

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 5 月 24 日 (24.05.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/090951 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01J 9/00 (2006.01) **G01B 9/00** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/111313
- (22) 国际申请日: 2017 年 11 月 16 日 (16.11.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201611061603.8 2016 年 11 月 21 日 (21.11.2016) CN
- (71) 申请人: 深圳大学(SHENZHEN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。
- (72) 发明人: 于斌(YU, Bin); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。李四维(LL, Siwei); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。曹博(CAO, Bo); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。屈军乐

(QU, Junle); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。

(74) 代理人: 深圳市君胜知识产权代理事务所(普通合伙)(JOHNSON INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY(SHENZHEN)); 中国广东省深圳市南山区麒麟路 1 号南山知识服务大楼 308-309 号, Guangdong 518052 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(54) Title: WAVE-FRONT SENSOR AND WAVE-FRONT DETECTION METHOD AND SYSTEM BASED ON MICROHOLOGRAPHIC ARRAY

(54) 发明名称: 基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统

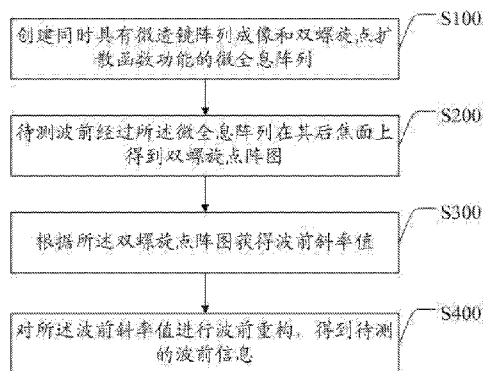


图 1

- S100 CREATING A MICROHOLOGRAPHIC ARRAY WHICH SIMULTANEOUSLY HAS THE FUNCTIONS OF MICROLENS ARRAY IMAGING AND A DOUBLE HELIX POINT SPREAD FUNCTION
- S200 A WAVE-FRONT TO BE DETECTED PASSING THROUGH THE MICROHOLOGRAPHIC ARRAY TO OBTAIN A DOUBLE HELIX LATTICE DIAGRAM ON A REAR FOCAL PLANE THEREOF
- S300 OBTAINING A WAVE-FRONT SLOPE VALUE ACCORDING TO THE DOUBLE HELIX LATTICE DIAGRAM
- S400 PERFORMING WAVE-FRONT RECONSTRUCTION ON THE WAVE-FRONT SLOPE VALUE TO OBTAIN WAVE-FRONT INFORMATION TO BE DETECTED

(57) Abstract: A wave-front sensor and a wave-front detection method and system based on a microholographic array. The wave-front detection method based on a microholographic array comprises: creating a microholographic array which simultaneously has the functions of microlens array imaging and a double helix point spread function (S100); a wave-front to be detected passing through the microholographic array to obtain a double helix lattice diagram on a rear focal plane thereof (S200); obtaining a wave-front slope value according to the double helix lattice diagram (S300); and performing wave-front reconstruction on the wave-front slope value to obtain wave-front information to be detected (S400).

(57) 摘要: 一种基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统, 其中, 基于微全息阵列的波前探测方法通过创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列(S100), 待测波前经过微全息阵列在其后焦面上得到双螺旋点阵图(S200), 根据双螺旋点阵图获得波前斜率值(S300), 对波前斜率值进行波前重构, 得到待测的波前信息(S400)。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统

技术领域

本发明涉及自适应光学技术领域，特别涉及基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统。

背景技术

在光学元件和半导体制造以及天文、航空等领域，波前检测和测量起到重要的作用，其中以夏克-哈特曼波前传感器为代表的新型探测技术，广泛应用于光学元件，金属表面探测以及光束波前畸变和相差的测量等方面；目前的测量技术主要分为两类，一类是对波面面形直接测量，另一类为波前斜率测量；它们的代表分别为干涉仪和夏克-哈特曼波前传感器。由于干涉仪需要经过严格的精确校准，配套设施严格，受到环境因素影响巨大，因而，波前斜率测量方法受到更广泛的应用，其中最常用的为夏克-哈特曼波前检测法。

夏克-哈特曼波前传感器一般由微透镜阵列和 CCD 相机组成，通过 CCD 记录微透镜后焦面上像点的光斑信息，来计算光斑质心的偏移，重构波前信息。由于 CCD 的探测面在微透镜的后焦平面上，故探测光经过样品后，需要对波前进行准直为理想平面波，使得波前经过微透镜阵列后，像点全部在后焦平面上，这样计算出的光斑质心偏移的误差最小。但是，当样品发生轴向位移的时候，入射波前经微透镜后像点将不在后焦平面上，产生一定的离焦，探测面上的光斑会随着离焦的距离增大而变大[图 2 中的 (b)]，这样，计算质心偏移的误差将会随之增大，直接影响到波前重构的精度。

因而现有技术还有待改进和提高。

发明内容

鉴于上述现有技术的不足之处，本发明的目的在于提供基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统，能抑制波前离焦误差对于重构精度的影响，在目标物体产生轴向位移的时候，依然能够得到高的探测精度，在保证探测精度的前提下大大提高了传感器轴向的探测范围。

为了达到上述目的，本发明采取了以下技术方案：

一种基于微全息阵列的波前探测方法，其包括如下步骤：

创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列；

待测波前经过所述微全息阵列在其后焦面上得到双螺旋点阵图；

根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值；

对所述波前斜率值进行波前重构，得到待测的波前信息。

所述的基于微全息阵列的波前探测方法中，所述创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列的步骤包括：

创建同时具有微透镜成像和双螺旋点扩散函数功能的相位模板；

将所述相位模板按预设排布指令重复排列，得到同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列。

所述的基于微全息阵列的波前探测方法中，创建具有双螺旋点扩散功能的相位模板的步骤包括：

通过位于拉盖尔-高斯模式平面上特定直线上的拉盖尔-高斯光束模式的线性叠加构成带有旋转和缩放的自成像光束；

将自成像光束的一个横截面中的复合场作为相位模板的光学透过率函数，使所述相位模板的光学透过率函数为双螺旋点扩散函数。

所述的基于微全息阵列的波前探测方法中，所述拉盖尔-高斯光束模式为：

$$u_{n,m}(r) = G(\hat{\rho}, \hat{z}) R_{n,m}(\hat{\rho}) \Phi_m(\phi) Z_n(\hat{z})$$

其中， $r = (\rho, \phi, z)$ 为空间点的柱坐标， $\hat{\rho} = \rho / \omega(\hat{z})$ 为高斯光斑的径向坐标， $\omega(\hat{z}) = \omega_0 [1 + \hat{z}^2]^{1/2}$ ， ω_0 为束腰半径， $\hat{z} = z / z_0$ 为纵向坐标， $z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda$ 为瑞利长度；

$u_{n,m}(r)$ 的组成为：

$$G(\hat{\rho}, \hat{z}) = \frac{\omega_0}{\omega(\hat{z})} \exp(-\hat{\rho}^2) \exp(i\hat{\rho}^2 \hat{z}) \exp[-i\psi(\hat{z})],$$

$$R_{n,m}(\hat{\rho}) = \left(\sqrt{2}\hat{\rho}\right)^{|m|} L_{(n-|m|)/2}^{|m|}(2\hat{\rho}^2),$$

$$\Phi_m(\phi) = \exp(im\phi),$$

$$Z_n(\hat{z}) = \exp[-in\psi(\hat{z})],$$

其中, $\psi(\hat{z}) = \arctan(\hat{z})$ 为古伊相位, $L_{(n-|m|)/2}^{|m|}$ 为广义的拉盖尔多项式, n, m 为整数, 且 n, m 取下列五组数值: (1, 1), (3, 5), (5, 9), (7, 13), (9, 17), 获得五种拉盖尔-高斯光束模式; 将这五种拉盖尔-高斯光束模式进行等权重叠加, 形成所述带有旋转和缩放的自成像光束。

所述的基于微全息阵列的波前探测方法中, 所述相位模板的相位函数为:

$$\varphi_h = \varphi_l + \varphi_{db}$$

其中, φ_l 为微透镜的相位, φ_{db} 为所述五种拉盖尔-高斯光束模式进行等权重叠加形成的复振幅的相位。

所述的基于微全息阵列的波前探测方法中, 所述微全息阵列为通过光刻方法制作的相位板或空间光调制器。

一种基于微全息阵列的波前传感器, 其包括沿光路传输方向依次设置的:

微全息阵列, 用于将待测波前转换为双螺旋旋转光束;

图像传感器, 用于探测所述双螺旋旋转光束, 获得双螺旋点阵图;

所述基于微全息阵列的波前传感器还包括:

波前斜率计算模块, 用于根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值;

波前重构模块, 用于对所述波前斜率值进行波前重构, 得到待测的波前信息。

所述的基于微全息阵列的波前传感器中, 所述微全息阵列包括若干个按预设排布指令重复排列的相位模板, 所述相位模板同时具有微透镜成像和双螺旋点扩散函数功能。

所述的基于微全息阵列的波前传感器中, 所述微全息阵列为通过光刻方法制作的相位板或空间光调制器。

一种基于微全息阵列的波前探测系统, 其包括如上所述的基于微全息阵列的波前传感器, 用于探测待测样品的表面信息, 所述基于微全息阵列的波前探测系

统还包括沿光路传输方向依次设置的：

激光器，用于产生激光光源；

第一准直透镜，用于对所述激光光源进行准直，输出准直光源；

第一反射镜，用于对所述准直光源进行反射；

可升降样品台，用于放置待测样品，所述待测样品经反射后的准直光源激发而发出荧光；

第二反射镜，用于对所述荧光进行反射；

投影物镜，用于对经反射后的荧光进行聚焦；

第二准直透镜，用于对经聚焦后的荧光进行准直扩束，投射至所述微全息阵列。

相较于现有技术，本发明提供的基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统中，所述基于微全息阵列的波前探测方法通过创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列；之后待测波前经过所述微全息阵列在其后焦面上得到双螺旋点阵图；根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值，对所述波前斜率值进行波前重构，得到待测的波前信息，通过将待测波前经过微全息阵列后，在其后焦面上得到双螺旋形式的点阵图，当微全息阵列后焦面的像点存在离焦时，双螺旋点会按一定规律旋转而不会像高斯点一样明显扩大，因此能抑制波前离焦误差对于重构精度的影响，当样品发生轴向位移时依然能够得到高的探测精度，在保证探测精度的前提下提高了传感器轴向的探测范围。

附图说明

图 1 为本发明提供的基于微全息阵列的波前探测方法的流程图。

图 2 为不同深度的双螺旋点扩散函数和标准点扩散函数成像的对比图。

图 3 为双螺旋点扩散函数成像的强度分布图。

图 4 为双螺旋点扩散函数的相位分布图。

图 5 为双螺旋点扩散函数在不同轴向位置处的成像图形。

图 6 为双螺旋图像两个旁瓣中心连线的旋转角度与 Z 轴位置的关系曲线图。

图 7a 为现有的波前探测方法中获得的高斯点阵图。

图 7b 为本发明提供的基于微全息阵列的波前探测方法中获得的双螺旋点阵图。

图 8 为本发明提供的基于微全息阵列的波前探测方法中微全息阵列的相位分布图。

图 9 为本发明提供的基于微全息阵列的波前探测方法第一实施例的理论模拟图。

图 10 为本发明提供的基于微全息阵列的波前探测方法第二实施例的理论模拟图。

图 11 为本发明第二实施例中在不同轴向位置处，传统探测方法与基于微全息阵列的波前探测方法所恢复的波前与待测波前的均方根误差曲线图。

图 12 为本发明提供的基于微全息阵列的波前传感器第一优选实施例的结构示意图。

图 13 为本发明提供的基于微全息阵列的波前传感器第二优选实施例的结构示意图。

图 14 为本发明提供的基于微全息阵列的波前探测系统的结构示意图。

具体实施方式

鉴于现有技术中样品发生的轴向移位将大大影响波前重构的精度等缺点，本发明的目的在于提供基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统，能抑制波前离焦误差对于重构精度的影响，在目标物体产生轴向位移的时候，依然能够得到高的探测精度，在保证探测精度的前提下大大提高了传感器轴向的探测范围。

为使本发明的目的、技术方案及效果更加清楚、明确，以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

请参阅图 1，本发明提供的基于微全息阵列的波前探测方法包括如下步骤：

S100、创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列；

S200、待测波前经过所述微全息阵列在其后焦面上得到双螺旋点阵图；

S300、根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值；

S400、对所述波前斜率值进行波前重构，得到待测的波前信息。

本发明在传统夏克-哈特曼波前探测方法的基础上，利用微全息阵列代替传统夏克-哈特曼传感器中的微透镜阵列，该微全息阵列同时具有微透镜阵列成像

和双螺旋点扩散函数的功能，待测波前经过所述微全息阵列后，在其后焦面上呈双螺旋的形式，即本发明将传统探测方法中的高斯光斑呈现为双螺旋的形式，并由图像传感器探测。当微全息阵列后焦面的像点存在离焦时，双螺旋点会按照一定的规律旋转，而并不会像传统高斯点一样明显扩大影响探测精度，因此当待测物体产生轴向位移的时候，可以获得待测波前经微全息阵列后的像点三维空间坐标精确信息，依然能够得到高的探测精度，根据像点三维空间坐标精确信息得到孔径波前斜率，在此基础上，对所述波前斜率值进行波前重构，即可重建获得被测光波前，重构出的波前面形会更加精确、误差更小，在保证探测精度的同时提高了传感器轴向的探测范围。

具体地，所述步骤 S100 包括：

S101、创建同时具有微透镜成像和双螺旋点扩散函数功能的相位模板；

S102、将所述相位模板按预设排布指令重复排列，得到同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列。

本发明实施例基于计算全息波前编码的方式，将双螺旋点扩散函数和微透镜阵列进行组合，得到同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列，具体为先创建同时具有微透镜成像和双螺旋点扩散函数功能的相位模板，之后将所述相位模板按预设排布指令重复排列，例如 3×3 、 4×4 等排列形式，从而得到上述微全息阵列，进而实现将传统阵列高斯点转换为阵列双螺旋点的形式。本实施例中，所述微全息阵列可采用通过光刻方法制作的相位板或者直接采用空间光调制器来实现。

进一步地，所述步骤 S101 中，创建具有双螺旋点扩散功能的相位模板的步骤包括：

S1011、通过位于拉盖尔-高斯模式平面上特定直线上的拉盖尔-高斯光束模式的线性叠加构成带有旋转和缩放的自成像光束；

S1012、将自成像光束的一个横截面中的复合场作为相位模板的光学透过率函数，使所述相位模板的光学透过率函数为双螺旋点扩散函数。

通过双螺旋点扩散函数（DH-PSF）实现三维纳米定位是基于一种被称为自成像的现象。DH-PSF 是一种三维光学响应，具有随离焦量不断旋转的圆形不对称横截面轮廓，如图 2 所示。双螺旋点扩散函数主要通过位于拉盖尔-高斯

(Laguerre- Gauss , 简记为 LG)模式平面上特定直线上的 LG 光束模式的线性叠加构成带有旋转和缩放的自成像光束,然后将自成像光束的一个横截面中的复合场作为双螺旋光学模块的光学透过率函数,使所述双螺旋光学模块的光学透过率函数为双螺旋点扩散函数,那么,整个双螺旋点扩散函数系统的传递函数即为双螺旋点扩散函数。该拉盖尔-高斯光束模式为:

$$u_{n,m}(r) = G(\hat{\rho}, \hat{z}) R_{n,m}(\hat{\rho}) \Phi_m(\phi) Z_n(\hat{z}) \quad (1)$$

其中, $r = (\rho, \phi, z)$ 为空间点的柱坐标,

$\hat{\rho} = \rho / \omega(\hat{z})$ 为高斯光斑的径向坐标, $\omega(\hat{z}) = \omega_0 [1 + \hat{z}^2]^{1/2}$, ω_0 为束腰半径,

$\hat{z} = z / z_0$ 为纵向坐标, $z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda$ 为瑞利长度,

$u_{n,m}(r)$ 的组成为:

$$G(\hat{\rho}, \hat{z}) = \frac{\omega_0}{\omega(\hat{z})} \exp(-\hat{\rho}^2) \exp(i\hat{\rho}^2 \hat{z}) \exp[-i\psi(\hat{z})] \quad (2)$$

$$R_{n,m}(\hat{\rho}) = (\sqrt{2}\hat{\rho})^{|m|} L_{(n-|m|)/2}^{|m|}(2\hat{\rho}^2) \quad (3)$$

$$\Phi_m(\phi) = \exp(im\phi) \quad (4)$$

$$Z_n(\hat{z}) = \exp[-in\psi(\hat{z})] \quad (5)$$

其中, $\psi(\hat{z}) = \arctan(\hat{z})$ 为古伊相位, $L_{(n-|m|)/2}^{|m|}$ 为广义的拉盖尔多项式, n, m 为整数, 且 $n = |m|, |m| + 2, |m| + 4, |m| + 6, \dots$,

当 n, m 取下列五组数值: $(1, 1)$, $(3, 5)$, $(5, 9)$, $(7, 13)$, $(9, 17)$, 可获得五种拉盖尔-高斯光束模式。将这五种拉盖尔-高斯光束模式进行等权重叠加,可形成带有旋转和缩放的自成像光束,即形成一个新的光场分布函数—双螺旋旋转光束,如图 3 和图 4。基于 LG 函数的傅立叶变换不变特性,该函数如作为光学传递函数应用到光学系统中,光学系统的点扩散函数将变为双螺旋点扩散函数,且双螺旋旁瓣随离焦量变化而旋转的速度与 LG 模式平面上所选取的直线斜率成正比,在聚焦区速度最大,如图 5。

一个 DH-PSF 系统就是在标准成像系统的傅里叶平面加入一个特殊设计的双螺旋相位片,使其透射率函数在傅里叶变化的聚焦区形成双螺旋的形式,步骤 S101 中创建的相位模板即具有该特性,一个点物通过该双螺旋相位片所成的像是两个围绕着光轴旋转的旁瓣,其中一个绕着光轴顺时针旋转,另一个则逆时针旋转。用 DH-PSF 进行三维纳米定位时,聚焦光斑的横向定位点通过两个旁瓣的中点来估计,而其轴向位置则根据两个旁瓣中心连线的旋转角度确定,且定位精度极高,具体可参考图 6 所示的 DH-PSF 两个旁瓣中心连线的旋转角度与 Z 轴位置的关系曲线。

本发明通过创建具有上述双螺旋点扩散函数功能的相位模板,将该相位模板进行重复排列后得到微全息阵列,使得待测波前经过所述微全息阵列后,在其后焦面上呈双螺旋的形式,将传统探测方法中的高斯光斑(图 7a)呈现为双螺旋(图 7b)的形式,并由图像传感器探测,利用探测到的双螺旋点可以获得像点的精确三维坐标信息,进而得到准确的孔径波前斜率值,保证探测精度的同时提高了传感器轴向的探测范围。

同时,该相位模板不仅具有上述双螺旋点扩散函数功能,还具有微透镜成像功能,基于上述双螺旋点扩散函数及微透镜成像的功能,所述相位模板的相位函数为:

$$\varphi_h = \varphi_l + \varphi_{db}$$

其中, φ_l 为微透镜的相位, φ_{db} 为所述五种拉盖尔-高斯光束模式进行等权重叠加形成的复振幅的相位,即 φ_{db} 具体可选择上述 n, m 取 (1, 1), (3, 5), (5, 9), (7, 13), (9, 17) 时对应的拉盖尔-高斯光束模式等权重叠加形成双螺旋旋转光束的相位形式作为初始值,然后通过优化,获得高效率的双螺旋光束纯相位分布,将该特殊设计的相位模板根据系统需求重复排列,构成微全息阵列,如图 8 所示,其为 3×3 微全息阵列的相位分布图。

具体实施时,入射波前经过微全息阵列后,在其后焦平面上形成双螺旋旋转光束,并由图像传感器探测,利用探测到的双螺旋点扩散函数阵列点,经高斯拟合算法获得斑点的三维坐标信息(x_i, y_i, z_i), 然后根据公式(6) 计算出子孔径在 x, y 方向的波前斜率:

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{(x_i - x_0)}{f} \\ G_y &= \frac{(y_i - y_0)}{f} \end{aligned} \quad (6)$$

G_x , G_y 分别为第 i 个孔径在 x , y 方向的波前斜率, (x_i, y_i) 为第 i 个孔径对应的像点坐标, (x_0, y_0) 为平面波入射时每个孔径像点二维坐标, 用作计算焦点偏移的基准。在获得上述子孔径波前斜率的基础上, 利用传统夏克-哈特曼波前传感器的波前重建算法, 如区域法波前重建法和模式法波前重建法, 就可重建获得被测光波前, 由于此为现有技术, 故不作详细论述。

利用同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列代替传统传感器中的微透镜阵列, 使得像点在微全息阵列的后焦平面上呈现为双螺旋的形式, 并由图像传感器探测, 当微透镜阵列后焦面的像点存在离焦时, 双螺旋点会按一定规律旋转, 并且横向定位精度不会随着离焦的增大而降低, 因此, 在样品产生轴向位移时, 计算得到的横向和轴向坐标更加精确, 所得到的波前斜率误差更小, 重构出波前面形会更加精确, 误差更小, 提高了探测的轴向范围。

以下结合具体实施例对本发明提供的微全息阵列的波前探测方法的理论模拟结果进行说明:

实施例一

采用的微透镜的个数为 5×5 , 微透镜直径为 $600 \mu\text{m}$, 焦距为 5mm , 模拟产生一个球面波, 并用本发明的微全息阵列的波前探测方法进行波前恢复, 如图 9 所示, 图 9 中的(a)为待分析的球面波前; 图 9 中的 (b) 为待分析的球面波前相位分布; 图 9 中的 (c) 为恢复的球面波前; 图 9 中的 (d) 为恢复球面波的相位; 图 9 中的 (e) 为待测球面波与恢复球面波的波前之差; 图 9 中的 (f) 为待测球面波与恢复球面波的相位之差, 从图中可看出, 经本发明提供的波前探测方法恢复的球面波前与待分析的球面波前非常接近, 两者的波前之差和相位之差较小, 说明本发明可精确恢复球面波前。

实施例二

采用的微透镜的个数为 5×5 ，微透镜直径为 $600\mu\text{m}$ ，焦距为 5mm ，模拟产生一个任意波前（非理想平面波），并用本发明的微全息阵列的波前探测方法进行波前恢复，如图 10 所示，图 10 中的(a)为待分析的波前；图 10 中的 (b) 为待分析的波前相位分布；图 10 中的 (c) 为恢复的波前；图 10 中的 (d) 为恢复的相位；图 10 中的 (e) 为待测波前与恢复波前的波前之差；图 10 中的 (f) 为待测波前与恢复波前的相位之差，同时，在相同的模拟条件下，通过传统的夏克-哈特曼波前探测法对该待测波前进行恢复，采用两种方法所恢复的波前与待测波前的均方根误差（RMSE）如图 11 所示，从图中可明显看出，基于微全息阵列的波前探测方法在在点光源轴向位移过程中，受到像点离焦的影响要小于传统的夏特-哈克曼探测法，从而得到比传统的波前传感器更高的探测精度，表明本发明提供的波前探测方法可以在一定精度的条件下，有效的提高波前传感器的轴向探测范围。

本发明相应提供一种基于微全息阵列 11 的波前传感器，如图 12 所示，其包括沿光路传输方向依次设置的微全息阵列 11 和图像传感器 12，其中，所述微全息阵列 11 用于将待测波前转换为双螺旋旋转光束；所述图像传感器 12 用于探测所述双螺旋旋转光束，获得双螺旋点阵图；进一步地，所述基于微全息阵列 11 的波前传感器还包括用于根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值的波前斜率计算模块，以及用于对所述波前斜率值进行波前重构，得到待测的波前信息的波前重构模块。具体请参阅上述方法对应的实施例。

具体地，所述微全息阵列 11 包括若干个按预设排布指令重复排列的相位模板，所述相位模板同时具有微透镜成像和双螺旋点扩散函数功能。具体请参阅上述方法对应的实施例。

本发明提供的基于微全息阵列 11 的波前传感器第一优选实施例中，所述微全息阵列 11 采用通过光刻方法制作的相位版实现（如图 12 所示），第二优选实施例中，所述微全息阵列 11 则直接采用空间光调制器来实现（如图 13 所示），当采用空间光调制器实现所述微全息阵列 11 时，入射波前经分束器 13 投射至空间光调制器，之后经空间光调制器与分束器 13 反射至 4F 系统（包括第一透镜 14 和第二透镜 15），经过 4F 系统聚焦后由图像传感器 12 探测。具体请参阅上述方法对应的实施例。

本发明还相应提供一种基于微全息阵列的波前探测系统，如图 14 所示，其包括如上所述的基于微全息阵列的波前传感器，用于探测待测样品的表面信息，所述基于微全息阵列的波前探测系统还包括沿光路传输方向依次设置的激光器 20、第一准直透镜 21、第一反射镜 22、可升降样品台 23、第二反射镜 24、投影物镜 25 和第二准直透镜 26，激光器 20 产生激光光源经过第一准直透镜 21 准直后输出的准直光源经过第一反射镜 22 反射至待测样品上，待测样品被准直光源激发后可发出荧光，之后经第二反射镜 24 反射至投影物镜 25，投影物镜 25 对荧光进行聚焦，之后通过第二准直透镜 26 对经聚焦后的荧光进行准直扩束，并投射至微全息阵列 11，通过上述基于微全息阵列的波前传感器探测待测样品的表面信息，使得在一定的轴向范围内，能精准探测到待测样品的表面信息。由于上文已对所述基于微全息阵列的波前传感器进行了详细描述，此处不作详述。

综上所述，本发明提供的基于微全息阵列的波前传感器、波前探测方法及系统中，所述基于微全息阵列的波前探测方法通过创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列；之后待测波前经过所述微全息阵列在其后焦面上得到双螺旋点阵图；根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值，对所述波前斜率值进行波前重构，得到待测的波前信息，通过将待测波前经过微全息阵列后，在其后焦面上得到双螺旋形式的点阵图，当微全息阵列后焦面的像点存在离焦时，双螺旋点会按一定规律旋转而不会像高斯点一样明显扩大，因此能抑制波前离焦误差对于重构精度的影响，当样品发生轴向位移时依然能够得到高的探测精度，在保证探测精度的前提下提高了传感器轴向的探测范围。

可以理解的是，对本领域普通技术人员来说，可以根据本发明的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变，而所有这些改变或替换都应属于本发明所附的权利要求的保护范围。

权 利 要 求 书

1、一种基于微全息阵列的波前探测方法，其特征在于，包括如下步骤：

创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列；

待测波前经过所述微全息阵列在其后焦面上得到双螺旋点阵图；

根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值；

对所述波前斜率值进行波前重构，得到待测的波前信息。

2、根据权利要求 1 所述的基于微全息阵列的波前探测方法，其特征在于，所述创建同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列的步骤包括：

创建同时具有微透镜成像和双螺旋点扩散函数功能的相位模板；

将所述相位模板按预设排布指令重复排列，得到同时具有微透镜阵列成像和双螺旋点扩散函数功能的微全息阵列。

3、根据权利要求 2 所述的基于微全息阵列的波前探测方法，其特征在于，创建具有双螺旋点扩散功能的相位模板的步骤包括：

通过位于拉盖尔-高斯模式平面上特定直线上的拉盖尔-高斯光束模式的线性叠加构成带有旋转和缩放的自成像光束；

将自成像光束的一个横截面中的复合场作为相位模板的光学透过率函数，使所述相位模板的光学透过率函数为双螺旋点扩散函数。

4、根据权利要求 3 所述的基于微全息阵列的波前探测方法，其特征在于，所述拉盖尔-高斯光束模式为：

$$u_{n,m}(r) = G(\hat{\rho}, \hat{z}) R_{n,m}(\hat{\rho}) \Phi_m(\phi) Z_n(\hat{z})$$

其中， $r = (\rho, \phi, z)$ 为空间点的柱坐标， $\hat{\rho} = \rho / \omega(\hat{z})$ 为高斯光斑的径向坐标， $\omega(\hat{z}) = \omega_0 [1 + \hat{z}^2]^{1/2}$ ， ω_0 为束腰半径， $\hat{z} = z / z_0$ 为纵向坐标， $z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda$ 为瑞利长度；

$u_{n,m}(r)$ 的组成为：

$$G(\hat{\rho}, \hat{z}) = \frac{\omega_0}{\omega(\hat{z})} \exp(-\hat{\rho}^2) \exp(i\hat{\rho}^2 \hat{z}) \exp[-i\psi(\hat{z})],$$

$$R_{n,m}(\hat{\rho}) = \left(\sqrt{2}\hat{\rho}\right)^{|m|} L_{(n-|m|)/2}^{|m|}(2\hat{\rho}^2),$$

$$\Phi_m(\phi) = \exp(im\phi),$$

$$Z_n(\hat{z}) = \exp[-in\psi(\hat{z})],$$

其中, $\psi(\hat{z}) = \arctan(\hat{z})$ 为古伊相位, $L_{(n-|m|)/2}^{|m|}$ 为广义的拉盖尔多项式, n , m 为整数, 且 n, m 取下列五组数值: (1, 1), (3, 5), (5, 9), (7, 13), (9, 17), 获得五种拉盖尔-高斯光束模式; 将这五种拉盖尔-高斯光束模式进行等权重叠加, 形成所述带有旋转和缩放的自成像光束。

5、根据权利要求 4 所述的基于微全息阵列的波前探测方法, 其特征在于, 所述相位模板的相位函数为:

$$\varphi_h = \varphi_l + \varphi_{db}$$

其中, φ_l 为微透镜的相位, φ_{db} 为所述五种拉盖尔-高斯光束模式进行等权重叠加形成的复振幅的相位。

6、根据权利要求 1 所述的基于微全息阵列的波前探测方法, 其特征在于, 所述微全息阵列为通过光刻方法制作的相位板或空间光调制器。

7、一种基于微全息阵列的波前传感器, 其特征在于, 包括沿光路传输方向依次设置的:

微全息阵列, 用于将待测波前转换为双螺旋旋转光束;

图像传感器, 用于探测所述双螺旋旋转光束, 获得双螺旋点阵图;

所述基于微全息阵列的波前传感器还包括:

波前斜率计算模块, 用于根据所述双螺旋点阵图获得波前斜率值;

波前重构模块, 用于对所述波前斜率值进行波前重构, 得到待测的波前信息。

8、根据权利要求 7 所述的基于微全息阵列的波前传感器, 其特征在于, 所述微全息阵列包括若干个按预设排布指令重复排列的相位模板, 所述相位模板同时具有微透镜成像和双螺旋点扩散函数功能。

9、根据权利要求 7 所述的基于微全息阵列的波前传感器，其特征在于，所述微全息阵列为通过光刻方法制作的相位板或空间光调制器。

10、一种基于微全息阵列的波前探测系统，其特征在于，包括如权利要求 7-9 任意一项所述的基于微全息阵列的波前传感器，用于探测待测样品的表面信息，所述基于微全息阵列的波前探测系统还包括沿光路传输方向依次设置的：

激光器，用于产生激光光源；

第一准直透镜，用于对所述激光光源进行准直，输出准直光源；

第一反射镜，用于对所述准直光源进行反射；

可升降样品台，用于放置待测样品，所述待测样品经反射后的准直光源激发而发出荧光；

第二反射镜，用于对所述荧光进行反射；

投影物镜，用于对经反射后的荧光进行聚焦；

第二准直透镜，用于对经聚焦后的荧光进行准直扩束，投射至所述微全息阵列。

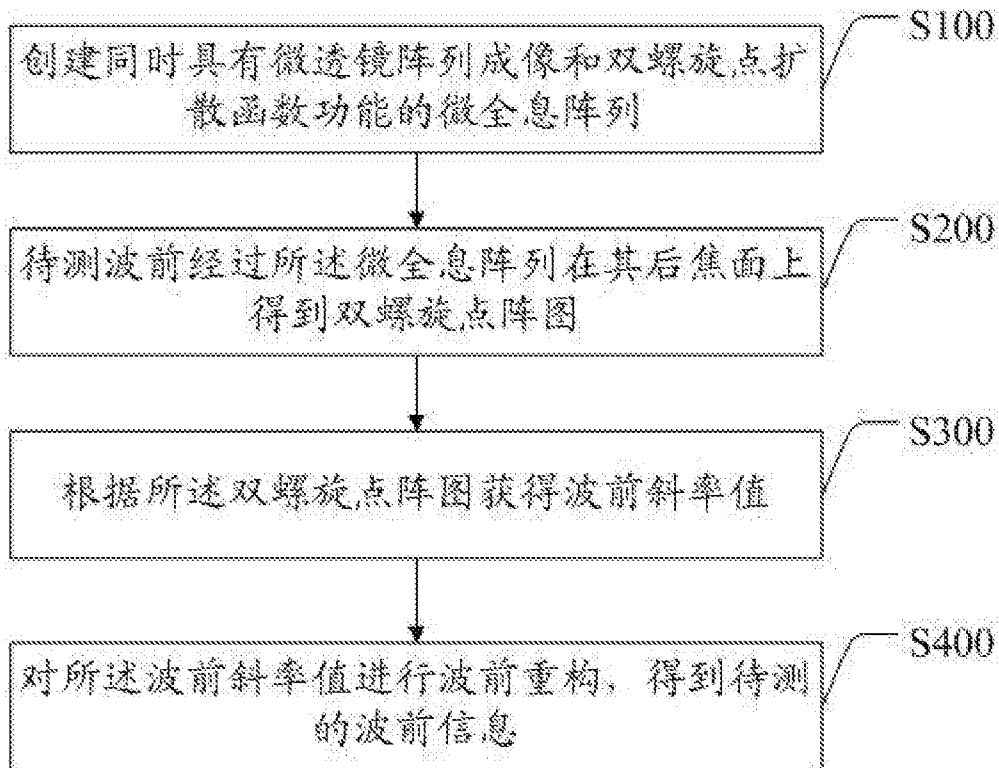


图 1

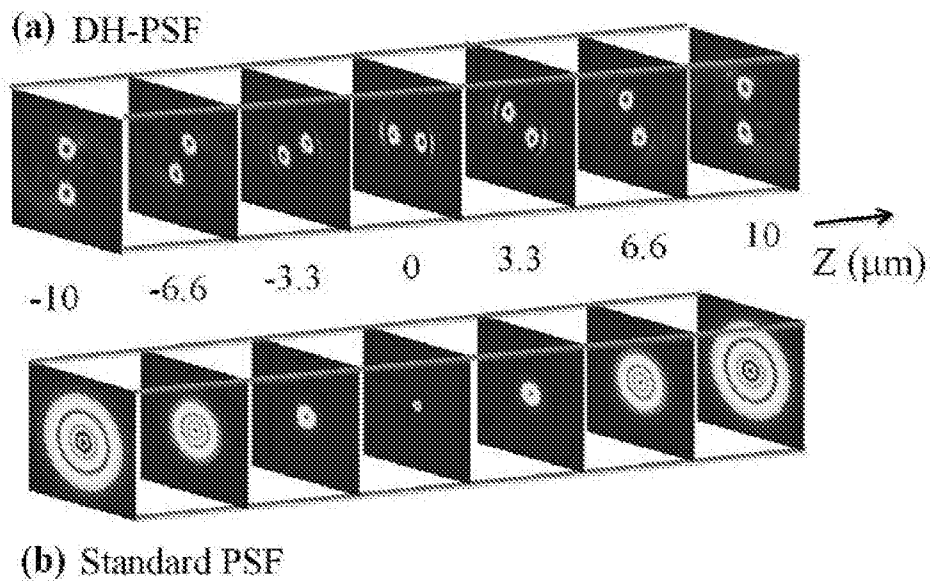


图 2

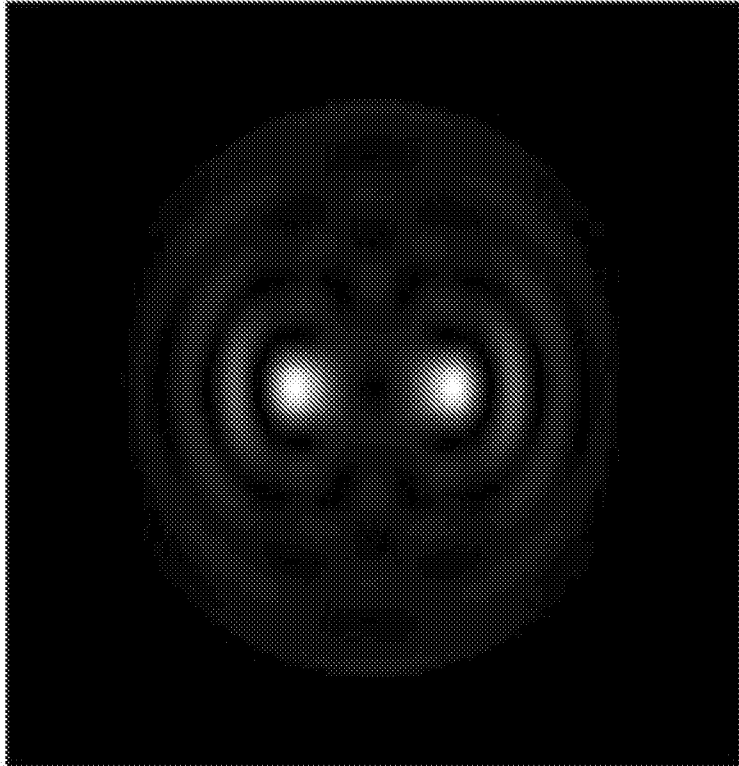


图 3

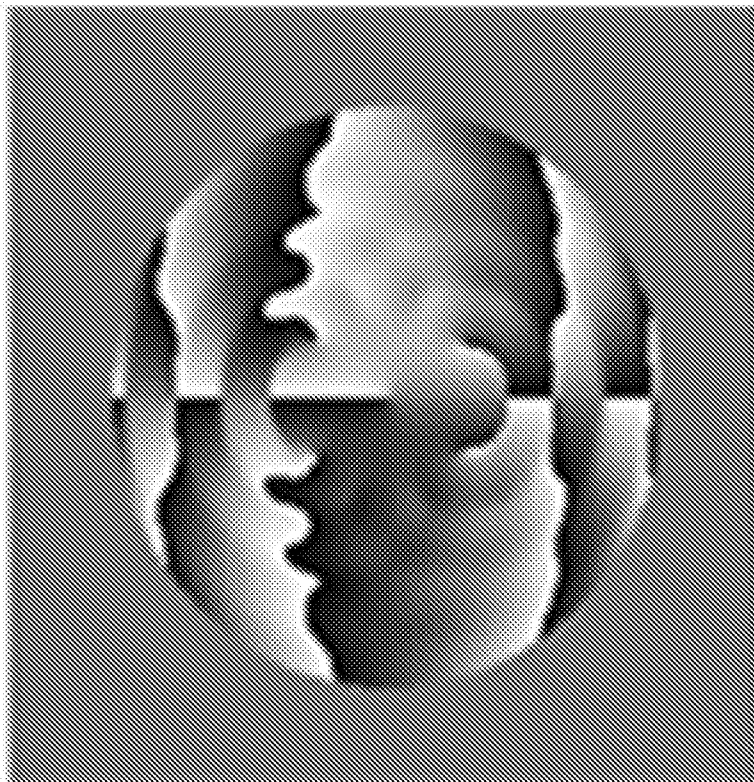


图 4

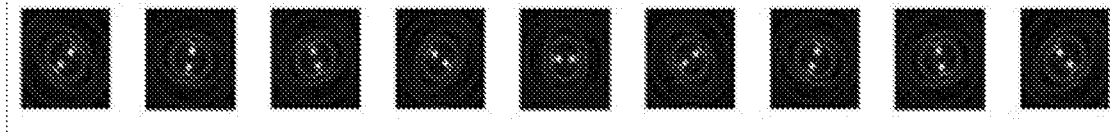


图 5

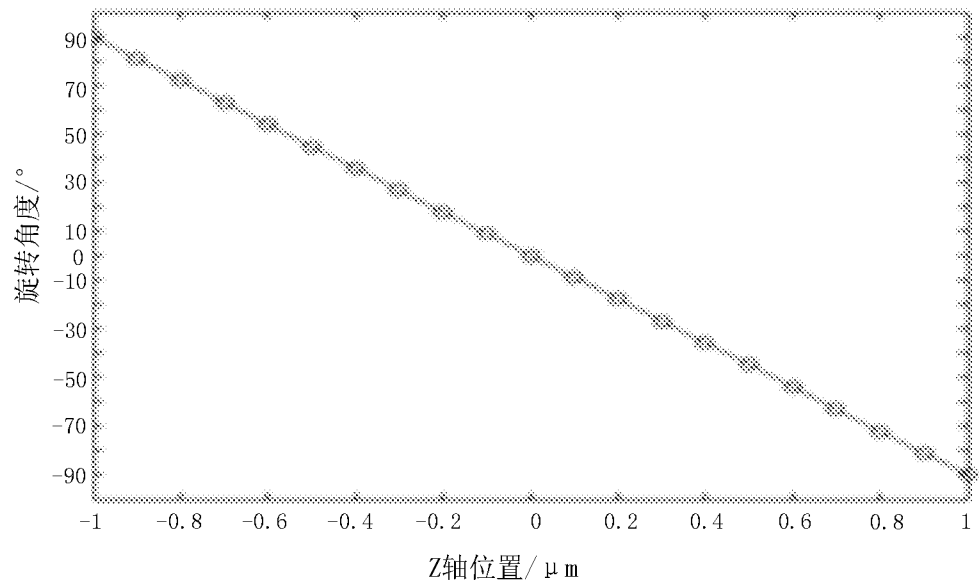


图 6

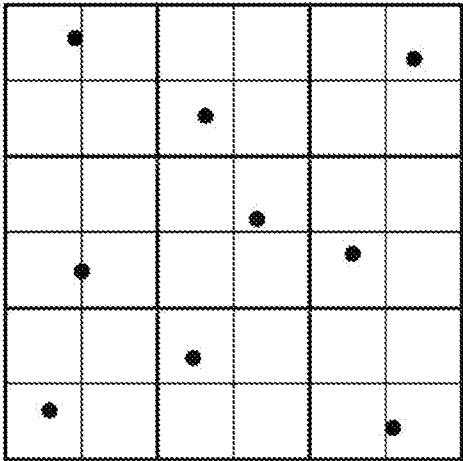


图 7a

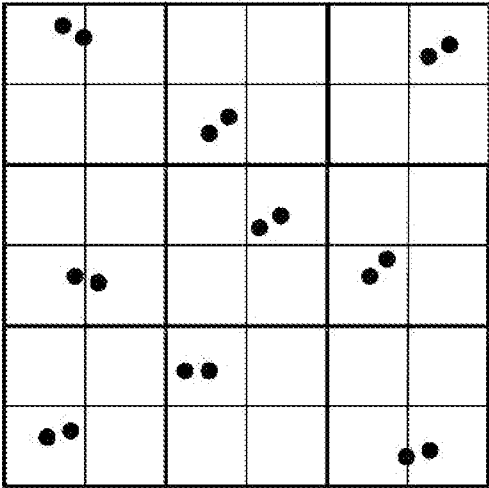


图 7b

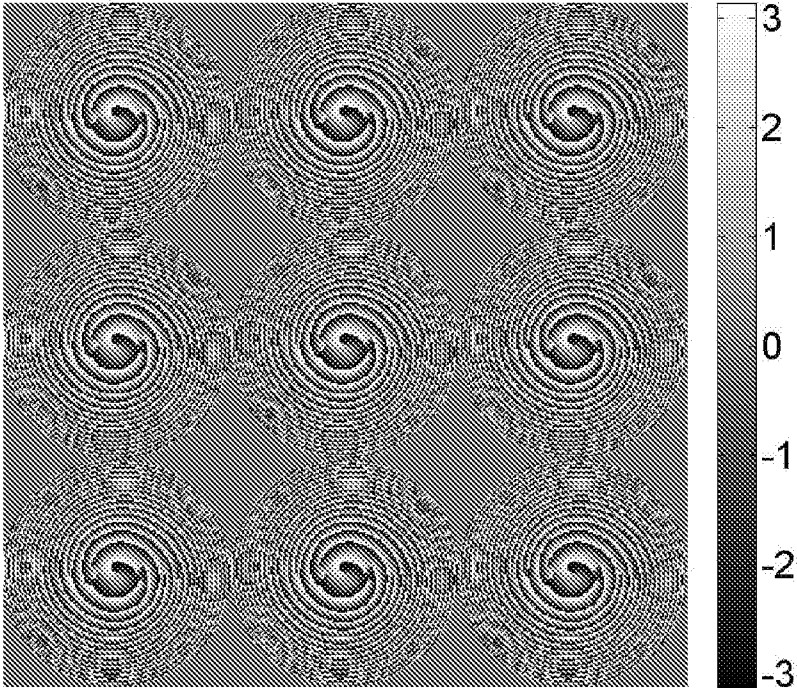


图 8

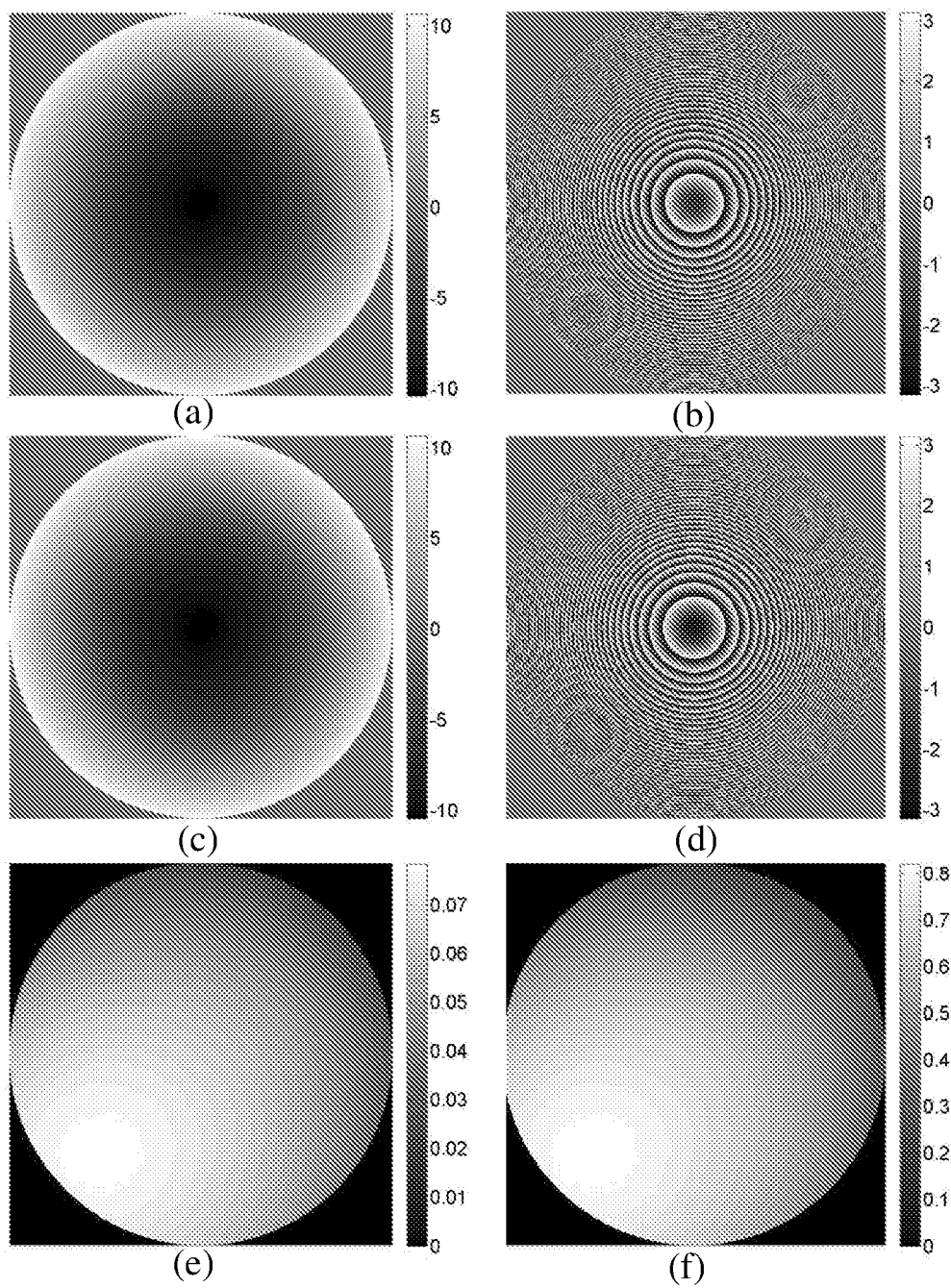


图 9

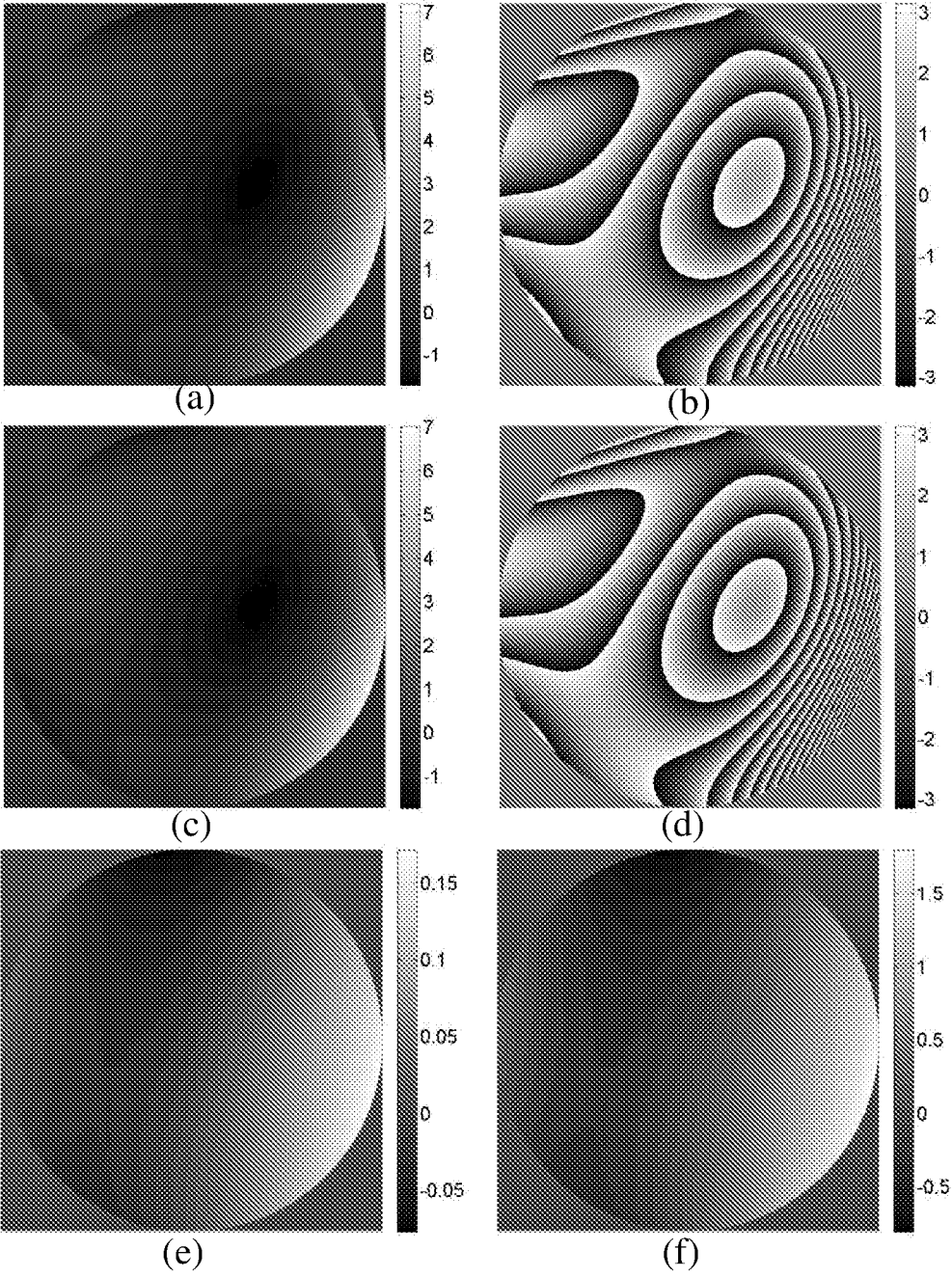


图 10

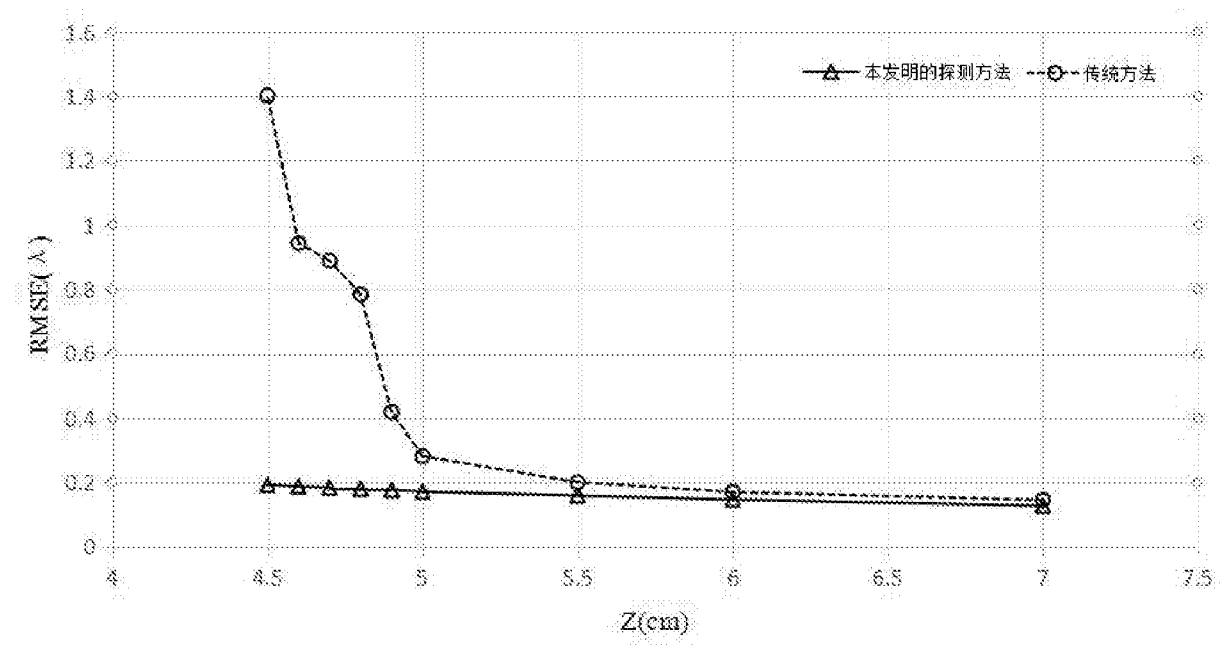


图 11

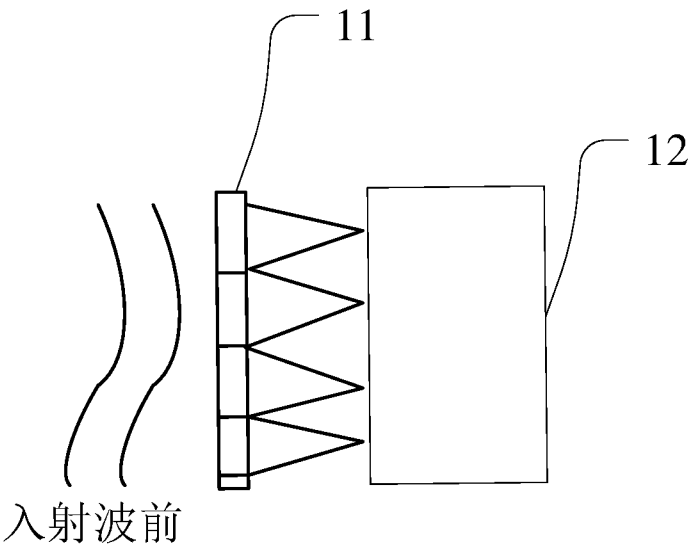


图 12

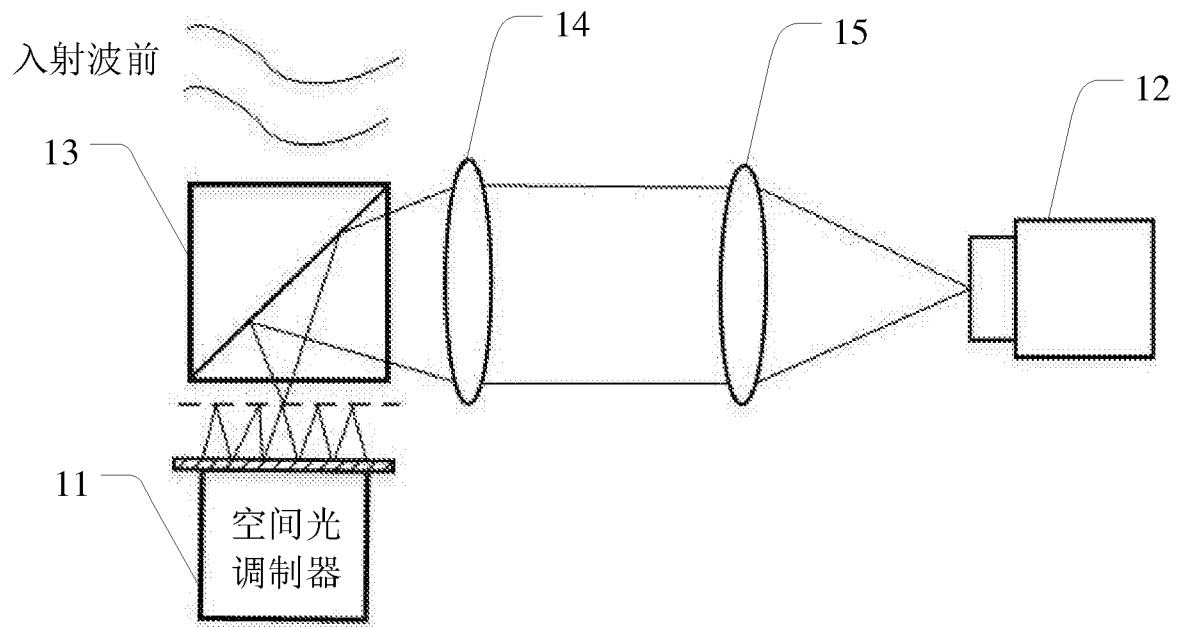


图 13

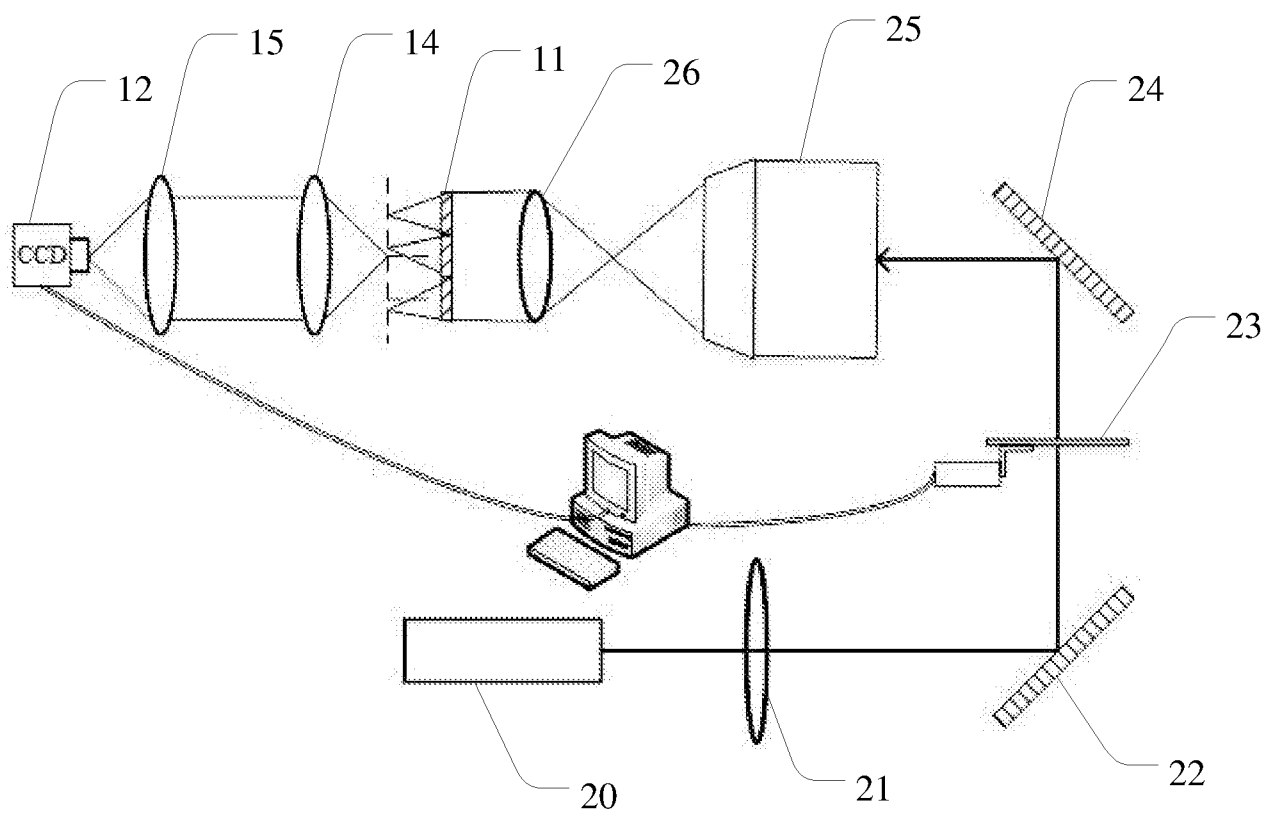


图 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/111313

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01J 9/00 (2006.01) i; G01B 9/00 (2006.01) n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01J, G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, CNKI: 全息, 波前, 探测, 阵列, 透镜, 斜率, 双螺旋, 相位, 点阵, 激光, 透镜, 反射镜 VEN, GOOGLE

Scholar: wavefront, sensor, hologra+, helix, spiral, reconstruct+, array, laser, lens, reflect, dot, matrix, lattice

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102735348 A (INSTITUTE OF OPTICS AND ELECTRONICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 17 October 2012 (17.10.2012), entire document	1-10
A	CN 102589720 A (INSTITUTE OF OPTICS AND ELECTRONICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 18 July 2012 (18.07.2012), entire document	1-10
A	CN 102280115 A (HITACHI CONSUMER ELECTRONICS CO., LTD.) 14 December 2011 (14.12.2011), entire document	1-10
A	CN 102252832 A (BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 23 November 2011 (23.11.2011), entire document	1-10
A	CN 102507019 A (CHANGCHUN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 20 June 2012 (20.06.2012), entire document	1-10
A	US 7645972 B2 (LOCKHEED CORP.) 12 January 2010 (12.01.2010), entire document	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 07 February 2018	Date of mailing of the international search report 26 February 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer ZHANG, Yu Telephone No. (86-10) 62085126

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/111313

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4804269 A (LITTON SYSTEMS INC.) 14 February 1989 (14.02.1989), entire document	1-10
A	CN 102980875 A (SHENZHEN UNIVERSITY) 20 March 2013 (20.03.2013), entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/111313

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102735348 A	17 October 2012	CN 102735348 B	24 July 2013
CN 102589720 A	18 July 2012	CN 102589720 B	01 January 2014
		NL 2010457 C	03 March 2014
		NL 2010457 A	23 September 2013
CN 102280115 A	14 December 2011	US 9170562 B2	27 October 2015
		US 2011273754 A1	10 November 2011
		JP 2011238311 A	24 November 2011
		CN 102280115 B	29 July 2015
CN 102252832 A	23 November 2011	CN 102252832 B	03 October 2012
CN 102507019 A	20 June 2012	None	
US 7645972 B2	12 January 2010	US 2008144018 A1	19 June 2008
US 4804269 A	14 February 1989	None	
CN 102980875 A	20 March 2013	WO 2014075448 A1	22 May 2014
		US 20140346328 A1	27 November 2014

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/111313

A. 主题的分类

G01J 9/00(2006.01)i; G01B 9/00(2006.01)n

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01J, G01B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS, CNTXT, CNKI:全息, 波前, 探测, 阵列, 透镜, 斜率, 双螺旋, 相位, 点阵, 激光, 透镜, 反射镜 VEN, GOOGLE Scholar:wavefront, sensor, hologra+, helix, spiral, reconstruct+, array, laser, lens, reflect, dot, matrix, lattice

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 102735348 A (中国科学院光电技术研究所) 2012年 10月 17日 (2012 - 10 - 17) 全文	1-10
A	CN 102589720 A (中国科学院光电技术研究所) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 全文	1-10
A	CN 102280115 A (日立民用电子株式会社) 2011年 12月 14日 (2011 - 12 - 14) 全文	1-10
A	CN 102252832 A (北京理工大学) 2011年 11月 23日 (2011 - 11 - 23) 全文	1-10
A	CN 102507019 A (长春理工大学) 2012年 6月 20日 (2012 - 06 - 20) 全文	1-10
A	US 7645972 B2 (LOCKHEED CORP) 2010年 1月 12日 (2010 - 01 - 12) 全文	1-10
A	US 4804269 A (LITTON SYSTEMS INC) 1989年 2月 14日 (1989 - 02 - 14) 全文	1-10

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 2月 7日

国际检索报告邮寄日期

2018年 2月 26日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

张宇

电话号码 (86-10)01062085126

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 102980875 A (深圳大学) 2013年 3月 20日 (2013 - 03 - 20) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/111313

检索报告引用的专利文件				公布日 (年/月/日)			同族专利	公布日 (年/月/日)		
CN	102735348	A	2012年 10月 17日	CN	102735348	B		2013年 7月 24日		
CN	102589720	A	2012年 7月 18日	CN	102589720	B		2014年 1月 1日		
				NL	2010457	C		2014年 3月 3日		
				NL	2010457	A		2013年 9月 23日		
CN	102280115	A	2011年 12月 14日	US	9170562	B2		2015年 10月 27日		
				US	2011273754	A1		2011年 11月 10日		
				JP	2011238311	A		2011年 11月 24日		
				CN	102280115	B		2015年 7月 29日		
CN	102252832	A	2011年 11月 23日	CN	102252832	B		2012年 10月 3日		
CN	102507019	A	2012年 6月 20日		无					
US	7645972	B2	2010年 1月 12日	US	2008144018	A1		2008年 6月 19日		
US	4804269	A	1989年 2月 14日		无					
CN	102980875	A	2013年 3月 20日	WO	2014/075448	A1		2014年 5月 22日		
				US	2014/0346328	A1		2014年 11月 27日		

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)