



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115077390 B

(45) 授权公告日 2023.03.24

(21) 申请号 202110265066.3

(22) 申请日 2021.03.11

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115077390 A

(43) 申请公布日 2022.09.20

(73) 专利权人 山东大学
地址 250199 山东省济南市历城区山大南
路27号

(72) 发明人 杨忠明 胡晓宁 杨栋 刘兆军

(74) 专利代理机构 济南金迪知识产权代理有限
公司 37219

专利代理师 赵龙群

(51) Int. Cl.

G01B 11/02 (2006.01)

G01B 9/02002 (2022.01)

G01B 9/02015 (2022.01)

G01B 9/02098 (2022.01)

(56) 对比文件

US 2020132443 A1, 2020.04.30

CN 111121644 A, 2020.05.08

CN 109297930 A, 2019.02.01

CN 103983198 A, 2014.08.13

CN 106767427 A, 2017.05.31

CN 110779448 A, 2020.02.11

赵冬娥等. 基于涡旋光与球面波干涉的微位移测量研究.《红外与激光工程》.2020,第49卷(第04期),0413005-1-0413005-6.

夏豪杰等. 涡旋光位移干涉测量方法与信号处理.《光学精密工程》.2020,第28卷(第09期),1905-1912.

薛婧璇等. 光涡旋阵列位移测量模拟.《山东师范大学学报(自然科学版)》.2017,第32卷(第01期),101-106.

审查员 潘景良

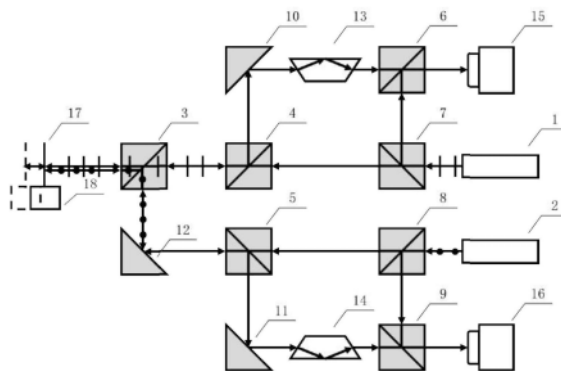
权利要求书3页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统及方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统及方法,该测量系统包括第一涡旋光发生器、第二涡旋光发生器、第一二维光电传感器、第二二维光电传感器和辅助测量反射镜,且第一涡旋光发生器和第二涡旋光发生器发出的涡旋光的波长不同。本发明的测量系统采用马赫-曾德干涉仪结构,系统结构紧凑,稳定性强,测量精度高。本发明能够获得不同波长下待测样品发生位移前、后的干涉光强分布图像,通过计算机进行处理,计算待测样品在发生位移前、后的干涉图像的全行程旋转角度,然后计算出待测物品的位移量Z,实现大量程皮米级位移快速测量。



1. 一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,其特征在于,包括第一涡旋光发生器、第二涡旋光发生器、第一二维光电传感器、第二二维光电传感器和辅助测量反射镜,且第一涡旋光发生器和第二涡旋光发生器发出的涡旋光的波长不同;

所述辅助测量反射镜固定在待测样品上,用于将光路原路返回;

所述第一涡旋光发生器发出的涡旋光经第四分光棱镜分为第一透射光和第一反射光两路,

第一反射光作为参考光,经第三分光棱镜反射输出;

第一透射光作为测量光,依次经过第一分光棱镜、偏振分光棱镜照射到所述辅助测量反射镜上,经过辅助测量反射镜反射回来的涡旋光再依次经过偏振分光棱镜、第一分光棱镜、第一转向反射镜、第一道威棱镜,再经过第三分光棱镜透射输出;

第三分光棱镜反射出的反射光和透射出的透射光在第一二维光电传感器上发生干涉,得到第一干涉光强分布图像;

所述第二涡旋光发生器发出的涡旋光经第五分光棱镜分为第二透射光和第二反射光两路,

第二反射光作为参考光,经第六分光棱镜反射射出;

第二透射光作为测量光,依次经过第二分光棱镜、第三转向反射镜、偏振分光棱镜照射到所述辅助测量反射镜上,经过辅助测量反射镜反射回来的涡旋光依次经过偏振分光棱镜、第三转向反射镜、第二分光棱镜、第二转向反射镜、第二道威棱镜,再经过第六分光棱镜透射射出;

第六分光棱镜反射出的反射光和透射出的透射光在第二二维光电传感器上发生干涉,得到第二干涉光强分布图像;

在待测样品移动前后,先分别提取第一干涉光强分布图像和第二干涉光强分布图像的相对旋转角,再计算得到第一干涉光强分布图像和第二干涉光强分布图像的全行程旋转角度,最后求得待测样品的皮米级位移量,实现大量程皮米级位移快速测量。

2. 根据权利要求1所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,其特征在于,所述第一涡旋光发生器产生波长为300-700nm,拓扑荷为1-4的线偏振涡旋光;所述第二涡旋光发生器产生波长为300-700nm,拓扑荷为1-4的线偏振涡旋光。

3. 根据权利要求2所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,其特征在于,所述第一涡旋光发生器产生波长为633nm,拓扑荷为1的线偏振涡旋光;所述第二涡旋光发生器产生波长为643nm,拓扑荷为1的线偏振涡旋光。

4. 根据权利要求1所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,其特征在于,所述第一二维光电传感器、第二二维光电传感器为CCD、CMOS或二维光电探测器阵列。

5. 根据权利要求1所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,其特征在于,所述偏振分光棱镜对P偏振光与S偏振光的透过率之比大于1000,且对P偏振光的透过率在90%以上。

6. 根据权利要求1所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,其特征在于,所述第一分光棱镜和第二分光棱镜均为透射率与反射率之比5:5的分光棱镜。

7. 根据权利要求1所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,其特征在于,所述第三分光棱镜、第四分光棱镜、第五分光棱镜和第六分光棱镜的透射率与反射率之比均为7:3。

8. 一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量方法,采用权利要求1-7任一项所述的测量系统,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 第一涡旋光发生器和第二涡旋光发生器分别发出波长为 λ_1 和 λ_2 的涡旋光,且 $\lambda_2 > \lambda_1$,由第一二维光电传感器获得待测样品发生位移前、位移后的第一干涉光强分布图像;由第二二维光电传感器获得待测样品发生位移前、位移后的第二干涉光强分布图像;

(2) 通过对第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像进行处理,得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的相对旋转角度;

(3) 由相对旋转角度计算得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的全行程旋转角,再通过全行程旋转角计算得到待测样品的皮米级位移量。

9. 根据权利要求8所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量方法,其特征在于,步骤(2)中,通过对第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像进行处理,得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的相对旋转角度;具体过程为:

在待测样品位移前的第一干涉强度分布图像、第二干涉强度分布图像以及位移后的第一干涉强度分布图像和第二干涉强度分布图像上分别设置圆,圆的圆心与第一干涉分别图像及第二干涉分别图像的圆心重合,圆的半径为光强极值点到圆心的距离;

通过MATLAB分别提取圆上点所在位置处的光强,然后在极化坐标系中同时显示提取的四组光强,得到极坐标下的光强分布图像;

在四组光强的极值点所在位置设置指针,分别提取待测样品位移后与位移前极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度;得到在波长 λ_1 情况下第一干涉强度分布图像的相对旋转角度 $\Delta\theta_{11}$ 和在波长 λ_2 情况下第二干涉强度分布图像的相对旋转角度 $\Delta\theta_{22}$ 。

10. 根据权利要求8所述的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量方法,其特征在于,步骤(3)中,由相对旋转角度计算得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的全行程旋转角,再通过全行程旋转角计算得到待测样品的皮米级位移量;具体过程为:

3-1、计算波长 λ_2 的涡旋光对应的第二干涉光强分布图像旋转的圈数 n ;

$$n = \begin{cases} \frac{\Delta\theta_{11} \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} > \Delta\theta_{22} \\ \frac{(\Delta\theta_{11} + 2\pi) \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} < \Delta\theta_{22} \end{cases} \quad (I)$$

式(I)中, λ_1 为第一涡旋光发生器发出的线偏振涡旋光波长, λ_2 为第二涡旋光发生器发出的线偏振涡旋光波长, $\Delta\theta_{11}$ 为在波长 λ_1 下第一干涉强度分布图像的相对旋转角度, $\Delta\theta_{22}$ 为在波长 λ_2 下第二干涉强度分布图像的相对旋转角度;

3-2、将 n 代入如下式(II) — (IV)中,求得在波长为 λ_1 时,第一干涉光强分布图像的全行程旋转角 $\Delta\theta_1$;以及波长为 λ_2 时,第二干涉光强分布图像的全行程旋转角 $\Delta\theta_2$;

$$\Delta\theta_1 = \begin{cases} 2\pi n + \Delta\theta_{11}, & \Delta\theta_{11} > \Delta\theta_{22} \\ 2\pi(n+1) + \Delta\theta_{11}, & \Delta\theta_{11} < \Delta\theta_{22} \end{cases} \quad (\text{II}) ;$$

$$\Delta\theta_2 = 2\pi n + \Delta\theta_{22} \quad (\text{III}) ;$$

$$\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (\text{IV}) ;$$

3-3、通过 $Z = \frac{\lambda_1}{2\pi} \Delta\theta_1 = \frac{\lambda_2}{2\pi} \Delta\theta_2$, 求得待测样品的位移量 Z 。

一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统及方法,属于光学干涉精密计量技术领域。

背景技术

[0002] 皮米级位移的测量在几何参量测量研究中具有举足轻重的意义。军工、航空航天、生物医学、精密机械、流场测量、微力测量和固体表面测量等诸多实际应用场合中都有获取物体高精度位移的需求,例如:机床刀头位置定位、工件加工误差检测、集成电路加工、大桥桥墩的形变、大坝墙体的变形测量等。而激光干涉皮米级位移测量技术由于具有非接触性、测量精度高、可溯源等独特优势一直是人们研究的热点。

[0003] 传统的光学干涉仪常采用双光束通道或多光束通道进行相干测量,因此整个测量系统体积庞大、结构复杂、造价昂贵并且测量范围受限于光源的相干长度,测量精度低,观测范围小。且这类方法通常采用两列平面波进行干涉,干涉图样为一系列黑白相间的平行直条纹,通过计数条纹的移动量来求得皮米级位移的大小,最大的弊端就是无法精确计数条纹的移动量,且需要开发专门的条纹计数算法,计算速度慢,很难同时做到皮米级位移的高精度快速测量。

[0004] 中国专利文献CN111121644A公开了一种基于涡旋光与球面波干涉的皮米级位移测量方法及装置,其中一束光照射至空间光调制器产生涡旋光束作为参考光,另一束光经透镜变为球面波后照射至物体上,两束光干涉后干涉条纹呈螺旋状分布;当物体发生微小位移时两束光的光程差改变,螺旋干涉条纹发生旋转,通过旋转角度可以确定物体的皮米级位移量。但是该发明所提出的方法难以非常精确地获得螺旋干涉条纹的旋转角度,且测量范围小,很难满足实际应用中的测量需求。

发明内容

[0005] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统及方法,可以实现位移的皮米级快速测量,测量精度高,测量速度快,且能够实现大量程皮米级位移测量。

[0006] 术语解释:

[0007] 1.CCD:Charge Coupled Device的简称,电荷耦合器件。它能够将光线变为电荷并将电荷存储及转移,也可将存储的电荷取出使电压发生变化,因此是理想的CCD相机元件,以其构成的CCD相机具有体积小、重量轻、不受磁场影响、具有抗震动和撞击之特性而被广泛应用。

[0008] 2.CMOS:Complementary Metal Oxide Semiconductor的简称,互补金属氧化物半导体。其中的N型半导体和P型半导体间的互补效应所产生的电流可以处理芯片记录和解读成影像,可以作为数码摄影中的图像传感器。

[0009] 本发明的技术方案为：

[0010] 一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统，包括第一涡旋光发生器、第二涡旋光发生器、第一二维光电传感器、第二二维光电传感器和辅助测量反射镜，且第一涡旋光发生器和第二涡旋光发生器发出的涡旋光的波长不同；通过设置两个发射不同涡旋光的发生器可以增大量程，实现更大测量范围的皮米级位移测量；

[0011] 所述辅助测量反射镜固定在待测样品上，用于将光路原路返回；

[0012] 所述第一涡旋光发生器发出的涡旋光经第四分光棱镜分为第一透射光和第一反射光两路，

[0013] 第一反射光作为参考光，经第三分光棱镜反射输出；

[0014] 第一透射光作为测量光，依次经过第一分光棱镜、偏振分光棱镜照射到所述辅助测量反射镜上，经过辅助测量反射镜反射回来的涡旋光再依次经过偏振分光棱镜、第一分光棱镜、第一转向反射镜、第一道威棱镜，再经过第三分光棱镜透射输出；第一道威棱镜用于在光路中增加一次反射以达到共轭干涉的目的，与设置反射镜相比更为简便；

[0015] 第三分光棱镜反射出的反射光和透射出的透射光在第一二维光电传感器上发生干涉，得到第一干涉光强分布图像；

[0016] 所述第二涡旋光发生器发出的涡旋光经第五分光棱镜分为第二透射光和第二反射光两路，

[0017] 第二反射光作为参考光，经第六分光棱镜反射射出；

[0018] 第二透射光作为测量光，依次经过第二分光棱镜、第三转向反射镜、偏振分光棱镜照射到所述辅助测量反射镜上，经过辅助测量反射镜反射回来的涡旋光依次经过偏振分光棱镜、第三转向反射镜、第二分光棱镜、第二转向反射镜、第二道威棱镜，再经过第六分光棱镜透射射出；

[0019] 第六分光棱镜反射出的反射光和透射出的透射光在第二二维光电传感器上发生干涉，得到第二干涉光强分布图像；

[0020] 在待测样品移动前后，先分别提取第一干涉光强分布图像和第二干涉光强分布图像的相对旋转角，再计算得到第一干涉光强分布图像和第二干涉光强分布图像的全行程旋转角度，最后求得待测样品的皮米级位移量，实现大量程皮米级位移快速测量。

[0021] 根据本发明优选的，所述第一涡旋光发生器产生波长为300-700nm，拓扑荷为1-4的线偏振涡旋光；所述第二涡旋光发生器产生波长为300-700nm，拓扑荷为1-4的线偏振涡旋光；

[0022] 进一步优选的，所述第一涡旋光发生器产生波长为633nm，拓扑荷为1的线偏振涡旋光；所述第二涡旋光发生器产生波长为643nm，拓扑荷为1的线偏振涡旋光。

[0023] 根据本发明优选的，所述第一二维光电传感器、第二二维光电传感器为CCD、CMOS或二维光电探测器阵列。

[0024] 根据本发明优选的，所述偏振分光棱镜对P偏振光与S偏振光的透过率之比大于1000，且对P偏振光的透过率在90%以上。如此设置的好处在于，能够提高偏振纯度，确保偏振分光棱镜有比较好的分光效果，避免不同波长涡旋光之间的相互干扰。

[0025] 根据本发明优选的，所述第一分光棱镜和第二分光棱镜均为透射率与反射率之比5:5的分光棱镜。不具有偏振特性。如此设置的好处在于，与其他分光棱镜相配合，使到达第

一、第二二维光电传感器的参考光与测试光强度接近,实现更好的干涉效果。

[0026] 根据本发明优选的,所述第三分光棱镜、第四分光棱镜、第五分光棱镜和第六分光棱镜的透射率与反射率之比均为7:3。不具有偏振特性。如此设置的好处在于,与其他分光棱镜相配合,使到达第一、第二二维光电传感器的参考光与测试光强度接近,实现更好的干涉效果。

[0027] 一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量方法,采用上述的测量系统,包括如下步骤:

[0028] (1) 第一涡旋光发生器和第二涡旋光发生器分别发出波长为 λ_1 和 λ_2 的涡旋光,且 $\lambda_2 > \lambda_1$,由第一二维光电传感器获得待测样品发生位移前、位移后的第一干涉光强分布图像;由第二二维光电传感器获得待测样品发生位移前、位移后的第二干涉光强分布图像;

[0029] (2) 通过对第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像进行处理,得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的相对旋转角度;

[0030] (3) 由相对旋转角度计算得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的全行程旋转角,再通过全行程旋转角计算得到待测样品的皮米级位移量。

[0031] 总的来说,通过对位移前后的干涉图读取相对旋转角度,可以得出干涉图旋转的圈数,进而求得全行程旋转角,从而获得待测样品的位移量。

[0032] 根据本发明优选的,步骤(2)中,通过对第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像进行处理,得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的相对旋转角度;具体过程为:

[0033] 在待测样品位移前的第一干涉强度分布图像、第二干涉强度分布图像以及位移后的第一干涉强度分布图像和第二干涉强度分布图像上分别设置圆,圆的圆心与第一干涉分别图像及第二干涉分别图像的圆心重合,圆的半径为光强极值点到圆心的距离;

[0034] 通过MATLAB分别提取圆上点所在位置处的光强,然后在极化坐标系中同时显示提取的四组光强,得到极坐标下的光强分布图像;

[0035] 在四组光强的极值点所在位置设置指针,即连接极值点和原点得到指针,分别提取待测样品位移后与位移前极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度;在波长 λ_1 情况下,第一干涉强度分布图像的相对旋转角度 $\Delta\theta_{11}$, $\Delta\theta_{11}$ 为待测样品位移前、后在极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度差值;在波长 λ_2 情况下,第二干涉强度分布图像的相对旋转角度 $\Delta\theta_{22}$, $\Delta\theta_{22}$ 为待测样品位移前、后在极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度差值。

[0036] 根据本发明优选的,步骤(3)中,由相对旋转角度计算得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的全行程旋转角,再通过全行程旋转角计算得到待测样品的皮米级位移量;具体过程为:

[0037] 3-1、计算波长 λ_2 的涡旋光对应的第二干涉光强分布图像旋转的圈数 n ;

$$[0038] \quad n = \begin{cases} \frac{\Delta\theta_{11} \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} > \Delta\theta_{22} \\ \frac{(\Delta\theta_{11} + 2\pi) \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} < \Delta\theta_{22} \end{cases} \quad (I)$$

[0039] 式(I)中, λ_1 为第一涡旋光发生器发出的线偏振涡旋光波长, λ_2 为第二涡旋光发生

器发出的线偏振涡旋光波长, $\Delta\theta_{11}$ 为在波长 λ_1 下第一干涉强度分布图像的相对旋转角度, 单位为rad, $\Delta\theta_{22}$ 为在波长 λ_2 下第二干涉强度分布图像的相对旋转角度, 单位为rad;

[0040] 3-2、将n代入如下式 (II) — (IV) 中, 求得在波长为 λ_1 时, 第一干涉光强分布图像的全行程旋转角 $\Delta\theta_1$; 以及波长为 λ_2 时, 第二干涉光强分布图像的全行程旋转角 $\Delta\theta_2$;

$$[0041] \quad \Delta\theta_1 = \begin{cases} 2\pi n + \Delta\theta_{11}, & \Delta\theta_{11} > \Delta\theta_{22} \\ 2\pi(n+1) + \Delta\theta_{11}, & \Delta\theta_{11} < \Delta\theta_{22} \end{cases} \quad (\text{II});$$

$$[0042] \quad \Delta\theta_2 = 2\pi n + \Delta\theta_{22} \quad (\text{III});$$

$$[0043] \quad \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (\text{IV});$$

[0044] 3-3、通过 $Z = \frac{\lambda_1}{2\pi} \Delta\theta_1 = \frac{\lambda_2}{2\pi} \Delta\theta_2$, 求得待测样品的位移量Z。

[0045] 本发明的有益效果为:

[0046] 1. 本发明的测量系统采用马赫-曾德干涉仪结构, 系统结构紧凑, 稳定性强, 测量精度高。通过计算机对位移前后的双波长干涉图像进行处理, 可以提取“光学指针”, 能够生动形象地指示皮米级位移的变化量。

[0047] 2. 本发明计算量小, 通过计算机程序的进一步优化, 使用更高效的算法, 可以减少数据处理时间, 快速处理位移前后干涉图像, 识别涡旋光自共轭干涉图的转角, 具有极高的分辨率, 最小分辨率可达到 0.5° , 因此皮米级位移的理论分辨率小于1nm, 能够实现大量程皮米级位移的高精度快速测量。

[0048] 3. 本发明通过双波长干涉, 可以推算出干涉图旋转圈数, 进而在40微米的大量程内获得高精度位移结果, 当对波长进行调整时, 可以实现不同的量程与精度, 使应用更加广泛。

[0049] 4. 本发明可拓展运用于其他与光程变化相关物理量的测量, 如测量介质厚度、介质折射率等, 光学干涉法是一种非接触式测量方法, 可以将测量系统放在远离待测件的位置, 避免受到恶劣环境的影响。

附图说明

[0050] 图1为本发明实施例所提供的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的皮米级位移测量系统的结构示意图;

[0051] 图2a为本发明实施例中待测样品在位移前第一二维光电传感器获得的干涉强度分布图像;

[0052] 图2b为本发明实施例中待测样品在位移前第二二维光电传感器获得的干涉强度分布图像;

[0053] 图2c为本发明实施例中待测样品在位移后第一二维光电传感器获得的第一干涉强度分布图像;

[0054] 图2d为本发明实施例中待测样品在位移后第二二维光电传感器获得的第二干涉强度分布图像;

[0055] 图3a为本发明实施例中对待测样品在位移前和位移后的干涉强度分布图像提取光强的处理示意图;

[0056] 图3b为本发明实施例中待测样品在位移前和位移后在极坐标下的光强分布图;

[0057] 图3c为本发明实施例中待测样品在位移前和位移后的在极坐标下的光强分布图中指针夹角的角度图；

[0058] 图4为本发明实施例中所提供的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的皮米级位移测量方法的流程图。

[0059] 1、第一涡旋光发生器,2、第二涡旋光发生器,3、偏振分光棱镜,4、第一分光棱镜,5、第二分光棱镜,6、第三分光棱镜,7、第四分光棱镜,8、第五分光棱镜,9、第六分光棱镜,10、第一转向反射镜,11、第二转向反射镜,12、第三转向反射镜,13、第一道威棱镜,14、第二道威棱镜,15、第一二维光电传感器,16、第二二维光电传感器,17、辅助测量反射镜,18、待测样品。

具体实施方式

[0060] 下面结合实施例和说明书附图对本发明做进一步说明,但不限于此。

[0061] 实施例1

[0062] 一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,如图1所示,包括第一涡旋光发生器1、第二涡旋光发生器2、第一二维光电传感器15、第二二维光电传感器16和辅助测量反射镜17,且第一涡旋光发生器1和第二涡旋光发生器2发出的涡旋光的波长不同;通过设置两个发射不同涡旋光的发生器可以增大量程,实现更大测量范围的皮米级位移测量;

[0063] 辅助测量反射镜17固定在待测样品18上,用于将光路原路返回;

[0064] 第一涡旋光发生器1发出的涡旋光经第四分光棱镜7分为第一透射光和第一反射光两路,

[0065] 第一反射光作为参考光,经第三分光棱镜6反射输出;

[0066] 第一透射光作为测量光,依次经过第一分光棱镜4、偏振分光棱镜3照射到辅助测量反射镜17上,经过辅助测量反射镜17反射回来的涡旋光再依次经过偏振分光棱镜3、第一分光棱镜4、第一转向反射镜10、第一道威棱镜13,再经过第三分光棱镜6透射输出;第一道威棱镜13用于在光路中增加一次反射以达到共轭干涉的目的,与设置反射镜相比更为简便;

[0067] 第三分光棱镜6反射出的反射光和透射出的透射光在第一二维光电传感器15上发生干涉,得到第一干涉光强分布图像;

[0068] 第二涡旋光发生器2发出的涡旋光经第五分光棱镜8分为第二透射光和第二反射光两路,

[0069] 第二反射光作为参考光,经第六分光棱镜9反射射出;

[0070] 第二透射光作为测量光,依次经过第二分光棱镜5、第三转向反射镜12、偏振分光棱镜3照射到辅助测量反射镜17上,经过辅助测量反射镜17反射回来的涡旋光依次经过偏振分光棱镜3、第三转向反射镜12、第二分光棱镜5、第二转向反射镜11、第二道威棱镜14,再经过第六分光棱镜9透射射出;

[0071] 第六分光棱镜9反射出的反射光和透射出的透射光在第二二维光电传感器16上发生干涉,得到第二干涉光强分布图像;

[0072] 在待测样品18移动前后,先分别提取第一干涉光强分布图像和第二干涉光强分布

图像的相对旋转角,再计算得到第一干涉光强分布图像和第二干涉光强分布图像的全行程旋转角度,最后求得待测样品18的皮米级位移量,实现大量程皮米级位移快速测量。

[0073] 实施例2

[0074] 根据实施例1提供的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,区别之处在于:

[0075] 第一涡旋光发生器1产生波长为300-700nm,拓扑荷为1-4的线偏振涡旋光;第二涡旋光发生器2产生波长为300-700nm,拓扑荷为1-4的线偏振涡旋光;

[0076] 第一二维光电传感器15、第二二维光电传感器16为CCD、CMOS或二维光电探测器阵列。偏振分光棱镜3对P偏振光与S偏振光的透过率之比大于1000,且对P偏振光的透过率在90%以上。第一分光棱镜4和第二分光棱镜5均为透射率与反射率之比5:5的分光棱镜。不具有偏振特性。第三分光棱镜6、第四分光棱镜7、第五分光棱镜8和第六分光棱镜9的透射率与反射率之比均为7:3。不具有偏振特性。

[0077] 实施例3

[0078] 根据实施例2提供的一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量系统,区别之处在于:

[0079] 第一涡旋光发生器1产生波长为633nm,拓扑荷为1的线偏振涡旋光;第二涡旋光发生器2产生波长为643nm,拓扑荷为1的线偏振涡旋光。

[0080] 实施例4

[0081] 一种基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量方法,采用实施例1-3任一项提供的测量系统,该方法包括以下步骤:

[0082] (1) 第一涡旋光发生器1和第二涡旋光发生器2分别发出波长为 λ_1 和 λ_2 的涡旋光,且 $\lambda_2 > \lambda_1$,由第一二维光电传感器15获得待测样品18发生位移前、位移后的第一干涉光强分布图像;由第二二维光电传感器16获得待测样品18发生位移前、位移后的第二干涉光强分布图像;

[0083] (2) 通过对第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像进行处理,得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图像的相对旋转角度;具体过程为:

[0084] 在待测样品18位移前的第一干涉强度分布图像、第二干涉强度分布图像以及位移后的第一干涉强度分布图像和第二干涉强度分布图像上分别设置圆,圆的圆心与第一干涉分别图像及第二干涉分别图像的圆心重合,圆的半径为光强极值点到圆心的距离;

[0085] 通过MATLAB分别提取圆上点所在位置处的光强,然后在极化坐标系中同时显示提取的四组光强,得到极坐标下的光强分布图像;

[0086] 在四组光强的极值点所在位置设置为指针,分别提取待测样品18位移后与位移前极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度;在波长 λ_1 情况下,第一干涉强度分布图像的相对旋转角度 $\Delta \theta_{11}$; $\Delta \theta_{11}$ 为待测样品18位移后在极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度与待测样品18位移前在极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度之差值;

[0087] 在波长 λ_2 情况下,第二干涉强度分布图像的相对旋转角度 $\Delta \theta_{22}$, $\Delta \theta_{22}$ 为待测样品18位移后在极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度与待测样品18位移前在极坐标下的光强分布图像中指针与极轴的角度之差值;

[0088] (3) 由相对旋转角度计算得到第一干涉强度分布图像和第二第一干涉强度分布图

像的全行程旋转角,再通过全行程旋转角计算得到待测样品18的皮米级位移量。具体过程为:

[0089] 3-1、计算波长 λ_2 的涡旋光对应的第二干涉光强分布图像旋转的圈数 n ;

$$[0090] \quad n = \begin{cases} \frac{\Delta\theta_{11} \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} > \Delta\theta_{22} \\ \frac{(\Delta\theta_{11} + 2\pi) \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} < \Delta\theta_{22} \end{cases} \quad (\text{I})$$

[0091] 式(I)中, λ_1 为第一涡旋光发生器1发出的线偏振涡旋光波长, λ_2 为第二涡旋光发生器2发出的线偏振涡旋光波长, $\Delta\theta_{11}$ 为在波长 λ_1 下第一干涉强度分布图像的相对旋转角度,单位为rad, $\Delta\theta_{22}$ 为在波长 λ_2 下第二干涉强度分布图像的相对旋转角度,单位为rad;

[0092] 3-2、将 n 代入如下式(II) — (IV)中,求得在波长为 λ_1 时,第一干涉光强分布图像的全行程旋转角 $\Delta\theta_1$;以及波长为 λ_2 时,第二干涉光强分布图像的全行程旋转角 $\Delta\theta_2$;

$$[0093] \quad \Delta\theta_1 = \begin{cases} 2\pi n + \Delta\theta_{11}, & \Delta\theta_{11} > \Delta\theta_{22} \\ 2\pi(n+1) + \Delta\theta_{11}, & \Delta\theta_{11} < \Delta\theta_{22} \end{cases} \quad (\text{II});$$

$$[0094] \quad \Delta\theta_2 = 2\pi n + \Delta\theta_{22} \quad (\text{III});$$

$$[0095] \quad \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (\text{IV});$$

[0096] 3-3、通过 $Z = \frac{\lambda_1}{2\pi} \Delta\theta_1 = \frac{\lambda_2}{2\pi} \Delta\theta_2$,求得待测样品18的位移量 Z 。

[0097] 本发明通过双波长干涉,可以推算出干涉图旋转圈数,进而在40微米的大量程内获得高精度位移结果,当对波长进行调整时,可以实现不同的量程与精度,使应用更加广泛。

[0098] 具体的,根据本实施例提供的测量方法对2000nm皮米级位移的测量模拟,如图4所示,具体步骤包括:

[0099] 1、获取待测样品18即位移平台发生位移前后的干涉强度分布图像,待测样品18在波长 λ_1 和波长 λ_2 情况下,发生位移前的干涉强度分布是一致的,即发生位移前在第一二维光电传感器15获得的第一干涉强度分布图像和第二二维光电传感器16获得第二干涉强度分布图像是相同的,如图2a与图2b所示;本实施例中, $\lambda_1=633\text{nm}$ 、 $\lambda_2=643\text{nm}$ 。

[0100] 波长 λ_1 情况下,待测样品18位移后的第一干涉强度分布图像如图2c所示;波长 λ_2 情况下,待测样品18位移后的第二干涉强度分布图像如图2d所示。

[0101] 2、通过计算机中MATLAB软件对三幅干涉强度分布图进行处理,在三幅干涉强度分布图中,分别提取如图3a所示的圆上点所在位置处的光强,并在极化坐标系中同时显示提取的三组光强信息,得到如图3b所示的光强分布图像,通过将光强极值点(即图3b中的A、B、C三点)所在位置设置为指针,并通过程序分别对波长 λ_1 和波长 λ_2 情况下,位移后与位移前图像指针夹角的角度进行提取,如图3c所示,可以获得在波长 λ_1 和波长 λ_2 情况下干涉强度分布图像的相对旋转角度 $\Delta\theta_{11}$ 和 $\Delta\theta_{22}$ 的角度信息。

[0102] 在本实施例中,通过图3c可以读取得出波长 λ_1 和波长 λ_2 情况下的相对旋转角度 $\Delta\theta_{11}$ 和 $\Delta\theta_{22}$ 的角度分别为 57.44° 和 39.75° ,对应的弧度为 $\frac{57.44^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi$ 和 $\frac{39.75^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi$ 。

[0103] 3、将 $\Delta\theta_{11} = \frac{57.44^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi$ 、 $\Delta\theta_{22} = \frac{39.75^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi$ 、 $\lambda_1 = 633\text{nm}$ 、 $\lambda_2 = 643\text{nm}$ 代入下式可以求得 $n=3$ 。

$$[0104] \quad n = \begin{cases} \frac{\Delta\theta_{11} \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} > \Delta\theta_{22} \\ \frac{(\Delta\theta_{11} + 2\pi) \times \lambda_1 - \Delta\theta_{22} \times \lambda_2}{2\pi \times (\lambda_2 - \lambda_1)}, & \Delta\theta_{11} < \Delta\theta_{22} \end{cases}$$

[0105] 4、将 $n=3$ 代入 $\Delta\theta_2 = 2\pi n + \Delta\theta_{22}$ 中，可以求得在波长为643nm时，干涉图样的全行程旋转角 $\Delta\theta_2 = 6\pi + \frac{39.75^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi$ 。

[0106] 5、将 $\Delta\theta_2 = 6\pi + \frac{39.75^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi$ 代入 $Z = \frac{\lambda_2}{2\pi} \Delta\theta_2$ 中，求得 $Z = 1999.99792\text{nm}$ ，与设置值2000nm误差小于2.1皮米。

[0107] 综上可知，本发明提供的基于双波长涡旋光自共轭干涉的大量程皮米级位移测量即方法可以实现皮米级的超高精度皮米级位移测量。

[0108] 对所公开的实施例的上述说明，使本领域专业技术人员能够实现或使用本发明。对这些实施例的多种修改对本领域的专业技术人员来说将是显而易见的，本文中所定义的一般原理可以在不脱离本发明的精神或范围的情况下，在其它实施例中实现。因此，本发明将不会被限制于本文所示的这些实施例，而是要符合与本文所公开的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

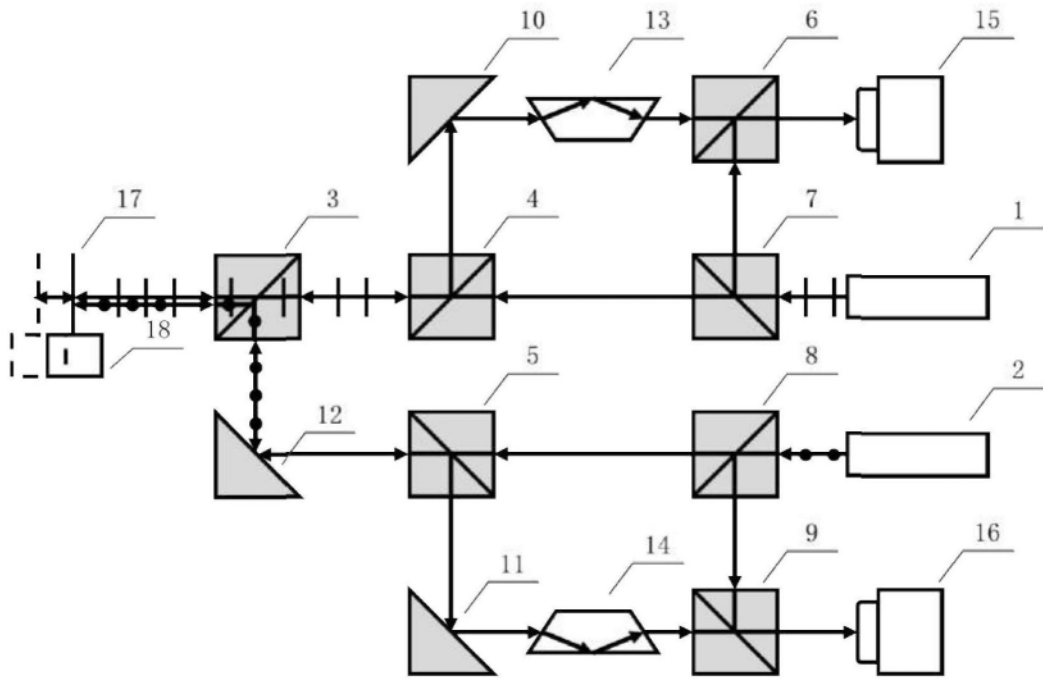


图1

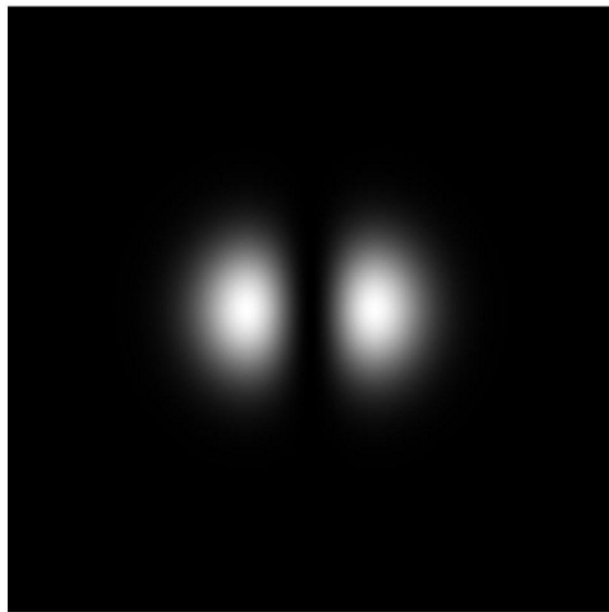


图2a

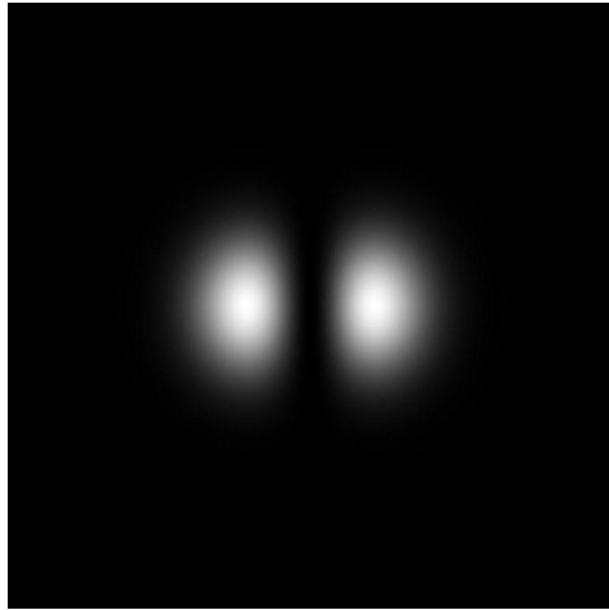


图2b



图2c

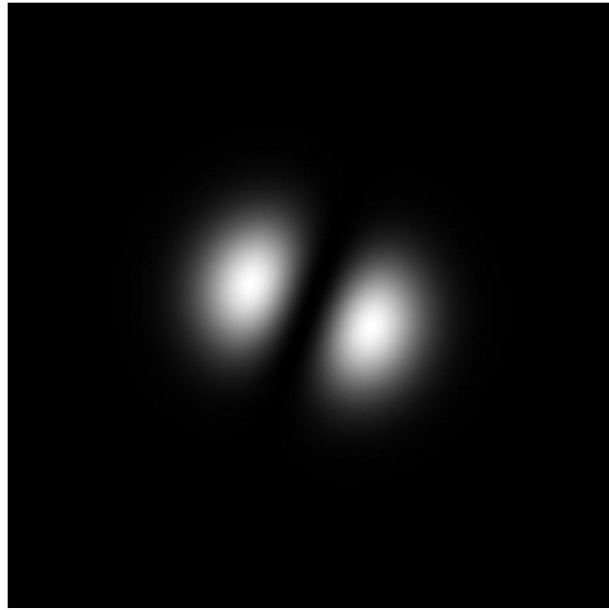


图2d

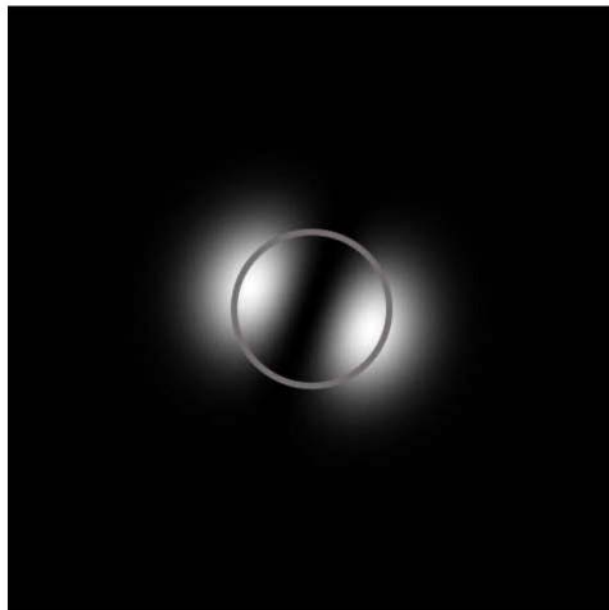


图3a

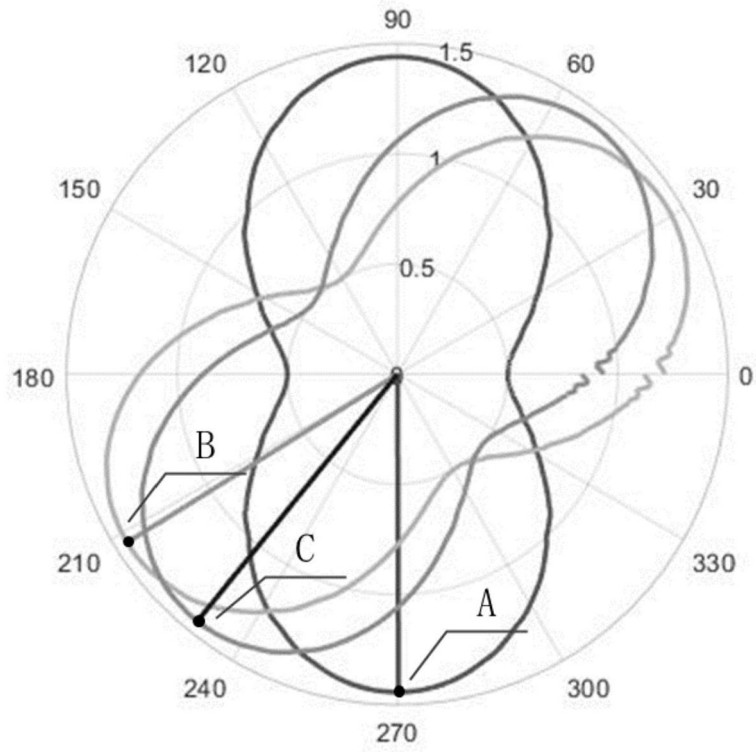


图3b

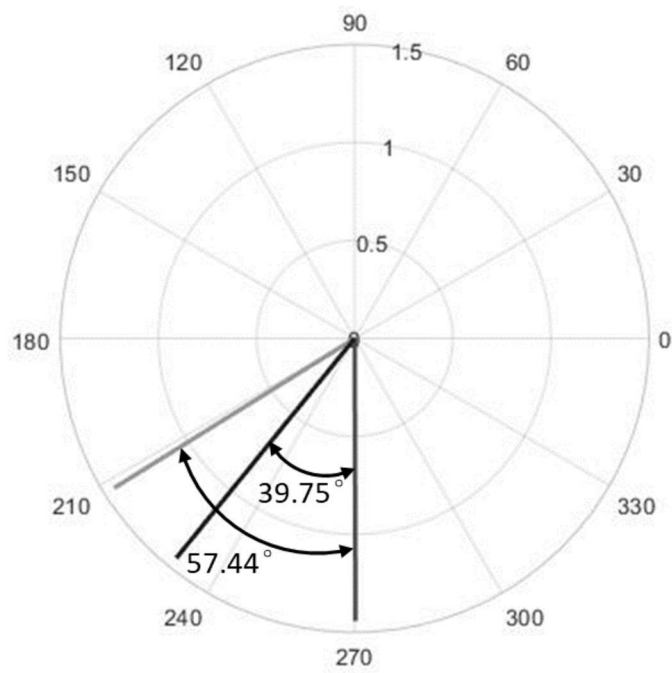


图3c

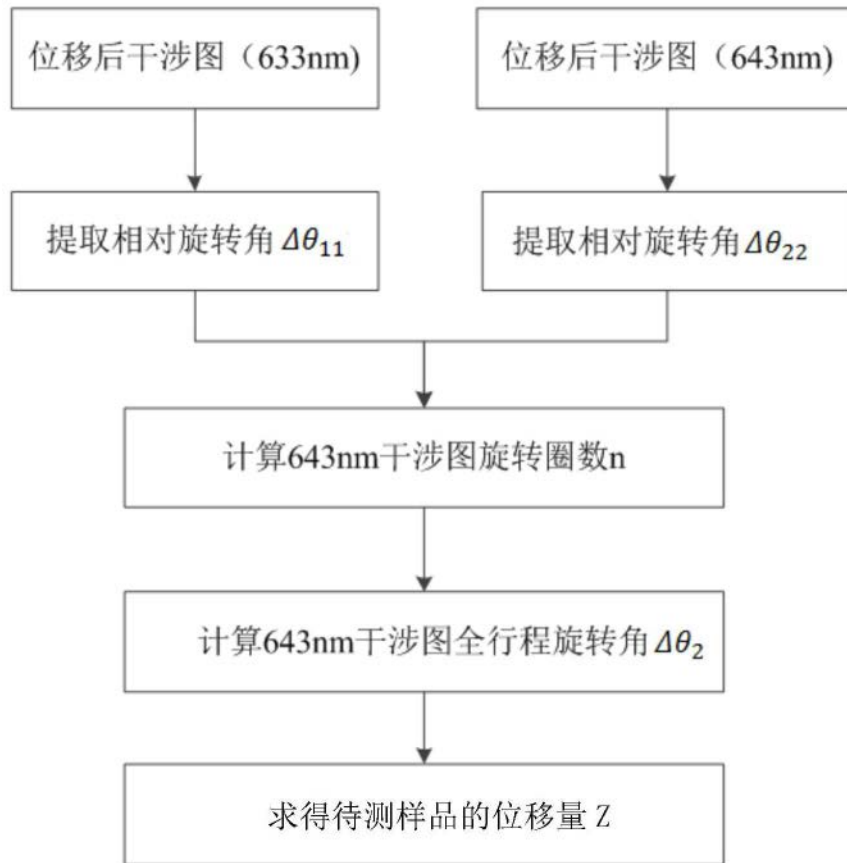


图4