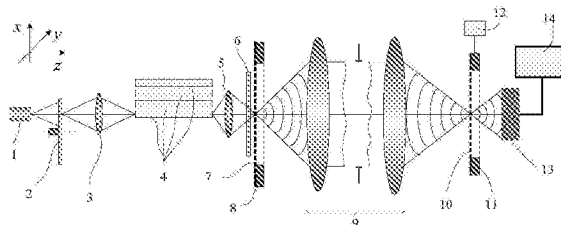
投影物镜波像差在线检测装置和检测方法

(57)摘要

一种投影物镜波像差在线检测装置和方法, 所述检测装置结构包括光源、旋转散射器、第一聚焦透镜、光纤阵列、第二聚焦透镜、散射光学元件、物面光栅板、像面光栅板、二维光电传感器、相移控制模块和计算机; 旋转散射器是由支架、电动机和圆形漫散射光学元件组成, 与多模光纤阵列共同用于将相干光或部分相干光的光源转化为非相干光。通过采集相移量分别为0、

$\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{\pi}{3}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{2\pi}{3}$ 、 $\frac{5\pi}{6}$ 、 $\pi$ 、 $\frac{5\pi}{3}$ 、 $\frac{3\pi}{2}$ 、 $\frac{11\pi}{6}$

的10幅干涉条纹图计算相位, 消除光栅多级衍射光干涉对相位提取精度的影响。本发明改善了物面光栅对光场空间相干性的调制效果, 实现了高精度的对准效果, 降低了波像差检测中相位提取的系统误差, 从而提高光学系统的波像差检测精度。



CN 104166316 B

1. 一种投影物镜波像差在线检测装置,其特征在于,包括:沿光源(1)输出光束方向依次放置的旋转散射器(2)、第一聚焦透镜(3)、光纤阵列(4)、第二聚焦透镜(5)、散射光学元件(6)、物面光栅板(7)、像面光栅板(10)、二维光电传感器(13);

所述的物面光栅板(7)置于物面光栅位移台(8)上,所述的像面光栅板(10)置于像面光栅位移台(11)上,该像面光栅位移台(11)与相移控制模块(12)相连,所述的二维光电传感器(13)与计算机相连(14);

所述的物面光栅板(7)位于被测光学系统(9)的物平面,所述的像面光栅板(10)位于被测光学系统(9)的像平面;

所述的物面光栅板(7)由两个周期为 $P_0$ 且占空比为50%的物面光栅,以及物面光栅对准标记(703)组成,该两个物面光栅分别是光栅线沿y方向的第一光栅(701)和光栅线沿x方向的第二光栅(702);

所述的像面光栅板由像面光栅和像面光栅对准标记组成;

所述的像面光栅是棋盘光栅,具有棋盘形布局,透光单元与遮光单元均为大小相同的正方形,每个透光单元周围为4个遮光单元,每个遮光单元周围为4个透光单元,所述的像面光栅的周期等于正方形的对角线长度,所述的像面光栅透光单元和遮光单元的对角线方向平行于x轴和y轴方向,所述的像面光栅放置成透光单元和遮光单元的对角线方向平行于x轴和y轴方向的状态,沿x方向和y方向看都是朗奇光栅,占空比为50%;

所述的物面光栅的周期 $P_0$ 与所述的像面光栅的周期 $P_i$ 满足如下关系,

$$P_0 = P_i \cdot M$$

其中, $M$ 为被测光学系统(9)的成像放大倍数。

2. 根据权利要求1所述的投影物镜波像差在线检测装置,其特征在于,所述的旋转散射器(2)由支架(203)、电动机(202)和圆形漫散射光学元件(201)组成,用于将相干光或部分相干光转化为非相干光;所述的圆形漫散射光学元件(201)安装在电动机(202)上,在电动机(202)的驱动下沿中心轴转动。

3. 一种利用权利要求2所述的投影物镜波像差在线检测装置,实现投影物镜波像差在线检测方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

①调整旋转散射器(2)的高度,使光源(1)发出的光束从圆形漫散射光学元件(201)的上半部分透过;

调节第一聚焦透镜(3)和光纤阵列(4)输入端,使旋转散射器(2)的透射光耦合到光纤阵列(4)中;

②物面光栅板(7)置于物面光栅位移台(8)上,调整物面光栅位移台(8),使物面光栅板(7)位于被测光学系统(9)的物面上,且物面光栅板(7)上的第一光栅(701)移入被测光学系统(9)的物方视场点位置;

③将散射光学元件(6)置于靠近物面光栅板(7)位置,调整第二聚焦透镜(5)和光纤阵列(4)输出端使物面光栅板(7)被均匀照明;

④像面光栅板(10)置于像面光栅位移台(11)上,移动像面光栅位移台(11)使像面光栅板(10)位于被测光学系统(9)的像面上,且像面光栅(1001)移入被测光学系统(9)的像方光路;

将二维光电传感器(13)置于像面光栅板(10)后,用来探测像面光栅(1001)所形成的干

涉条纹；

⑤调整物面光栅位移台(8),根据物面光栅板(7)上的物面光栅对准标记(703)与像面光栅板(10)上的像面光栅对准标记(1002)形成的差动对准光栅在二维光电传感器(13)上所成的莫尔条纹进行对准,当两组条纹完全重合时,说明完成对第一光栅(701)与像面光栅(1001)的对准和平行调节,进入步骤⑥；

⑥将像面光栅位移台(11)沿x方向移动像面光栅(1001),移动12次,每次移动1/12光栅周期,每次移动后二维光电传感器(13)采集一幅剪切干涉图 $I_{xk}$ ,其中 $k=1,2,3,\dots,12$ ；

选择其中 $I_{x1}$ 、 $I_{x2}$ 、 $I_{x3}$ 、 $I_{x4}$ 、 $I_{x5}$ 、 $I_{x6}$ 、 $I_{x7}$ 、 $I_{x10}$ 、 $I_{x11}$ 、 $I_{x12}$ 的10幅干涉条纹图,按下列公式计算相位：

$$\varphi_x = \arctan \frac{I_{x10} - I_{x4} + I_{x12} - I_{x2} + \sqrt{3}(I_{x11} - I_{x3})}{I_{x1} - I_{x7} + I_{x3} - I_{x5} + \sqrt{3}(I_{x2} - I_{x6})}$$

其中, $\varphi_x$ 为被测波前沿x方向的相位,代表被测波前在x方向上的梯度信息；

⑦移动物面光栅位移台(8),将物面光栅板(7)上的第二光栅(702)移入被测光学系统(9)的物方视场点位置；调整物面光栅位移台(8),根据物面光栅板(7)上的物面光栅对准标记(703)与像面光栅板(10)上的像面光栅对准标记(1002)形成的差动对准光栅在二维光电传感器(13)上所成的莫尔条纹进行对准,当两组条纹完全重合时,说明完成对第二光栅(702)与像面光栅(1001)的对准和平行调节,进入步骤⑧；

⑧将像面光栅位移台(11)沿y方向移动像面光栅(1001),移动12次,每次移动1/12光栅周期,每次移动后二维光电传感器(13)采集一幅剪切干涉图 $I_{yk}$ ,其中 $k=1,2,3,\dots,12$ ；

选择其中 $I_{y1}$ 、 $I_{y2}$ 、 $I_{y3}$ 、 $I_{y4}$ 、 $I_{y5}$ 、 $I_{y6}$ 、 $I_{y7}$ 、 $I_{y10}$ 、 $I_{y11}$ 、 $I_{y12}$ 的10幅干涉条纹图,按下列公式计算相位：

$$\varphi_y = \arctan \frac{I_{y10} - I_{y4} + I_{y12} - I_{y2} + \sqrt{3}(I_{y11} - I_{y3})}{I_{y1} - I_{y7} + I_{y3} - I_{y5} + \sqrt{3}(I_{y2} - I_{y6})}$$

其中, $\varphi_y$ 为被测波前沿y方向的相位,代表被测波前在y方向上的梯度信息；

⑨对步骤⑥和步骤⑧得到的相位提取结果解包裹,将分别得到x方向和y方向的差分波前 $\Delta W_x$ 和 $\Delta W_y$ 进行剪切干涉波前重建,获得被测光学系统(9)波前。

## 投影物镜波像差在线检测装置和检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种光学系统的波像差检测装置,特别是涉及一种采用拓展光源照明的光刻机投影物镜的波像差在线检测装置及方法。

### 背景技术

[0002] 光刻技术是极大规模集成电路制造的核心技术之一,通过曝光的方法将掩模上的图形转移到涂覆于硅片表面的光刻胶上,然后通过显影、刻蚀等工艺将图形转移到硅片上。投影物镜是光刻机成像系统的核心部件,投影物镜的波像差是导致光刻成像质量恶化的主要因素,并最终导致光刻机的成像对比度下降、工艺窗口缩小和产品良率降低。在实际曝光过程中,系统微振动和镜片持续受到准分子激光的不均匀加热等因素都会导致投影物镜波像差的剧烈变化,因此需要在光刻机中集成光刻机投影物镜波像差在线测量装置,以快速、高精度地实现对投影物镜波像差的在线检测。

[0003] 光刻机投影物镜波像差检测技术按照测量对象可分为三类:基于光刻胶曝光的波像差检测技术、基于空间像测量的波像差检测技术以及基于瞳面测量的波像差检测技术(PMI)。朗奇剪切干涉是一种基于瞳面测量的波像差检测技术,照明光束通过由漫射元件制造的掩模标记形成均匀衍射光进入投影物镜光瞳,光束被投影物镜像面上的剪切光栅分裂成两个完全相同的波前,这两个波前相互错开一定距离并在远场相干得到衍射图样。通过测量干涉图样,并利用相位恢复算法可以提取出投影物镜的波像差,具有没有空间光程误差、检测精度高、灵敏度高等优点,可以很好地应用于投影物镜的波像差在线检测中。但是,朗奇剪切干涉要求光源为非相干光源,且光栅多级衍射光相互干扰会严重影响相位提取精度,同时对物面和像面上的衍射光栅的平行度、准直度要求较高。因此降低光源的空间相干性、消除光栅多级衍射误差、提高光栅的对准和平行效果,是朗奇剪切干涉应用于高精度投影物镜波像差检测的前提。

[0004] Van De Kerckhof等提出一种通过在光刻机掩模平台和硅片平台上集成基于朗奇剪切干涉原理的波像差检测装置(参考在先技术[1],Van de Kerckhof,M.,et al.,Full optical column characterization of DUV lithographic projection tools.Optical Microlithography Xvii,Pts 1-3,2004.5377:p.1960-1970),实现光刻机投影物镜波像差在线检测。但是该装置存在的问题是:光源为部分相干光,直接影响对光场空间相干性的调制效果从而影响测量精度等问题。美国专利US7333216公开了一种采用多模光纤阵列降低光源空间相干性的波像差检测装置(参考在先技术[2],U.Wegmann,H.Haidner,M.Schriever.Apparatus for wavefront detection,United States patent US7333216B2,2008.),但是该装置存在的问题是:物面光栅和像面光栅之间缺乏有效的对准和平行调节功能,容易引入系统误差。Matthieu Visser等提出了扩展光源干涉仪进行EUV光刻物镜波像差检测(参考在先技术[3],Matthieu Visser,Martign K.Dekker,Petra Hegeman,et al.,“Extended source interferometry for at-wavelength test of EUV-optics”,Emerging Lithographic Technologies Iii,Pts 1 and 2,1999.3676:p.253-

263),但是存在的问题是没有消除较高级次衍射项与0级的干涉。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服上述在先技术的不足,提供了一种基于朗奇剪切干涉原理的投影物镜的波像差在线检测装置,利用该装置测量投影物镜波像差,具有速度快、精度高的优点。

[0006] 本发明的技术解决方案如下:

[0007] 一种投影物镜波像差在线检测装置,其特点在于:沿光源输出光束方向依次是旋转散射器、第一聚焦透镜、光纤阵列、第二聚焦透镜、散射光学元件、物面光栅板、像面光栅板、二维光电传感器;所述的物面光栅板置于物面光栅位移台上,所述的像面光栅板置于像面光栅位移台上,所述的像面光栅位移台与相移控制模块相连,所述的二维光电传感器与计算机相连。

[0008] 所述的旋转散射器,由支架、电动机和圆形漫散射光学元件组成,用于将相干光或部分相干光转化为非相干光;所述的圆形漫散射光学元件安装在电动机上,在电动机的驱动下沿中心轴转动;

[0009] 所述的散射光学元件是毛玻璃、微透镜阵列等使照明光束在被测光学系统数值孔径内均匀照明的光学元件;

[0010] 所述的光纤阵列由多模光纤按蜂窝状排列的光纤束,可进一步破坏光场空间相干性;

[0011] 所述的物面光栅板由两个周期为 $P_0$ 且占空比为50%的物面光栅和物面光栅对准标记组成,两个物面光栅分别是光栅线沿y方向的第一光栅和光栅线沿x方向的第二光栅。

[0012] 所述的第一光栅和第二光栅是相位光栅或振幅光栅或其他类型的衍射光栅。

[0013] 所述的物面光栅的周期 $P_0$ 与所述的像面光栅的周期 $P_i$ 满足如下关系,

[0014]  $P_0 = P_i \cdot M$

[0015] 其中, $M$ 为被测光学系统的成像放大倍数;

[0016] 所述的物面光栅对准标记由位于上方的第三光栅和位于下方的第四光栅组成;所述的第三光栅和第四光栅都是线光栅,周期分别为 $P_1$ 和 $P_2$ ,且相差为5%;

[0017] 所述的被测光学系统数值孔径为 $NA$ ,成像放大倍数为 $M:1$ ;

[0018] 所述的像面光栅板由像面光栅和像面光栅对准标记组成;

[0019] 所述的像面光栅是具有棋盘形布局,透光单元与遮光单元均为大小相同的正方形,每个透光单元周围为4个遮光单元,每个遮光单元周围为4个透光单元;所述的像面光栅的周期 $P_i$ 等于正方形的对角线长度;所述的像面光栅透光单元和遮光单元的对角线方向平行于x轴和y轴方向;

[0020] 所述的像面光栅对准标记由位于上方的第五光栅和位于下方的第六光栅组成,所述的物面光栅对准标记第四光栅的周期等于第五光栅的周期与被测光学系统成像放大倍数的乘积,所述的物面光栅对准标记第三光栅的周期等于第六光栅的周期与被测光学系统成像放大倍数的乘积;

[0021] 所述的物面光栅位移台是将第一光栅和第二光栅分别移入被测光学系统物方光路的位移台;

[0022] 所述的像面光栅位移台是将像面光栅移入被测光学系统的像方光路,并带动像面像面光栅沿x方向和沿y方向运动的位移台;

[0023] 所述的二维光电传感器是照相机、CCD、CMOS图像传感器、PEEM,或二维光电探测器阵列,其探测面上接收像面光栅生成的剪切干涉条纹;

[0024] 所述的计算机用于控制波像差检测过程、存储测量数据,并对干涉图进行处理与分析。

[0025] 一种投影物镜波像差在线检测方法,实现步骤如下:

[0026] (1)调整旋转散射器的高度,使光源发出的光束从圆形漫散射光学元件的上半部分透过;调节第一聚焦透镜和光纤阵列输入端,使旋转散射器的透射光较好地耦合到光纤阵列中;

[0027] (2)物面光栅板置于物面光栅位移台上,并调整到被测光学系统的物面上,移动物面光栅位移台,将物面光栅板上的第一光栅移入被测光学系统的物方视场点位置;

[0028] (3)将散射光学元件置于靠近物面光栅板位置,调整第二聚焦透镜和光纤阵列输出端使物面光栅板被均匀照明;

[0029] (4)像面光栅板置于像面光栅位移台上,并调整到被测光学系统的像面上,移动像面光栅位移台,将像面光栅移入被测光学系统的像方光路,将二维光电传感器置于像面光栅板后,用来探测像面光栅所形成的干涉条纹;

[0030] (5)调整物面光栅位移台,根据物面光栅板上的物面光栅对准标记与像面光栅板上的像面光栅对准标记形成的差动对准光栅在二维光电传感器上所成的莫尔条纹进行对准,当两组条纹完全重合时,说明完成对第一光栅与像面光栅的对准和平行调节(参见在先技术[4],Moon,E.E.and H.I.Smith,Nanometer-precision pattern registration for scanning-probe lithographies using interferometric-spatial-phase imaging.Journal of Vacuum Science&Technology B:Microelectronics and Nanometer Structures,2006.24(6):p.3083-3087.);

[0031] (6)像面光栅位移台沿x方向移动像面光栅,移动12次,每次移动1/12光栅周期,每次移动后二维光电传感器采集一幅剪切干涉图 $I_{xk}$ ,其中 $k=1,2,3,\dots,12$ ;选择其中的除了第8、9幅的10幅干涉条纹图,按下列公式计算相位:

$$[0032] \quad \varphi_x = \arctan \frac{I_{x10} - I_{x4} + I_{x12} - I_{x2} + \sqrt{3}(I_{x11} - I_{x3})}{I_{x1} - I_{x7} + I_{x3} - I_{x5} + \sqrt{3}(I_{x2} - I_{x6})}$$

[0033] 其中, $\varphi_x$ 为被测波前沿x方向的相位,代表被测波前在x方向上的梯度信息;

[0034] (7)移动物面光栅位移台,将物面光栅板上的第二光栅移入被测光学系统的物方视场点位置;调整物面光栅位移台,根据物面光栅板上的物面光栅对准标记与像面光栅板上的像面光栅对准标记形成的差动对准光栅在二维光电传感器上所成的莫尔条纹进行对准,当两组条纹完全重合时,说明完成对第二光栅与像面光栅的对准和平行调节;

[0035] (8)像面光栅位移台沿y方向移动像面光栅,移动12次,每次移动1/12光栅周期,每次移动后二维光电传感器采集一幅剪切干涉图 $I_{yk}$ ,其中 $k=1,2,3,\dots,12$ ;选择其中的除了第8、9幅的10幅干涉条纹图,按下列公式计算相位:

$$[0036] \quad \varphi_y = \arctan \frac{I_{y10} - I_{y4} + I_{y12} - I_{y2} + \sqrt{3}(I_{y11} - I_{y3})}{I_{y1} - I_{y7} + I_{y3} - I_{y5} + \sqrt{3}(I_{y2} - I_{y6})}$$

[0037] 其中,  $\varphi_y$  为被测波前沿y方向的相位,代表被测波前在y方向上的梯度信息;

[0038] (9)对上述相位提取结果解包裹,分别得到x方向和y方向的差分波前  $\Delta W_x$ 和  $\Delta W_y$ 进行剪切干涉波前重建,获得被测光学系统波前。

[0039] 与在先技术相比,本发明具有以下优点:

[0040] 1.采用了旋转散射器和光纤阵列,进一步破坏了光源空间相干性,改善了物面光栅对光场空间相干性的调制效果,提高了光学系统波像差的测量精度。

[0041] 2.采用差分光栅作为对准标记,产生对位移具有高灵敏度特性的放大莫尔条纹,从而实现了高精度的对准效果,降低系统误差。

[0042] 3.可以很好地消除0级与±1级外的较高级次衍射项,可以很好地消除朗奇剪切干涉中多级衍射光干涉造成的对相位提取精度的影响。

[0043] 4.改善了物面光栅对光场空间相干性的调制效果,实现了高精度的对准效果,降低了波像差检测中相位提取的系统误差,从而提高光学系统的波像差检测精度。

## 附图说明

[0044] 图1为本发明的投影物镜波像差在线检测装置示意图;

[0045] 图2为旋转散射器示意图;

[0046] 图3为光纤阵列横截面图;

[0047] 图4为物面光栅板示意图;

[0048] 图5为像面光栅板示意图;

[0049] 图6为光栅对准标记不同相对位移情况下产生的莫尔条纹。

## 具体实施方式

[0050] 为使本发明的内容、实施过程和优点更加清楚,下面结合实施例和附图对本发明作进一步说明,但不应以此实施例限制本发明的保护范围。

[0051] 图1为本发明的投影物镜波像差在线检测装置的示意图,由图可见,该装置结构包括:沿光源1输出光束方向依次是旋转散射器2、第一聚焦透镜3、光纤阵列4、第二聚焦透镜5、散射光学元件6、物面光栅板7、像面光栅板10、二维光电传感器13;所述的物面光栅板7置于物面光栅位移台8上,所述的像面光栅板10置于像面光栅位移台上11,所述的像面光栅位移台11与相移控制模块12相连,所述的二维光电传感器11与计算机14相连;

[0052] 所述的旋转散射器2(参见图2),由支架203、电动机202和圆形漫散射光学元件201组成,用于将相干光或部分相干光转化为非相干光;所述的圆形漫散射光学元件201安装在电动机202上,在电动机202的驱动下沿中心轴转动;

[0053] 所述的散射光学元件6是毛玻璃、微透镜阵列等使照明光束在被测光学系统9数值孔径内均匀照明的光学元件;

[0054] 所述的光纤阵列4(参见图3)由多模光纤按蜂窝状排列的光纤束,用于进一步破坏光场的空间相干性;

[0055] 所述的物面光栅板7(参见图4)由两个周期为 $P_0$ 且占空比为50%的物面光栅和物面光栅对准标记703组成,两个物面光栅分别是光栅线沿y方向的第一光栅701和光栅线沿x方向的第二光栅702。

[0056] 所述的第一光栅701和第二光栅702是相位型或振幅型或其他类型的一维衍射光栅。

[0057] 所述的物面光栅对准标记703由位于上方的第三光栅704和位于下方的第四光栅705组成;所述的第三光栅704和第四光栅705都是线光栅,周期分别为 $P_1$ 和 $P_2$ ,且相差为5%;

[0058] 所述的像面光栅板10(参见图5)由像面光栅1001和像面光栅对准标记1002组成;

[0059] 所述的像面光栅1001是棋盘光栅,具有棋盘形布局,透光单元与遮光单元均为大小相同的正方形,每个透光单元周围为4个遮光单元,每个遮光单元周围为4个透光单元;所述的像面光栅1001的周期 $P_i$ 等于正方形的对角线长度;所述的像面光栅1001透光单元和遮光单元的对角线方向平行于x轴和y轴方向;

[0060] 理想情况下,像面光栅1001衍射只有0级和其他奇数项,偶数项缺级,且光能主要集中在0级与 $\pm 1$ 级上,各奇数衍射级在远场与0级产生干涉,在剪切方向上等效光栅的周期为棋盘光栅每个单元结构正方形边长的 $\sqrt{2}$ 倍。

[0061] 所述的像面光栅1001放置成透光单元和遮光单元的对角线方向平行于x轴和y轴方向的状态,沿x方向和y方向看都是朗奇光栅,占空比为50%。

[0062] 所述的像面光栅对准标记1002由位于上方的第五光栅1003和位于下方的第六光栅1004组成,所述的物面光栅对准标记703第四光栅705的周期等于第五光栅1003的周期与被测光学系统9成像放大倍数的乘积,所述的物面光栅对准标记703第三光栅704的周期等于第六光栅1004的周期与被测光学系统9成像放大倍数的乘积;

[0063] 实施例:

[0064] 在DUV曝光光学系统中,光源1一般为ArF、KrF准分子激光器,即输出光的波长分别为193nm、248nm。以波长为193nm的ArF准分子激光器为光源1,被测光学系统9的数值孔径为0.75,成像放大倍率为4 $\times$ ,设置剪切率为1/20,选择像面光栅801的周期 $P_i$ 为2.6 $\mu\text{m}$ ,物面光栅周期为 $P_0$ 为10.4 $\mu\text{m}$ ;像面光栅对准标记的第五光栅和第六光栅的周期分别为25 $\mu\text{m}$ 、26 $\mu\text{m}$ ;物面光栅标记的第三光栅和第四光栅的周期分别为104 $\mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m}$ 。

[0065] 所述的物面光栅位移台8是将第一光栅701和第二光栅702分别移入被测光学系统9物方光路的位移台;

[0066] 所述的像面光栅位移台11是将物面光栅1001移入被测光学系统9的像方光路,并带动物面光栅1001沿x方向和沿y方向运动的位移台;

[0067] 所述的物面光栅对准标记703和像面光栅对准标记802构成差动模式光栅标记,用于实现物面光栅板7和像面光栅板10的纳米级高精度对准;

[0068] 所述的二维光电传感器13是照相机、CCD、CMOS图像传感器、PEEM,或二维光电探测器阵列,其探测面上接收像面光栅10生成的剪切干涉条纹;

[0069] 所述的计算机14用于控制波像差检测过程、存储测量数据,并对干涉图进行处理与分析。

[0070] 使用上述装置和技术可以进行投影物镜波像差检测,检测方法包括下列步骤:

[0071] (1)调整旋转散射器2的高度,使光源1发出的光束从圆形漫散射光学元件201的上

半部分透过;调节第一聚焦透镜3和光纤阵列4输入端,使旋转散射器2的透射光较好地耦合到光纤阵列中4;

[0072] (2)物面光栅板7置于物面光栅位移台8上,并调整到被测光学系统9的物面上,移动物面光栅位移台8,将物面光栅板7上的第一光栅701移入被测光学系统9的物方视场点位置;

[0073] (3)将散射光学元件6置于靠近物面光栅板7位置,调整第二聚焦透镜5和光纤阵列4输出端使物面光栅板7被均匀照明,并保证第一光栅701和物面光栅对准标记703都受到照明;

[0074] (4)像面光栅板10置于像面光栅位移台11上,并调整到被测光学系统9的像面上,移动像面光栅位移台11,将像面光栅1001移入被测光学系统9的像方光路,将二维光电传感器13置于像面光栅板10后,用来探测像面光栅1001的干涉条纹;

[0075] (5)调整物面光栅位移台8,根据物面光栅板7上的物面光栅对准标记703与像面光栅板10上的像面光栅对准标记1002形成的差动对准光栅在二维光电传感器13上所成的莫尔条纹进行对准;参见附图6,(a)~(d)分别是在两组标记光栅相对位移逐渐减小过程对应的莫尔条纹图案,(e)是两组光栅完全重合,实现物面光栅和像面光栅对准时的条纹图案;当调整物面光栅位移台11使两组条纹完全重合时,说明完成对第一光栅701与像面光栅1001的对准和平行调节;

[0076] (6)像面光栅位移台11沿x方向移动像面光栅1001,移动12次,每次移动1/12光栅周期,每次移动后二维光电传感器13采集一幅剪切干涉图 $I_{xk}$ ,其中 $k=1,2,3,\dots,12$ ;选择其中的 $I_{x1}$ 、 $I_{x2}$ 、 $I_{x3}$ 、 $I_{x4}$ 、 $I_{x5}$ 、 $I_{x6}$ 、 $I_{x7}$ 、 $I_{x10}$ 、 $I_{x11}$ 、 $I_{x12}$ ,即分别对应于x方向上相移量为 $0$ 、 $\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{\pi}{3}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{2\pi}{3}$ 、 $\frac{5\pi}{6}$ 、 $\pi$ 、 $\frac{5\pi}{3}$ 、 $\frac{3\pi}{2}$ 、 $\frac{11\pi}{6}$ 的10幅干涉条纹图,按下列公式计算相位:

$$[0077] \quad \varphi_x = \arctan \frac{I_{x10} - I_{x4} + I_{x12} - I_{x2} + \sqrt{3}(I_{x11} - I_{x3})}{I_{x1} - I_{x7} + I_{x3} - I_{x5} + \sqrt{3}(I_{x2} - I_{x6})}$$

[0078] 其中, $\varphi_x$ 为被测波前沿x方向的相位,代表被测波前在x方向上的梯度信息;

[0079] (7)移动物面光栅位移台8,将物面光栅板7上的第二光栅702移入被测光学系统9的物方视场点位置;调整物面光栅位移台8,根据物面光栅板7上的物面光栅对准标记703与像面光栅板10上的像面光栅对准标记1002形成的差动对准光栅在二维光电传感器上所成的莫尔条纹进行对准,当两组条纹完全重合时,说明完成对第二光栅702与像面光栅1001的对准和平行调节;

[0080] (8)像面光栅位移台11沿y方向移动像面光栅1001,移动12次,每次移动1/12光栅周期,每次移动后二维光电传感器13采集一幅剪切干涉图 $I_{yk}$ ,其中 $k=1,2,3,\dots,12$ ;选择其中的 $I_{y1}$ 、 $I_{y2}$ 、 $I_{y3}$ 、 $I_{y4}$ 、 $I_{y5}$ 、 $I_{y6}$ 、 $I_{y7}$ 、 $I_{y10}$ 、 $I_{y11}$ 、 $I_{y12}$ ,即分别对应于y方向上相移量为 $0$ 、 $\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{\pi}{3}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{2\pi}{3}$ 、 $\frac{5\pi}{6}$ 、 $\pi$ 、 $\frac{5\pi}{3}$ 、 $\frac{3\pi}{2}$ 、 $\frac{11\pi}{6}$ 10幅干涉条纹图,按下列公式计算相位:

$$[0081] \quad \varphi_y = \arctan \frac{I_{y10} - I_{y4} + I_{y12} - I_{y2} + \sqrt{3}(I_{y11} - I_{y3})}{I_{y1} - I_{y7} + I_{y3} - I_{y5} + \sqrt{3}(I_{y2} - I_{y6})}$$

[0082] 其中,  $\varphi_y$  为被测波前沿y方向的相位,代表被测波前在y方向上的梯度信息;

[0083] (9)对上述相位提取结果解包裹,分别得到x方向和y方向的差分波前  $\Delta W_x$ 和  $\Delta W_y$ 进行剪切干涉波前重建,获得被测光学系统9波前。

[0084] 上述波像差检测方法消除像面光栅多级衍射误差的具体理论论述如下:

[0085] 根据朗奇剪切干涉原理,探测平面上的光强为

$$[0086] \quad I = a_0 + \sum_{m=-2k-1}^{2k+1} a_m \cos(\varphi_m) \quad (1)$$

[0087] 其中,  $a_0$ 为背景光强,  $k$ 为正整数,  $a_m$ 为光栅在x方向上衍射的第m级衍射与0级的干涉条纹对比度,  $\varphi_m$ 为光栅在x方向上的第m级衍射与0级间的相位差。考虑相移时,光强表达式可改写为

$$[0088] \quad I = a_0 + \sum_{m=-2k-1}^{2k+1} a_m \cos(\varphi_m + m\delta) \quad (2)$$

[0089] 其中,  $\varphi_m$ 为在x方向上的第m级衍射与0级间的相位差,  $\delta$ 为像面光栅1001沿剪切方向的相移量,则  $m\delta$ 表示光栅沿剪切方向移动时第m级衍射的相移量。

[0090] 如果考虑到像面光栅衍射前9级衍射,假设  $\varphi_m$ 为在剪切方向上的第m级衍射与0级间的相位差,  $m = \pm 1, \pm 3, \dots, \pm 9$ 。为了抑制光栅多级衍射光对相位提取精度的影响,则采集相移量为  $0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}, \frac{2\pi}{3}, \frac{5\pi}{6}, \pi, \frac{5\pi}{3}, \frac{3\pi}{2}, \frac{11\pi}{6}$  的10幅干涉图,各步光强分别为

$$[0091] \quad \begin{aligned} I_0 = & a_0 + a_1 \cos(\varphi_1) + a_3 \cos(\varphi_3) + a_5 \cos(\varphi_5) + a_7 \cos(\varphi_7) + a_9 \cos(\varphi_9) \\ & + a_1 \cos(\varphi_{-1}) + a_3 \cos(\varphi_{-3}) + a_5 \cos(\varphi_{-5}) + a_7 \cos(\varphi_{-7}) + a_9 \cos(\varphi_{-9}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$[0092] \quad \begin{aligned} I_{\frac{\pi}{6}} = & a_0 + a_1 \cos\left(\varphi_1 + \frac{\pi}{6}\right) - a_3 \sin(\varphi_3) - a_5 \cos\left(\varphi_5 - \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \cos\left(\varphi_7 + \frac{\pi}{6}\right) + a_9 \sin(\varphi_9) \\ & + a_1 \cos\left(\varphi_{-1} - \frac{\pi}{6}\right) + a_3 \sin(\varphi_{-3}) - a_5 \cos\left(\varphi_{-5} + \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \cos\left(\varphi_{-7} - \frac{\pi}{6}\right) - a_9 \sin(\varphi_{-9}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$[0093] \quad \begin{aligned} I_{\frac{\pi}{3}} = & a_0 - a_1 \sin\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{6}\right) - a_3 \cos(\varphi_3) + a_5 \sin\left(\varphi_5 + \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \cos\left(\varphi_7 - \frac{\pi}{6}\right) - a_9 \sin(\varphi_9) \\ & + a_1 \sin\left(\varphi_{-1} + \frac{\pi}{6}\right) + a_3 \cos(\varphi_{-3}) + a_5 \sin\left(\varphi_{-5} - \frac{\pi}{6}\right) + a_7 \sin\left(\varphi_{-7} + \frac{\pi}{6}\right) + a_9 \cos(\varphi_{-9}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$[0094] \quad \begin{aligned} I_{\frac{\pi}{2}} = & a_0 - a_1 \sin(\varphi_1) + a_3 \sin(\varphi_3) - a_5 \sin(\varphi_5) + a_7 \sin(\varphi_7) - a_9 \sin(\varphi_9) \\ & + a_1 \sin(\varphi_{-1}) - a_3 \sin(\varphi_{-3}) + a_5 \sin(\varphi_{-5}) - a_7 \sin(\varphi_{-7}) + a_9 \sin(\varphi_{-9}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$[0095] \quad \begin{aligned} I_{\frac{2\pi}{3}} = & a_0 - a_1 \sin\left(\varphi_1 + \frac{\pi}{6}\right) + a_3 \cos(\varphi_3) + a_5 \sin\left(\varphi_5 - \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \sin\left(\varphi_7 + \frac{\pi}{6}\right) - a_9 \cos(\varphi_9) \\ & + a_1 \sin\left(\varphi_{-1} - \frac{\pi}{6}\right) + a_3 \cos(\varphi_{-3}) - a_5 \sin\left(\varphi_{-5} + \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \sin\left(\varphi_{-7} - \frac{\pi}{6}\right) + a_9 \cos(\varphi_{-9}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$[0096] \quad \begin{aligned} I_{\frac{5\pi}{6}} = & a_0 - a_1 \cos\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{6}\right) - a_3 \sin(\varphi_3) + a_5 \cos\left(\varphi_5 + \frac{\pi}{6}\right) + a_7 \cos\left(\varphi_7 - \frac{\pi}{6}\right) + a_9 \sin(\varphi_9) \\ & - a_1 \cos\left(\varphi_{-1} + \frac{\pi}{6}\right) + a_3 \sin(\varphi_{-3}) + a_5 \cos\left(\varphi_{-5} - \frac{\pi}{6}\right) + a_7 \cos\left(\varphi_{-7} + \frac{\pi}{6}\right) - a_9 \sin(\varphi_{-9}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$[0097] \quad I_{\pi} = a_0 - a_1 \cos(\varphi_1) - a_3 \cos(\varphi_3) - a_5 \cos(\varphi_5) - a_7 \cos(\varphi_7) - a_9 \cos(\varphi_9) \\ - a_1 \cos(\varphi_{-1}) - a_3 \cos(\varphi_{-3}) - a_5 \cos(\varphi_{-5}) - a_7 \cos(\varphi_{-7}) - a_9 \cos(\varphi_{-9}) \quad (9)$$

$$[0098] \quad I_{\frac{5\pi}{3}} = a_0 + a_1 \sin\left(\varphi_1 + \frac{\pi}{6}\right) - a_3 \cos(\varphi_3) - a_5 \sin\left(\varphi_5 - \frac{\pi}{6}\right) + a_7 \sin\left(\varphi_7 + \frac{\pi}{6}\right) - a_9 \cos(\varphi_9) \\ - a_1 \sin\left(\varphi_{-1} - \frac{\pi}{6}\right) - a_3 \cos(\varphi_{-3}) + a_5 \sin\left(\varphi_{-5} + \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \sin\left(\varphi_{-7} - \frac{\pi}{6}\right) - a_9 \cos(\varphi_{-9}) \quad (10)$$

$$[0099] \quad I_{\frac{3\pi}{2}} = a_0 + a_1 \sin(\varphi_1) - a_3 \sin(\varphi_3) + a_5 \sin(\varphi_5) - a_7 \sin(\varphi_7) + a_9 \sin(\varphi_9) \\ - a_1 \sin(\varphi_{-1}) + a_3 \sin(\varphi_{-3}) - a_5 \sin(\varphi_{-5}) + a_7 \sin(\varphi_{-7}) - a_9 \sin(\varphi_{-9}) \quad (11)$$

$$[0100] \quad I_{\frac{11\pi}{6}} = a_0 + a_1 \cos\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{6}\right) + a_3 \sin(\varphi_3) - a_5 \cos\left(\varphi_5 + \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \cos\left(\varphi_7 - \frac{\pi}{6}\right) - a_9 \sin(\varphi_9) \\ + a_1 \cos\left(\varphi_{-1} + \frac{\pi}{6}\right) - a_3 \sin(\varphi_{-3}) - a_5 \cos\left(\varphi_{-5} - \frac{\pi}{6}\right) - a_7 \cos\left(\varphi_{-7} + \frac{\pi}{6}\right) + a_9 \sin(\varphi_{-9}) \quad (12)$$

[0101] 根据式(3)~(12)可以求出:

$$[0102] \quad \frac{I_{\frac{3\pi}{2}}}{2} - \frac{I_{\pi}}{2} + \frac{I_{\frac{11\pi}{6}}}{6} - \frac{I_{\frac{\pi}{6}}}{6} + \sqrt{3} \left( \frac{I_{\frac{5\pi}{3}}}{3} - \frac{I_{\frac{\pi}{3}}}{3} \right) = 6a_1 [\sin(\varphi_1) - \sin(\varphi_{-1})] \quad (13)$$

$$I_0 - I_{\pi} + \frac{I_{\frac{\pi}{3}}}{3} - \frac{I_{\frac{2\pi}{3}}}{3} + \sqrt{3} \left( \frac{I_{\frac{\pi}{6}}}{6} - \frac{I_{\frac{5\pi}{6}}}{6} \right) = 6a_1 [\cos(\varphi_1) + \cos(\varphi_{-1})]$$

[0103] 由于当不考虑相移时,处于小剪切量情况下满足

$$[0104] \quad \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} [W(x, y) - W(x - S, y)] \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial x} S = d\varphi \cdot S \\ \varphi_{-1} = \frac{2\pi}{\lambda} [W(x, y) - W(x + S, y)] \approx -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial x} S = -d\varphi \cdot S \quad (14)$$

[0105] 则  $\sin(\varphi_1) = -\sin(\varphi_{-1})$ ,  $\cos(\varphi_1) = \cos(\varphi_{-1})$ 。被测光学系统9沿剪切方向的相位  $\varphi$  为:

$$[0106] \quad \varphi \approx \varphi_1 = \arctan \left\{ \frac{\frac{I_{\frac{3\pi}{2}}}{2} - \frac{I_{\pi}}{2} + \frac{I_{\frac{11\pi}{6}}}{6} - \frac{I_{\frac{\pi}{6}}}{6} + \sqrt{3} \left( \frac{I_{\frac{5\pi}{3}}}{3} - \frac{I_{\frac{\pi}{3}}}{3} \right)}{I_0 - I_{\pi} + \frac{I_{\frac{\pi}{3}}}{3} - \frac{I_{\frac{2\pi}{3}}}{3} + \sqrt{3} \left( \frac{I_{\frac{\pi}{6}}}{6} - \frac{I_{\frac{5\pi}{6}}}{6} \right)} \right\} \quad (15)$$

[0107] 为了恢复被测光学系统9的二维原始波前,需要使用两个正交的剪切方向进行两次剪切干涉,分别获得代表被测波前在x方向和y方向上的梯度信息的  $\varphi_x$  和  $\varphi_y$ 。对上述相位提取结果解包裹,分别得到x方向和y方向的差分波前  $\Delta W_x$  和  $\Delta W_y$  进行剪切干涉波前重建,获得被测光学系统9波前。

[0108] 本技术领域中的普通技术人员应该认识到,以上实施例仅是用来说明本发明,而并非作为对本发明的限定,只要在本发明的实质精神范围内,对以上所述实施例的变化和变形,都属于本发明权利要求书的范围之内。

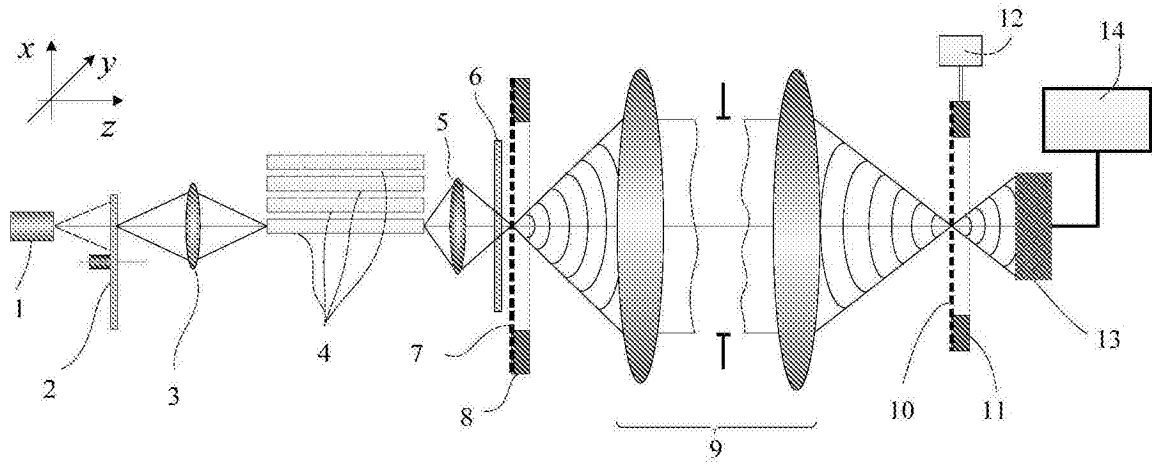


图1

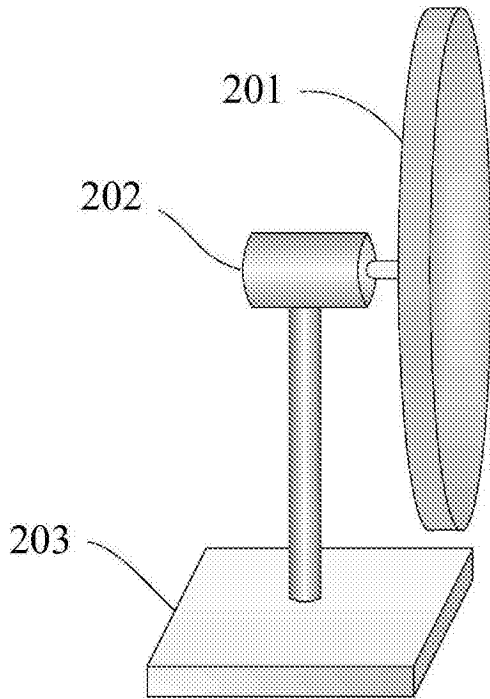


图2

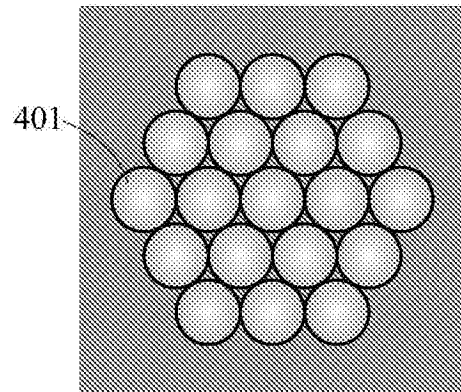


图3

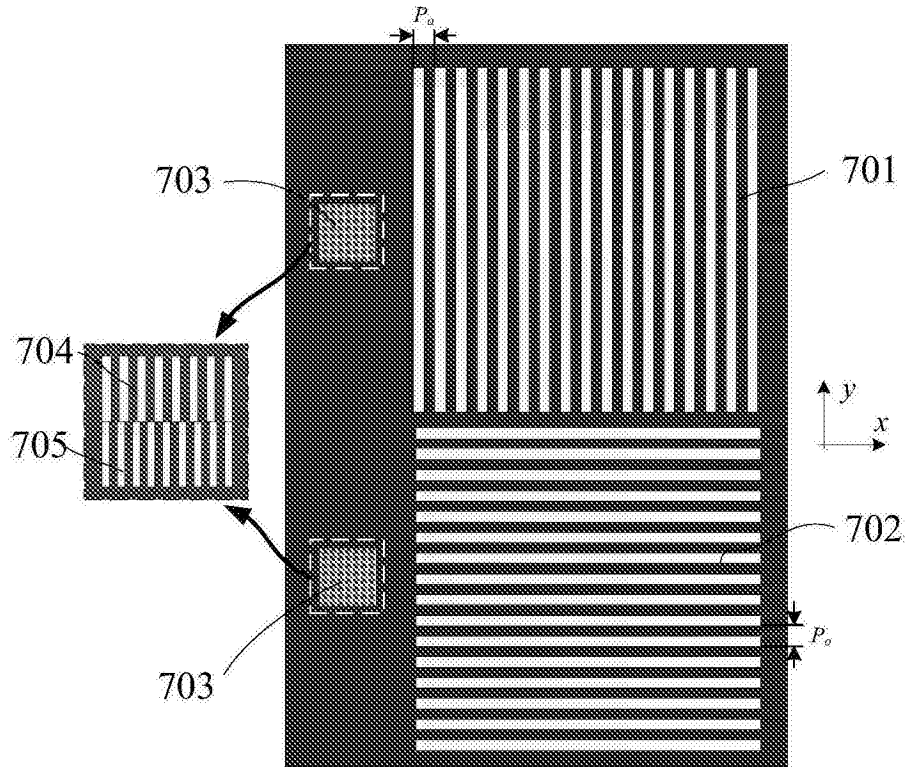


图4

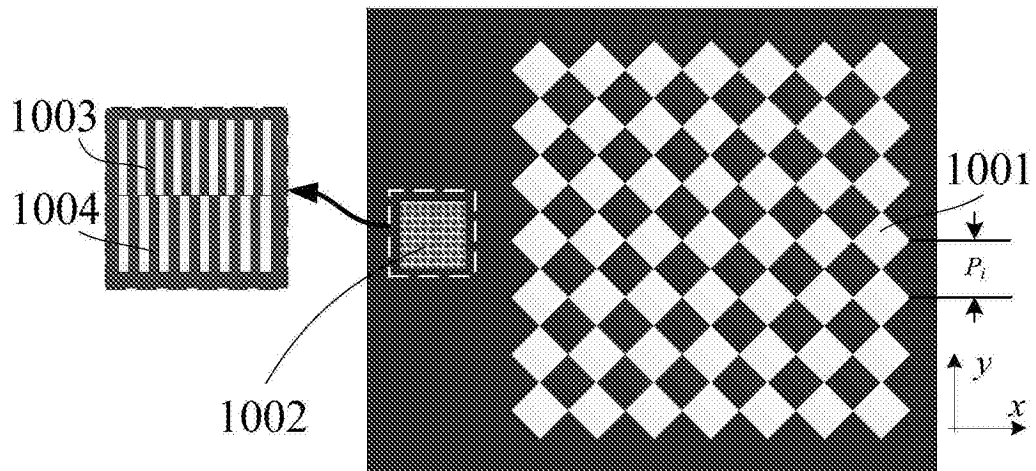


图5

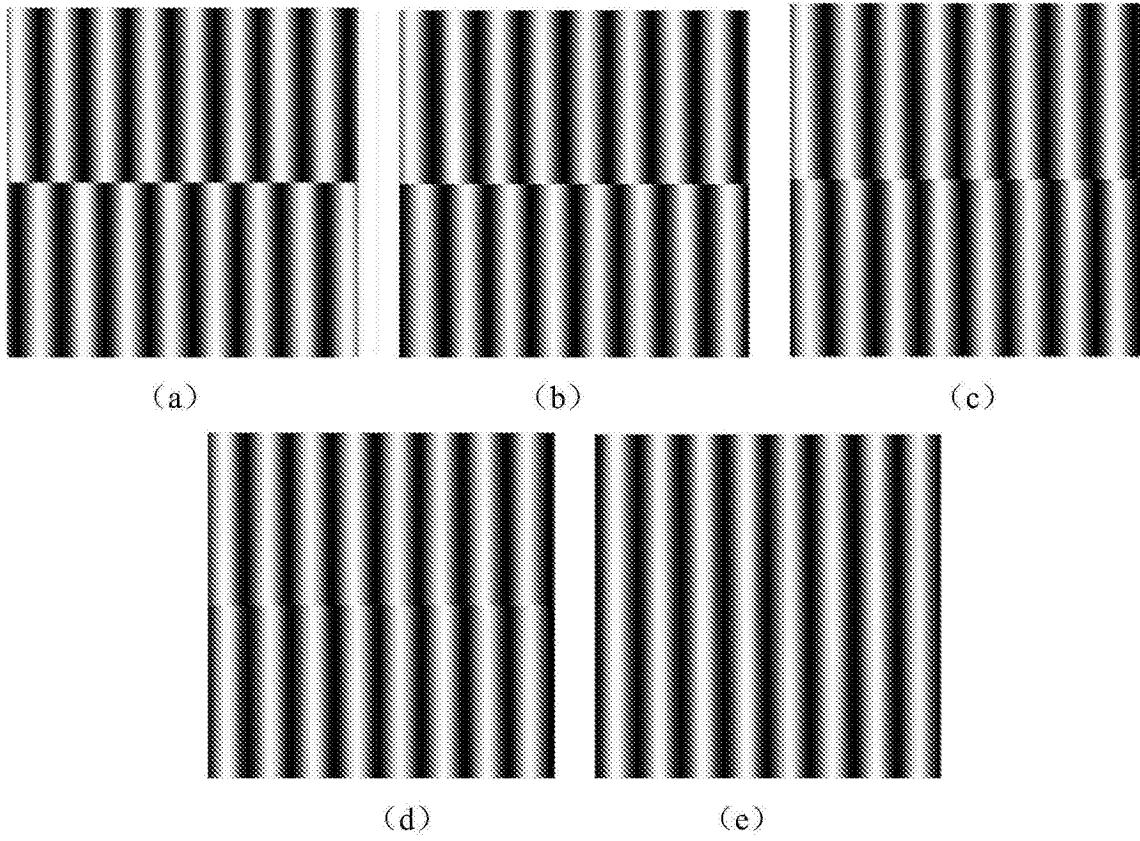


图6