



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113218312 B

(45) 授权公告日 2022.09.30

(21) 申请号 202110540897.7

CN 112648926 A, 2021.04.13

(22) 申请日 2021.05.18

WO 2006080923 A1, 2006.08.03

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 102889853 A, 2013.01.23

申请公布号 CN 113218312 A

US 2006109483 A1, 2006.05.25

(43) 申请公布日 2021.08.06

US 2018259390 A1, 2018.09.13

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

US 9880377 B1, 2018.01.30

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

DE 102008020902 A1, 2009.10.29

赵晨光. 同步移相干涉共焦显微成像技术研究.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(博士)工程科技II辑》.2011,(第07(2011)期), C030-3.

(72) 发明人 黄向东 谭久彬

万小平. 聚焦干涉传感关键技术研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技II辑)》.2020,(第02(2020)期), C030-39.

(74) 专利代理机构 哈尔滨龙科专利代理有限公司 23206

专利代理师 李长春

黄向东 等. 阵列式共焦显微系统超分辨特性的研究.《光电子·激光》.2006,(第1期),第28-31页.

(51) Int. Cl.

G01B 11/02 (2006.01)

G01B 11/24 (2006.01)

G01B 9/02015 (2022.01)

林芬芬. 基于聚焦光针干涉和共焦成像的多功能表面形貌测量系统.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(硕士)工程科技I辑》.2017,(第06(2017)期), B022-425.

(56) 对比文件

US 5574560 A, 1996.11.12

CN 208595878 U, 2019.03.12

CN 105865339 A, 2016.08.17

CN 103322912 A, 2013.09.25

审查员 龚艳霞

权利要求书2页 说明书5页 附图2页

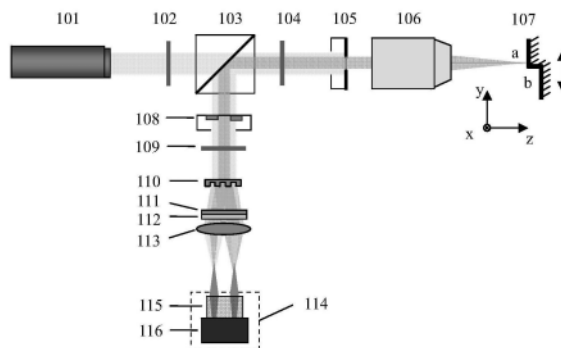
(54) 发明名称

光针式共光路干涉共焦位移测量装置与方法

和粗糙表面三维形貌测量,应用前景广泛。

(57) 摘要

光针式共光路干涉共焦位移测量装置与方法,属于超精密三维测量技术领域。本发明将激光干涉技术与共焦显微测量技术相结合,提出了利用环形反射镜分光构建单臂干涉测量结构;同时根据干涉、共焦测量原理,提出了采用变区域光强采集方法,可消除由于共焦测量系统与干涉测量系统共光路而引入的信号耦合的影响;此外,通过差、比数据解算方法获得准确的位移值,可同时消除系统中的共模加性和乘性噪声。本发明可有效提高系统的测量准确性和测量稳定性,适用于具有大台阶、高深宽比的微结构几何参数



1. 一种光针式共光路干涉共焦位移测量装置,其特征在于:线偏振光源(101)、1/2波片(102)组成的光源模块发出平行光,偏振方向与分光棱镜PBS(103)透光轴x向一致,光束经PBS(103)透射后经第一1/4波片(104)照射到环形参考反射镜(105)上,参考光按原光路返回;测量光经物镜(106)形成聚焦光针照射到样品表面(107),然后再经样品表面反射按原光路返回;由于测量光和参考光均两次经过第一1/4波片(104),所述第一1/4波片(104)光轴与x方向夹角 45° ,返回光束偏振方向变为y向,则返回光经PBS(103)反射;参考光经过环形1/2波片(108),偏振方向旋转 90° ,而测量光由所述环形1/2波片(108)中心穿过,此时测量光与参考光偏振方向相互垂直;再经过第二1/4波片(109)分别变为左旋、右旋圆偏振光,经二维Ronchi光栅(110)与偏振移相阵列(111),参考光与测量光发生移相;进一步,光分别经过2对相互共轭的移焦光瞳阵列(112),选出四路 $[\pm 1, \pm 1]$ 衍射光,其中2束光经移焦光瞳滤波器后,经透镜(113)汇聚,其焦面位置会发生正移焦,而另外2束光经共轭移焦光瞳滤波器后,其焦面会发生负移焦;同时,测量光与参考光在透镜(113)焦面附近发生干涉,由变区域光强探测器(114)分别对四路干涉光进行探测,并经数据处理后获得位移测量值。

2. 根据权利要求1所述的光针式共光路干涉共焦位移测量装置,其特征在于:环形参考反射镜(105),其中心孔面积与外环面积相同,且放置于物镜前方。

3. 根据权利要求1所述的光针式共光路干涉共焦位移测量装置,其特征在于:环形1/2波片(108),其外轮廓半径和内孔半径均与环形参考反射镜(105)相同,波片快/慢轴与参考光偏振方向夹角 45° 。

4. 根据权利要求1所述的光针式共光路干涉共焦位移测量装置,其特征在于:移焦光瞳阵列(112),其结构中包括4个关于中心对称的子光瞳区,每个子光瞳滤波器为圆对称相位光瞳,二环或多环结构,子光瞳外轮廓半径与环形参考镜外轮廓半径相同,子光瞳之外的区域不透光,其作用是选出四路 $[\pm 1, \pm 1]$ 衍射光;其中,相邻子光瞳为相位共轭光瞳可分别实现正向移焦和负向移焦。

5. 根据权利要求1所述的光针式共光路干涉共焦位移测量装置,其特征在于:变区域光强探测器(114),可由成像管镜(115)和CCD(116)构成。

6. 根据权利要求1所述的光针式共光路干涉共焦位移测量装置,其特征在于:变区域光强探测器(114),可由半反半透镜片(601),4个针孔构成的针孔阵列(602),第一四象限光电探测器PSD(603)和第二四象限光电探测器PSD(604)构成,其中针孔后的所述第一四象限光电探测器PSD(603)为共焦分系统探测器,所述第二四象限光电探测器PSD(604)为干涉分系统探测器。

7. 一种使用权利要求1所述装置的测量方法,其特征在于:光强采集时,分别以四个干涉光斑重心为中心,通过采集设定的4个大区域内光强,获得干涉分系统输出,即为 I_A, I_B, I_C, I_D ;相应地,采集设定的4个小针孔内光强获得共焦分系统输出,即为: I'_A, I'_B, I'_C, I'_D ,并通过公式(1):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{I_A - I_C}{I_B - I_D}, \quad z = \frac{\lambda}{4\pi}\varphi \quad (1)$$

可获得测量光与参考光的相位差 φ 及其对应轴向光程差 z ;

通过公式(2)计算共焦分系统输出 $I_{\text{CMS}}(u)$:

$$I_{CMS}(u) = \frac{(I'_A + I'_C) - (I'_B + I'_D)}{I'_A + I'_C + I'_B + I'_D} \quad (2)$$

并可由共焦分系统轴向测量特性获得对应位移的粗测值 u ,其中 u 为归一化轴向光学坐标;进而可获得轴向离焦位置 $l = \frac{\lambda}{8\pi \sin^2(\alpha/2)} u$,其中 α 是物镜数值孔径;

利用所述测量装置对物面当前 a 位置和 b 位置进行测量,从而获得其对应位置 z_a 、 l_a 和 z_b 、 l_b ;最后,利用公式(3)计算物面高度差 H_{ab} :

$$H_{ab} = kT + z_b - z_a \quad (3)$$

其中, $T = \lambda/2$ 为干涉分系统的测量周期, k 是 $l_b - l_a$ 所包含的干涉测量周期数,为整数。

光针式共光路干涉共焦位移测量装置与方法

技术领域

[0001] 本发明涉及超精密三维测量领域,具体涉及一种可实现大量程、高分辨力的光针式共光路干涉共焦位移测量装置与方法。

背景技术

[0002] 随着纳米科技的进步,人类正朝着更精细的微观领域不断迈进。微结构功能表面已被广泛应用于微光学元件、微机电元件以及飞行器制造等许多产业,对其制件表面形貌和结构特征尺寸的超精密测量,市场需求量巨大,如硅晶加工中几何特征和膜厚的检测,表面仿形和纹理结构测量以及光电产品中大型微细结构功能表面加工测量等。在这些领域中,干涉测量技术和共焦显微测量技术都得到了充分的应用。移相干涉技术测量精度高,但测量范围小且易受环境干扰影响,难以测量大台阶和高深宽比的微结构;共焦显微测量技术具有独特的三维层析能力,可以实现在较大范围内测量,但其测量精度受限于物镜数值孔径。

[0003] 为了克服环境振动、实现大范围高精度测量,将移相干涉技术与共焦显微技术结合起来,利用共焦显微技术的零点特性和干涉信号的周期特性,可完成对非连续微结构表面的形貌测量。文献《大台阶高度测量的外差共焦方法》(中国激光,2005)提出一种双频激光外差干涉共焦显微系统,通过Z向位移扫描的方式确定共焦光强最大值,然后利用双频激光干涉仪的相位值确定表面高度。整个系统实现了大台阶测量中的高分辨力和大量程,但是该方法受限于Z向扫描机构的精度和扫描范围,同时系统结构复杂不利于抑制干扰。文献《同步移相干涉共焦显微成像技术研究》中提出了一种利用偏振分光镜实现同步移相干涉共焦的测量结构,通过四路光强探测器信号解算可在较大范围内,实现纳米级的测量分辨力。但是该系统较为复杂,装调难度高;同时干涉测量系统与共焦显微系统共用同一光强信号,在位移信号解算时会产生相互干扰。专利《分瞳式移相干涉共焦微位移测量装置》(专利公开号:ZL201610317208.5)提出利用二维光栅和四象限偏振移相、移焦阵和软针孔阵列将四路干涉共焦光路集成,在实现高精度绝对位置测量的同时,简化了系统结构,解决了系统调整困难的问题。但由于仍采用迈克耳逊干涉光路结构,参考臂与测量臂分开导致抗干扰能力存在不足,且不利于小型化;另一方面,干涉分系统与共焦分系统仍共用同一光强信号,存在信号耦合效应,影响测量的准确性。

发明内容

[0004] 本发明针对现有技术的不足,其目的在于提供一种光针式共光路干涉共焦位移测量装置与方法,该装置具有抗干扰能力强、分辨力高、测量范围大和集成度高的特点,同时可去除干涉与共焦分系统之间的信号耦合效应,实现对非连续表面微结构的三维准确测量。

[0005] 为达到上述目的,本发明通过以下的技术方案实现:

[0006] 本发明光针式共光路干涉共焦位移测量装置包括:线偏振光源(101)、1/2波片

(102) 组成的光源模块发出平行光, 偏振方向与分光棱镜 (PBS) (103) 透光轴 (x 向) 一致, 光束经 PBS (103) 透射后经第一 1/4 波片 (104) 照射到环形参考反射镜 (105) 上, 一部分光经环形反射镜反射构成参考光, 按原光路返回; 一部分光穿过环形反射镜构成测量光, 经物镜 (106) 形成聚焦光针照射到样品表面 (107), 然后再经样品表面反射按原光路返回; 由于测量光和参考光均两次经过第一 1/4 波片 (104), 该波片光轴与 x 方向夹角 45° , 返回光束偏振方向变为 y 向, 则返回光经 PBS (103) 反射; 参考光经过环形 1/2 波片 (108), 偏振方向旋转 90° , 而测量光由该元件中心穿过, 此时测量光与参考光偏振方向相互垂直; 再经过第二 1/4 波片 (109) 分别变为左旋、右旋圆偏振光, 经二维 Ronchi 光栅 (110) 与偏振移相阵列 (111), 参考光与测量光发生移相; 进一步, 光分别经过 2 对相互共轭的移焦光瞳阵列 (112), 选出四路 ($\pm 1, \pm 1$) 衍射光, 其中 2 束光经移焦光瞳滤波器后, 经透镜 (113) 汇聚, 其焦面位置会发生正移焦, 而另外 2 束光经共轭移焦光瞳滤波器后, 其焦面会发生负移焦; 同时, 测量光与参考光在透镜 (113) 焦面附近发生干涉, 由变区域光强探测器 (114) 分别对四路干涉光进行探测, 并经数据处理后获得位移测量值。

[0007] 其中环形反射镜 (105), 使光束的中心部分光穿过该元件形成测量光, 而光束外环区被反射形成参考光, 实现干涉测量中的分束功能。通过结构尺寸控制, 可保证干涉光与测量光所占面积比例为 1:1, 且不影响物镜工作距。

[0008] 其中环形 1/2 波片 (108), 其光轴与入射参考光偏振方向夹角 45° , 将参考光偏振方向改变, 使测量光与参考光的偏振方向相互垂直。

[0009] 其中偏振移相阵列 (111) 的相邻象限偏振轴夹角为 45° , 可实现对测量光和参考光的移相。

[0010] 其中移焦光瞳阵列 (112), 其结构中包括 4 个关于中心对称的子光瞳区, 相邻子光瞳为相位共轭光瞳, 每个子光瞳滤波器为圆对称相位光瞳, 二环或多环结构, 子光瞳外轮廓半径与环形参考镜外轮廓半径相同, 子光瞳之外的区域不透光, 其作用是选出四路 ($\pm 1, \pm 1$) 衍射光, 并使其中 2 束光经移焦光瞳滤波器后, 在收集透镜 (113) 后焦面位置会发生正移焦, 而另外 2 束光经共轭移焦光瞳滤波器后, 在收集透镜 (113) 后焦面位置会发生负移焦。

[0011] 本发明进一步的改进在于, 还包括测量光与参考光经收集透镜 (113) 汇聚后, 在焦面附近发生干涉, 然后通过变区域光强探测器实现干涉、共焦信号的分别采集。

[0012] 本发明光针式共光路干涉共焦位移测量装置, 其测量方法如下:

[0013] 由上述光路得到四路参考光和四路测量光分别在收集透镜焦面处发生干涉, 四路参考光光场分布为:

$$[0014] \quad U_r^A = \exp(i\frac{\pi}{2})U_0^+, \quad U_r^B = \exp(i\frac{\pi}{4})U_0^-, \quad U_r^C = U_0^+, \quad U_r^D = \exp(i\frac{3\pi}{4})U_0^-;$$

[0015] 四路测量光光场分布为:

$$[0016] \quad U_m^A = \exp(i\varphi)U_c^+, \quad U_m^B = \exp(i\varphi + \frac{\pi}{4})U_c^-, \quad U_m^C = \exp(i\varphi + \frac{\pi}{2})U_c^+, \quad U_m^D = \exp(i\varphi - \frac{\pi}{4})U_c^-$$

[0017] 其中, U_0^+ 和 U_0^- 分别为经光瞳正移焦和负移焦后的参考光复振幅, 且有 $|U_0^+|^2 = |U_0^-|^2$; U_c^+ 和 U_c^- 分别为为经光瞳正移焦和负移焦后的测量光复振幅, φ 为参考光与测量光的相位差。

[0018] 对于测量光,根据共焦显微成像原理可知,在探测器上的光场强度表示为:

$$[0019] \quad I(v,u) = |h_1(v,u)|^2 |h_2(v,u)|^2 \otimes_2 D(v)$$

[0020] 其中 (v,u) 为被测物面上的点, v 和 u 表示归一化径向和轴向光学坐标, $h_1(v,u)$, $h_2(v,u)$ 分别为照明臂和探测臂的复振幅点扩展函数, $D(v)$ 为探测区域。由于移焦光瞳加在探测臂上,因此当探测区域无限大时, $I(v,u) = |h_1(v,u)|^2$, 此时移焦光瞳对于探测光的作用消失。

[0021] 因此,当参考光与测量光在收集透镜焦面附近发生干涉,在较大区域内采集干涉光,并通过公式(1)可获得测量光与参考光之间的相位差 φ 及其对应轴向光程差 z :

$$[0022] \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{I_A - I_C}{I_B - I_D}, \quad z = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi \quad (1)$$

[0023] 进一步,四路点针孔探测器得到的光强通过下式计算共焦分系统输出 $I_{\text{CMS}}(u)$,

$$[0024] \quad I_{\text{CMS}}(u) = \frac{(I'_A + I'_C) - (I'_B + I'_D)}{I'_A + I'_C + I'_B + I'_D} = \frac{|U_c^+|^2 - |U_c^-|^2}{|U_c^+|^2 + |U_c^-|^2} \quad (2)$$

[0025] 从而,可由共焦分系统测量特性获得对应位移的粗测值 u ,进而可获得轴向离焦位置 $l = \frac{\lambda}{8\pi \sin^2(\alpha/2)} u$, 其中 α 是物镜数值孔径。

[0026] 在上述方法中,通过在较大区域采集光强,并由公式(1)获得精确的干涉相位,可保留干涉光强的交流部分,消除移焦光瞳对干涉相位测量的耦合作用;共焦测量中利用点针孔探测和公式(2)计算,可保留干涉光强的直流流部分,消除干涉光强交流部分对共焦分系统测量的影响。

[0027] 实际测量时,首先将被测物面放置于物镜焦面附近,并通过上述测量装置对物面当前 a 位置进行测量,获得 φ 和 $I_{\text{CMS}}(u)$, 从而获得其对应位置 z_a 和 l_a ; 然后,通过位移台沿横向移动到 b 位置,相应地可获得 z_b 和 l_b ; 利用公式(3)计算物面高度差 H_{ab} :

$$[0028] \quad H_{ab} = kT + z_b - z_a \quad (3)$$

[0029] 其中, $T = \lambda/2$ 为干涉分系统的测量周期, k 是 $l_b - l_a$ 所包含的干涉测量周期数,为整数。

[0030] 本发明具有以下显著特点和有益效果:

[0031] 1、本发明采用共光路结构,即利用环形反射镜将测量光与参考光分开,同时将干涉测量与共焦测量合并在同一光路中,可使系统集成度显著提高,且可有效提高系统的抗共模干扰的能力;

[0032] 2、通过变区域采集光强的方法将干涉与共焦信号进行解耦,有效地抑制了系统中的耦合效应;

[0033] 3、数据处理中,通过采用了差值和比值解算处理,可进一步提高系统的稳定性,消除共模加性噪声和乘性噪声。

[0034] 本发明可应用于具有大台阶、高深宽比的微结构几何参数和粗糙表面三维形貌测量。

附图说明

- [0035] 附图1为光针式共光路干涉共焦位移测量装置结构示意图。
- [0036] 附图2为环形反射镜(105)结构示意图
- [0037] 附图3为环形1/2波片(108)结构示意图
- [0038] 附图4为偏振移相阵列(111)及移焦光瞳阵列(112)组件结构示意图
- [0039] 附图5为特性曲线图,其中(a)为移相干涉轴向响应特性曲线图,(b)为共焦轴向响应特性曲线图
- [0040] 附图6为光针式共光路干涉共焦位移测量装置实例二结构示意图。

具体实施方式

- [0041] 下面结合实施例和附图对本发明整体作进一步地详细说明。
- [0042] 实施实例一
- [0043] 附图1为光针式共光路干涉共焦位移测量装置结构示意图,也是本发明实施例的光路结构示意图。由图可见本发明光针式共光路干涉共焦位移测量装置的构成为:
- [0044] 包括线偏振激光器(101)、1/2波片(102)、偏振分光棱镜(PBS)(103)、第一1/4波片(104)、环形参考反射镜(105)、物镜(106)、被测面(107)、环形1/2波片(108)、第二1/4波片(109)、二维Ronchi光栅(110)、偏振移相阵列(111)、移焦光瞳阵列(112)、收集透镜(113)、成像管镜(115)、CCD(116)。
- [0045] 其中线偏振激光器(101)和1/2波片(102)组成测量系统的光源模块。
- [0046] 其中环形反射镜(105),使光束的中心部分光穿过该元件形成测量光,而光束外环区被反射形成参考光,实现干涉测量中的分束功能。其结构如附图2所示,中心孔归一化半径 $r=0.707$,而外圆归一化半径 $R=1$ 。
- [0047] 其中环形1/2波片(108),其光轴与入射参考光偏振方向夹角 45° ,将参考光偏振方向改变,使测量光与参考光的偏振方向相互垂直。其结构如附图3所示,中心孔归一化半径 $r=0.707$,而外圆归一化半径 $R=1$ 。
- [0048] 其中偏振移相阵列(111)和移焦光瞳阵列(112)的结构,如附图4所示。偏振移相阵列的相邻象限偏振轴夹角为 45° ,移焦光瞳阵列相邻象限的相位光瞳相互共轭。
- [0049] 光学路径:线偏振光源(101)、1/2波片(102)组成的光源模块发出平行光,偏振方向与分光棱镜(PBS)(103)透光轴(x向)一致,光束经PBS(103)透射后经第一1/4波片(104)照射到环形参考反射镜(105)上,参考光按原光路返回;测量光经物镜(106)形成聚焦光针照射到样品表面(107),然后再经样品表面反射按原光路返回;由于测量光和参考光均两次经过第一1/4波片(104),该波片光轴与x方向夹角 45° ,返回光束偏振方向变为y向,则返回光经PBS(103)反射;参考光经过环形1/2波片(108),偏振方向旋转 90° ,而测量光由该元件中心穿过,此时测量光与参考光偏振方向相互垂直;再经过第二1/4波片(109)分别变为左旋、右旋圆偏振光,经二维Ronchi光栅(110)与偏振移相阵列(111),参考光与测量光发生移相;进一步,光分别经过2对相互共轭的移焦光瞳阵列(112),选出四路($\pm 1, \pm 1$)衍射光,其中2束光经移焦光瞳滤波器后,经透镜(113)汇聚,其焦面位置会发生正移焦,而另外2束光经共轭移焦光瞳滤波器后,其焦面会发生负移焦;同时,测量光与参考光在透镜(113)焦面附近发生干涉,由变区域光强探测器(114)分别对四路干涉光进行探测,并经数据处理后获

得位移测量值。

[0050] 本发明进一步的改进在于,还包括变区域光强探测器(114),可由成像管镜(115)和CCD(116)构成。光束在焦面附近发生干涉,然后通过成像管镜(115)放大,将位于焦面的四路干涉共焦光斑成像到CCD像面(116)上,并通过变区域光强探测方法实现干涉、共焦信号的分别采集。

[0051] 当对被测物表面进行测量时,测量过程与数据处理步骤为:

[0052] 步骤1、将被测物面放置于物镜焦面附近,并通过上述测量装置对物面当前a位置进行测量,利用公式(1)和(2)获得 φ 和 $I_{\text{CMS}}(u)$,然后利用干涉、共焦分系统测量特性曲线,如附图5(a)和(b),可获得其对应位置 z_a 和 l_a ;

[0053] 步骤2、通过位移台沿横向移动到b位置,利用公式(1)和(2)获得 φ 和 $I_{\text{CMS}}(u)$,相应地可获得 z_b 和 l_b ;

[0054] 步骤3、计算 $l_b - l_a$ 所包含的干涉周期数k,然后利用公式(3)计算物面高度差 H_{ab} 。

[0055] 实施实例二

[0056] 将实施实例一中的成像管镜(115)和CCD(116)替换为图6中的探测结构,即构成实施实例二。该探测结构包括:半反半透镜片(601),4个针孔构成的针孔阵列(602),四象限光电探测器PSD(603)为共焦分系统的光强探测器,四象限光电探测器PSD(604)为干涉分系统的光强探测器,该实施例要求两个四象限光电探测器同步进行光电转换。其余测量方法与装置与实施实例一相同。

[0057] 以上结合附图对本发明的具体实施方式作了说明,但这些说明不能被理解为限制本发明的范围。

[0058] 本发明的保护范围由随附的权利要求书限定,任何在本发明权利要求基础上的改动都是本发明的保护范围。

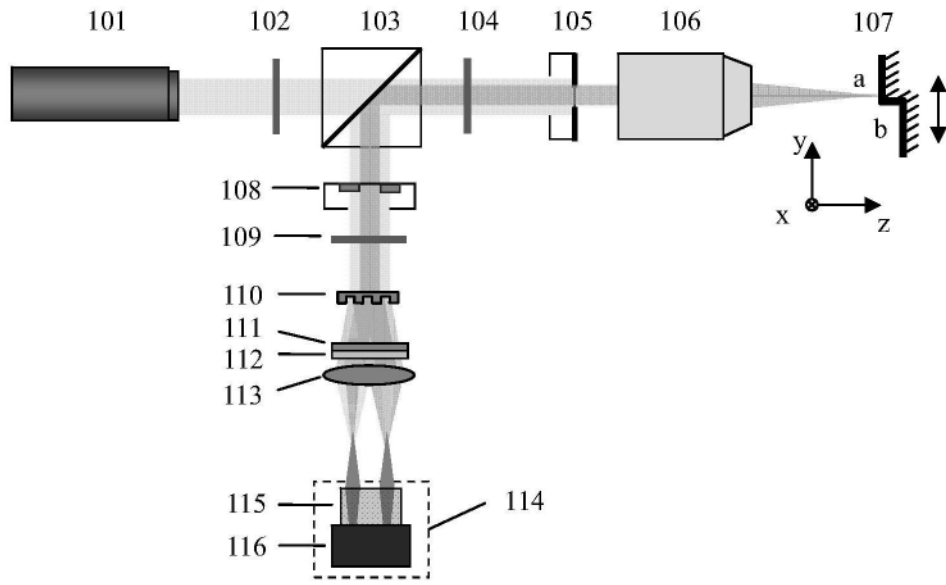


图1

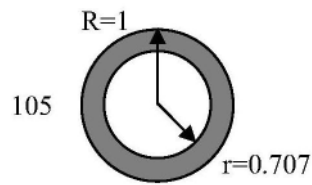


图2

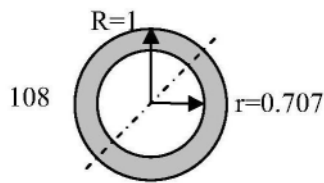


图3

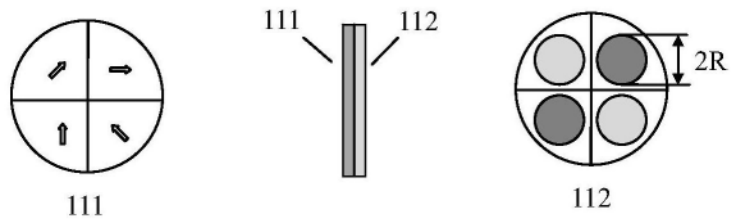


图4

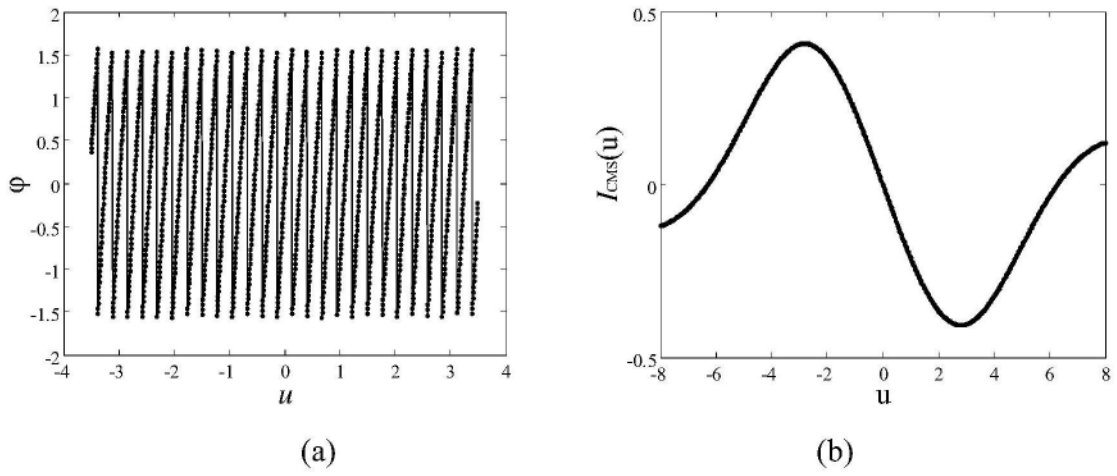


图5

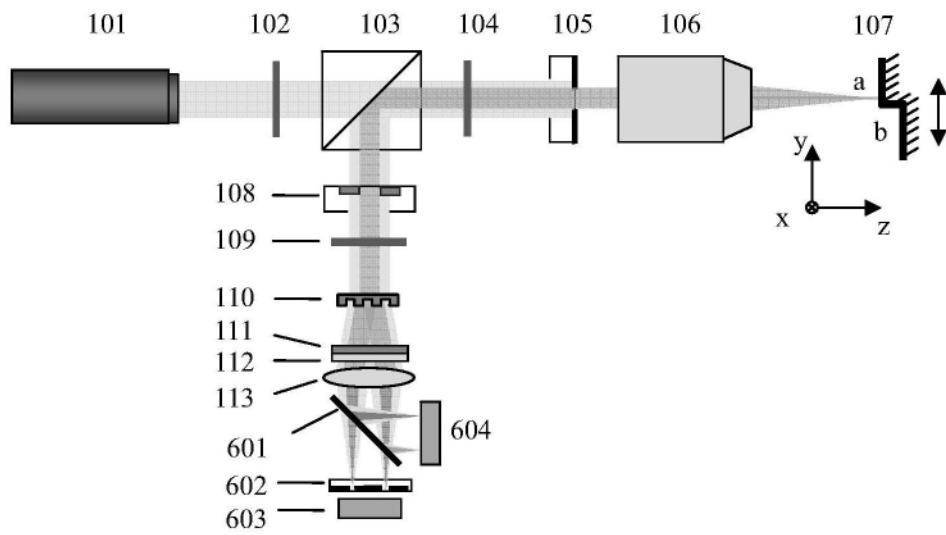


图6