



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109163662 A

(43)申请公布日 2019.01.08

(21)申请号 201811013535.7

(22)申请日 2018.08.31

(71)申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72)发明人 段发阶 傅骁 黄婷婷 马凌

张聪 程沁蕊

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 刘国威

(51) Int. Cl.

G01B 11/02(2006.01)

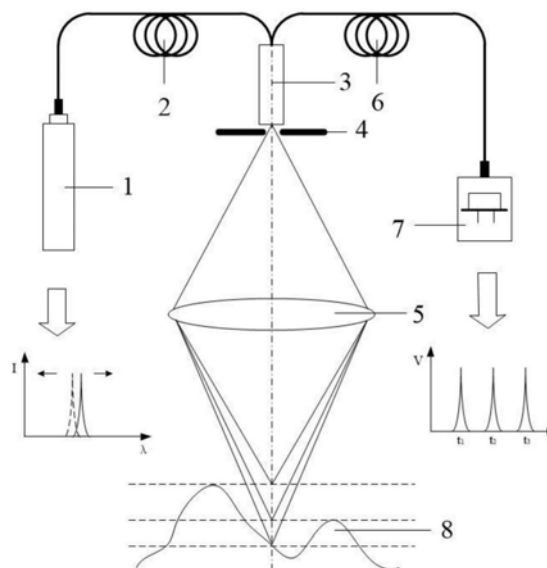
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

## (54)发明名称

基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法及装置

## (57)摘要

本发明属于光电测量领域,为实现非接触位移精密测量,同时测量精度高、快速、易操作,本发明,一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量装置,包括如下部分:波长扫描光源、输入光纤、光纤耦合器、针孔、色散物镜、输出光纤、光电探测器,波长扫描光源输出单色光,波长在上下限波长范围内来回扫描,光源发出的单色光耦合进输入光纤,输入光纤接入光纤耦合器,光纤耦合器输出至针孔形成点光源,单色光通过色散物镜汇聚至光轴上某一焦点处,在波长扫描过程中不同波长的单色光可形成一系列焦点,在特定时刻,某单色光的焦点恰好与待测表面重合,焦点处的反射光经光电探测器转换为电压信号。本发明主要应用于光电测量场合。



1. 一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法,其特征是,步骤如下:

(1) 根据激光光源的波长扫描范围和色散物镜的曲率半径、折射率确定位移测量范围,并将待测表面置于该测量范围内,扫描下限波长为 $\lambda_l$ ,上限波长为 $\lambda_h$ ,对应的色散物镜折射率分别为 $n(\lambda_l)$ 和 $n(\lambda_h)$ ,色散物镜曲率半径为 $r$ ,根据物像位置公式

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{2(n(\lambda)-1)}{r}$$

式中, $l'$ 和 $l$ 分别为像距和物距, $n(\lambda)$ 为随波长变化的折射率,当物距即针孔与色散物镜距离已知时,即 $l=l_0$ ,此时得出测量的下限位置和上限位置分别为

$$l'_l = \frac{rl_0}{2l_0(n(\lambda_l)-1)+r}$$

$$l'_h = \frac{rl_0}{2l_0(n(\lambda_h)-1)+r}$$

(2) 打开光源,使输出单色光波长在上下限波长范围内来回扫描,光源发出的光直接耦合进输入光纤,输入光纤接入光纤耦合器,光纤耦合器输出至针孔形成点光源,单色光通过色散物镜汇聚至光轴上某一焦点处,在波长扫描过程中不同波长的单色光形成一系列焦点;

(3) 在特定时刻 $t$ ,某单色光 $\lambda_t$ 的焦点恰好与待测表面重合,此时根据光路可逆,焦点处的反射光经色散物镜、针孔再次返回光纤耦合器,并由输出光纤传至光电探测器,由于光电探测器能够将光强信号按比例转换为电压信号,而光强信号由特定时刻波长 $\lambda_t$ 和待测表面位置 $l'$ 决定,即

$$V(l') \propto I(l') = \left[ \frac{\sin\left(\frac{u}{2}\right)}{\frac{u}{2}} \right]^2, u = \frac{2\pi}{\lambda_t} NA^2 l'$$

式中, $NA$ 为色散物镜的数值孔径,波长扫描过程中,时刻 $t$ 已知,该时刻波长 $\lambda_t$ 可根据扫描速度 $v$ 、时刻 $t$ 和初始波长 $\lambda_0$ 求出,即

$$\lambda_t = \lambda_0 + vt$$

当单色光焦点与待测表面不重合时,光电探测器输出电压 $V$ 较弱,随着焦点与待测表面的靠近,电压迅速提高,当单色光焦点与待测表面重合时,光电探测器输出电压出现峰值,因此,利用光电探测器可测得电压信号的最大值 $V_{\max}$ 以及最大值时刻 $t_{v\max}$ ,再计算该时刻扫描波长 $\lambda_{tv\max}$ ,即求出待测表面位置 $l'$ 。

2. 一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量装置,其特征是,包括如下部分:波长扫描光源、输入光纤、光纤耦合器、针孔、色散物镜、输出光纤、光电探测器,波长扫描光源输出单色光,波长在上下限波长范围内来回扫描,光源发出的单色光耦合进输入光纤,输入光纤接入光纤耦合器,光纤耦合器输出至针孔形成点光源,单色光通过色散物镜汇聚至光轴上某一焦点处,在波长扫描过程中不同波长的单色光可形成一系列焦点,在特定时刻,某单色光的焦点恰好与待测表面重合,此时根据光路可逆,焦点处的反射光经色散物镜、针孔再次返回光纤耦合器,并由输出光纤传至光电探测器,光电探测器将光强信号转换为电压信号,通过测量电压、时刻数值,进一步解算即得到待测表面位置。

3. 如权利要求1所述的基于波长扫描的光谱共焦位移测量装置,其特征是,光电探测器

为光电二极管、光电三极管或光电倍增管。

## 基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明属于光电测量领域,特别是一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法及装置。

### 背景技术

[0002] 随着先进制造业的发展,精密位移测量需求日益增加。位移测量技术常用于振动、形貌、厚度等几何量检测过程,不仅需要具有高精度,而且要求能适应不同环境和材料,并且逐步趋向于实时、无损检测。位移测量可分为接触式测量和非接触式测量,接触式位移测量虽然可以具有较高的测量精度,但存在诸多局限,如会对被测物体表面造成损伤;不适合测量表面精细的物体;当被测物为轻软质材料时,接触产生弹性变形,影响测量精度;测量速度慢,难以实现在线测量等。而非接触式位移测量则能够克服上述缺点,因而应用广泛。常见的非接触式位移测量包括电容式、电感式、光电式,其中电容式和电感式均要求被测物为导电材质,应用场景受限,而光电式则能够适用绝大多数测量场景,具有测量精度高、测量速度快、对被测物体材料要求低等优点。光电式位移测量技术又包括激光三角位移测量技术、光谱共焦位移测量技术等,其中光谱共焦位移测量技术作为一种新型位移测量技术,具有诸多优点,如分辨力高、抗干扰能力强、可测量透明物体厚度等,在微位移、微形变以及表面形貌扫描等方面有着广泛的应用前景。

[0003] 一般的光谱共焦技术原理为,利用白光源发出宽带光,经输入光纤、光纤耦合器和针孔出射,通过色散物镜组,由于折射率的差异,不同波长光聚焦后在光轴上焦点位置不同,在一定范围内形成波长-焦点组,当某波长焦点恰好位于待测表面时,其光斑面积达到最小,焦点处光强值达到最大,而其他波长光处于离焦状态,光斑较大,光强较小,此时根据光路可逆,焦点处的反射光经透镜组、针孔再次返回光纤耦合器,并由输出光纤接入光谱仪,光谱仪可测得光强最大的波长值,进而通过算法计算得到被测物位置。但是,这种常规的光谱共焦技术仍然存在缺陷,第一,由于宽带白光源功率有限(通常仅数十mW),平均到各个波长值则更小,导致接收信号的信噪比非常低;第二,由于测量系统必须使用光谱仪分光,而光谱仪一般采用光栅分光和阵列CCD传感器接收,其测量速度较慢,导致系统响应速度降低。

### 发明内容

[0004] 为克服现有技术的不足,本发明旨在提出位移测量方法及装置,实现非接触位移精密测量,同时测量精度高、快速、易操作。为此,本发明采用的技术方案是,基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法,步骤如下:

[0005] (1) 根据激光光源的波长扫描范围和色散物镜的曲率半径、折射率确定位移测量范围,并将待测表面置于该测量范围内,扫描下限波长为 $\lambda_1$ ,上限波长为 $\lambda_h$ ,对应的色散物镜折射率分别为 $n(\lambda_1)$ 和 $n(\lambda_h)$ ,色散物镜曲率半径为 $r$ ,根据物像位置公式

$$[0006] \quad \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{2(n(\lambda) - 1)}{r}$$

[0007] 式中,  $l'$  和  $l$  分别为像距和物距,  $n(\lambda)$  为随波长变化的折射率, 当物距即针孔与色散物镜距离已知时, 即  $l = l_0$ , 此时得出测量的下限位置和上限位置分别为

$$[0008] \quad l'_l = \frac{r l_0}{2l_0(n(\lambda_l) - 1) + r}$$

$$[0009] \quad l'_h = \frac{r l_0}{2l_0(n(\lambda_h) - 1) + r}$$

[0010] (2) 打开光源, 使输出单色光波长在上下限波长范围内来回扫描, 光源发出的光直接耦合进输入光纤, 输入光纤接入光纤耦合器, 光纤耦合器输出至针孔形成点光源, 单色光通过色散物镜汇聚至光轴上某一焦点处, 在波长扫描过程中不同波长的单色光形成一系列焦点;

[0011] (3) 在特定时刻  $t$ , 某单色光  $\lambda_t$  的焦点恰好与待测表面重合, 此时根据光路可逆, 焦点处的反射光经色散物镜、针孔再次返回光纤耦合器, 并由输出光纤传至光电探测器, 由于光电探测器能够将光强信号按比例转换为电压信号, 而光强信号由特定时刻波长  $\lambda_t$  和待测表面位置  $l'$  决定, 即

$$[0012] \quad V(l') \propto I(l') = \left[ \frac{\sin\left(\frac{u}{2}\right)}{\frac{u}{2}} \right]^2, u = \frac{2\pi}{\lambda_t} NA^2 l'$$

[0013] 式中,  $NA$  为色散物镜的数值孔径, 波长扫描过程中, 时刻  $t$  已知, 该时刻波长  $\lambda_t$  可根据扫描速度  $v$ 、时刻  $t$  和初始波长  $\lambda_0$  求出, 即

$$[0014] \quad \lambda_t = \lambda_0 + vt$$

[0015] 当单色光焦点与待测表面不重合时, 光电探测器输出电压  $V$  较弱, 随着焦点与待测表面的靠近, 电压迅速提高, 当单色光焦点与待测表面重合时, 光电探测器输出电压出现峰值, 因此, 利用光电探测器可测得电压信号的最大值  $V_{\max}$  以及最大值时刻  $t_{v\max}$ , 再计算该时刻扫描波长  $\lambda_{t_{v\max}}$ , 即求出待测表面位置  $l'$ 。

[0016] 一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量装置, 包括如下部分: 波长扫描光源、输入光纤、光纤耦合器、针孔、色散物镜、输出光纤、光电探测器, 波长扫描光源输出单色光, 波长在上下限波长范围内来回扫描, 光源发出的单色光耦合进输入光纤, 输入光纤接入光纤耦合器, 光纤耦合器输出至针孔形成点光源, 单色光通过色散物镜汇聚至光轴上某一焦点处, 在波长扫描过程中不同波长的单色光可形成一系列焦点, 在特定时刻, 某单色光的焦点恰好与待测表面重合, 此时根据光路可逆, 焦点处的反射光经色散物镜、针孔再次返回光纤耦合器, 并由输出光纤传至光电探测器, 光电探测器将光强信号转换为电压信号, 通过测量电压、时刻数值, 进一步解算即得到待测表面位置。

[0017] 光电探测器为光电二极管、光电三极管或光电倍增管。

[0018] 本发明的特点及有益效果是:

[0019] (1) 本发明改进了常规的光谱共焦发射光路, 用波长扫描光源代替了宽带白光光源, 克服了传统光谱共焦技术反射光强弱、信噪比差的缺点, 显著提高单个波长的输出光强, 提高了接收信号的信噪比, 尤其在某些反射效果差的待测表面位移测量中效果显著, 使测量系统的抗干扰能力得到极大提高, 增强了光谱共焦位移测量方法及装置的适用性与可靠性。

[0020] (2) 本发明改进了常规的光谱共焦接收光路,用光电探测器代替了光谱仪,克服了传统光谱共焦技术测量速度慢、分光系统复杂的缺点,大大简化了接收端测量光路,将空间分光转化为时间分光,以高速高灵敏的单个光电传感器代替了庞大的光谱仪分光系统,显著提高输出信号的灵敏度和响应速度,降低了测量系统的复杂程度,同时有利于实现测量装置的小型化、便携化。

#### 附图说明:

[0021] 图1示出本发明基于波长扫描的光谱共焦位移测量原理示意图。

[0022] 图1中:1为波长扫描光源,2为输入光纤,3为光纤耦合器,4为针孔,5为色散物镜,6为输出光纤,7为光电探测器,8为待测表面。

#### 具体实施方式

[0023] 本发明的目的是提供一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法及装置,采用波长扫描光源、光电探测器等改进常规的光谱共焦测量技术,实现非接触位移精密测量。解决现有光谱共焦技术信噪比低、测量速度慢的问题,提供一种高精度、快速、易操作的位移测量方法与装置。

[0024] 为克服现有技术的不足,一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法,包括以下步骤:

[0025] (1) 根据光源(激光器)的波长扫描范围和色散物镜的曲率半径、折射率确定位移测量范围,并将待测表面置于该测量范围内。假设扫描下限波长为 $\lambda_1$ ,上限波长为 $\lambda_h$ ,对应的色散物镜折射率分别为 $n(\lambda_1)$ 和 $n(\lambda_h)$ ,色散物镜曲率半径为 $r$ ,根据物像位置公式

$$[0026] \quad \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{2(n(\lambda)-1)}{r}$$

[0027] 式中, $l'$ 和 $l$ 分别为像距和物距, $n(\lambda)$ 为随波长变化的折射率,当物距(针孔与色散物镜距离)已知时,即 $l=l_0$ ,此时可得出测量的下限位置和上限位置分别为

$$[0028] \quad l'_i = \frac{rl_0}{2l_0(n(\lambda_i)-1)+r}$$

$$[0029] \quad l'_h = \frac{rl_0}{2l_0(n(\lambda_h)-1)+r}$$

[0030] (2) 打开光源,使输出单色光波长在上下限波长范围内来回扫描,光源发出的光直接耦合进输入光纤,输入光纤接入光纤耦合器,光纤耦合器输出至针孔形成点光源,单色光通过色散物镜汇聚至光轴上某一焦点处,在波长扫描过程中不同波长的单色光可形成一系列焦点;

[0031] (3) 在特定时刻 $t$ ,某单色光 $\lambda_t$ 的焦点恰好与待测表面重合,此时根据光路可逆,焦点处的反射光经色散物镜、针孔再次返回光纤耦合器,并由输出光纤传至光电探测器,由于光电探测器能够将光强信号按比例转换为电压信号,而光强信号由特定时刻波长 $\lambda_t$ 和待测表面位置 $l'$ 决定,即

$$[0032] \quad V(l') \propto I(l') = \left[ \frac{\sin\left(\frac{u}{2}\right)}{\frac{u}{2}} \right]^2, u = \frac{2\pi}{\lambda_t} NA^2 l'$$

[0033] 式中,NA为色散物镜的数值孔径。波长扫描过程中,时刻 $t$ 已知,该时刻波长 $\lambda_t$ 可根据扫描速度 $v$ 、时刻 $t$ 和初始波长 $\lambda_0$ 求出,即

$$[0034] \quad \lambda_t = \lambda_0 + vt$$

[0035] 当单色光离焦(焦点与待测表面不重合)时,光电探测器输出电压 $V$ 较弱,随着焦点与待测表面的靠近,电压迅速提高,当单色光聚焦(焦点与待测表面重合)时,光电探测器输出电压出现峰值。因此,利用光电探测器可测得电压信号的最大值 $V_{\max}$ 以及最大值时刻 $t_{\max}$ ,再计算该时刻扫描波长 $\lambda_{t_{\max}}$ ,即可求出待测表面位置 $l'$ 。

[0036] 一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量装置,包括如下部分:波长扫描光源、输入光纤、光纤耦合器、针孔、色散物镜、输出光纤、光电探测器。波长扫描光源输出单色光,波长在上下限波长范围内来回扫描,光源发出的单色光耦合进输入光纤,输入光纤接入光纤耦合器,光纤耦合器输出至针孔形成点光源,单色光通过色散物镜汇聚至光轴上某一焦点处,在波长扫描过程中不同波长的单色光可形成一系列焦点,在特定时刻,某单色光的焦点恰好与待测表面重合,此时根据光路可逆,焦点处的反射光经色散物镜、针孔再次返回光纤耦合器,并由输出光纤传至光电探测器(可为光电二极管、光电三极管、光电倍增管等),光电探测器将光强信号转换为电压信号,通过测量电压、时刻数值,进一步解算即可得到待测表面位置。

[0037] 下面结合具体实例进一步详细说明本发明。

[0038] 一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量方法,包括以下步骤:

[0039] (1) 根据波长扫描光源1的波长扫描范围和色散物镜5的曲率半径、折射率确定位移测量范围,并将待测表面8置于该测量范围内。假设扫描下限波长为 $\lambda_1$ ,上限波长为 $\lambda_h$ ,对应的色散物镜折射率分别为 $n(\lambda_1)$ 和 $n(\lambda_h)$ ,色散物镜5曲率半径为 $r$ ,根据物像位置公式

$$[0040] \quad \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{2(n(\lambda) - 1)}{r}$$

[0041] 式中, $l'$ 和 $l$ 分别为像距和物距, $n(\lambda)$ 为随波长变化的折射率,当物距(针孔与色散物镜距离)已知时,即 $l = l_0$ ,此时可得出测量的下限位置和上限位置分别为

$$[0042] \quad l'_i = \frac{r l_0}{2l_0(n(\lambda_i) - 1) + r}$$

$$[0043] \quad l'_h = \frac{r l_0}{2l_0(n(\lambda_h) - 1) + r}$$

[0044] (2) 打开波长扫描光源1,使输出单色光波长在上下限波长范围内来回扫描,光源发出的光直接耦合进输入光纤2,输入光纤2接入光纤耦合器3,光纤耦合器3输出至针孔4形成点光源,单色光通过色散物镜5汇聚至光轴上某一焦点处,在波长扫描过程中不同波长的单色光可形成一系列焦点;

[0045] (3) 在特定时刻 $t$ ,某单色光 $\lambda_t$ 的焦点恰好与待测表面8重合,此时根据光路可逆,焦点处的反射光经色散物镜5、针孔4再次返回光纤耦合器3,并由输出光纤6传至光电探测器7,由于光电探测器7能够将光强信号按比例转换为电压信号,而光强信号由特定时刻波长 $\lambda_t$ 和待测表面位置 $l'$ 决定,即

$$[0046] \quad V(l') \propto I(l') = \left[ \frac{\sin\left(\frac{u}{2}\right)}{\frac{u}{2}} \right]^2, u = \frac{2\pi}{\lambda_t} NA^2 l'$$

[0047] 式中,NA为色散物镜5的数值孔径。波长扫描过程中,时刻 $t$ 已知,该时刻波长 $\lambda_t$ 可根据扫描速度 $v$ 、时刻 $t$ 和初始波长 $\lambda_0$ 求出,即

$$[0048] \quad \lambda_t = \lambda_0 + vt$$

[0049] 当单色光离焦(焦点与待测表面不重合)时,光电探测器输出电压 $V$ 较弱,随着焦点与待测表面的靠近,电压迅速提高,当单色光聚焦(焦点与待测表面重合)时,光电探测器输出电压出现峰值。因此,利用光电探测器可测得电压信号的最大值 $V_{\max}$ 以及最大值时刻 $t_{V_{\max}}$ ,再计算该时刻扫描波长 $\lambda_{t_{V_{\max}}}$ ,即可求出待测表面位置 $l'$ 。

[0050] 一种基于波长扫描的光谱共焦位移测量装置,包括如下部分:波长扫描光源1、输入光纤2、光纤耦合器3、针孔4、色散物镜5、输出光纤6、光电探测器7。波长扫描光源1输出单色光,波长在上下限波长范围内来回扫描,光源发出的单色光耦合进输入光纤2,输入光纤2接入光纤耦合器3,光纤耦合器3输出至针孔4形成点光源,单色光通过色散物镜5汇聚至光轴上某一焦点处,在波长扫描过程中不同波长的单色光可形成一系列焦点,在特定时刻,某单色光的焦点恰好与待测表面8重合,此时根据光路可逆,焦点处的反射光经色散物镜5、针孔4再次返回光纤耦合器3,并由输出光纤6传至光电探测器7(可为光电二极管、光电三极管、光电倍增管等),光电探测器7将光强信号转换为电压信号,通过测量电压、时刻数值,进一步解算即可得到待测表面位置。



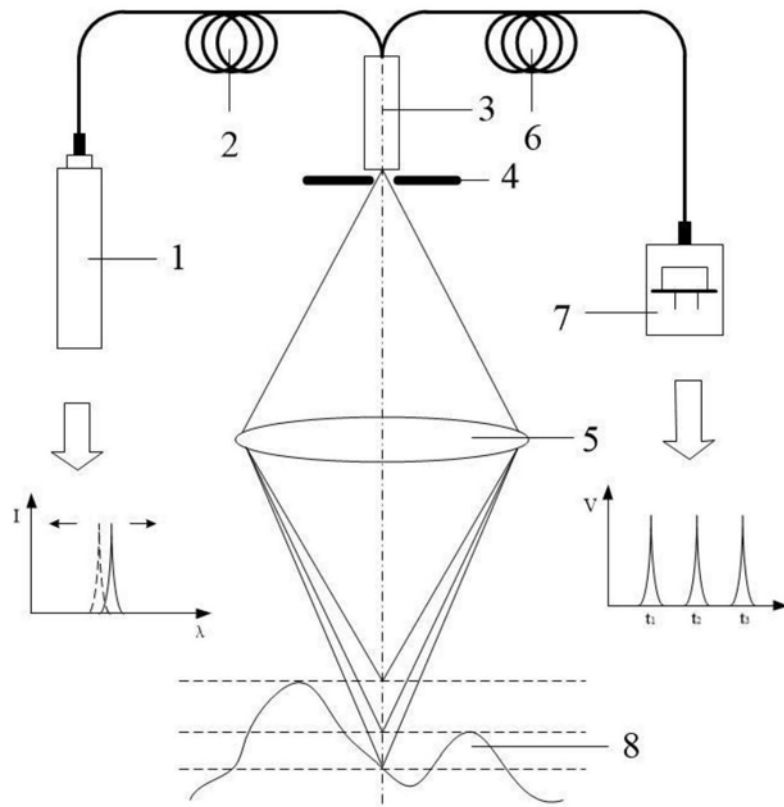


图1