



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109856112 A

(43)申请公布日 2019.06.07

(21)申请号 201711242905.X

(22)申请日 2017.11.30

(71)申请人 中国科学院大连化学物理研究所
地址 116000 辽宁省大连市沙河口区中山
路457号

(72)发明人 夏栩笙 刘金波 郭敬为 袁红
桑凤亭

(74)专利代理机构 大连东方专利代理有限责任
公司 21212
代理人 王丹 李洪福

(51)Int.Cl.
G01N 21/65(2006.01)

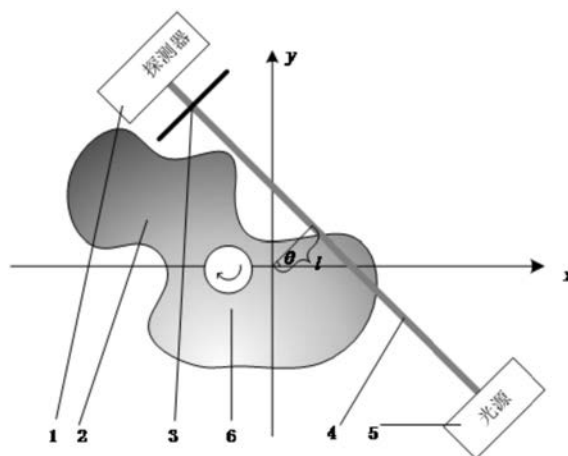
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

一种基于CARS的断层扫描成像装置、检测系
统及方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于CARS的断层扫描成像装置、检测系统及方法,其包括:探测光源,其输出由泵浦光及斯托克斯光所合成的探测激光光束;待测样品承载台;光学机械装置,其使得光束穿过待测样品时改变光束到坐标原点距离 l 和入射角 θ ;滤光片,以滤除泵浦光以及斯托克斯光;以及探测器以对待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测;其中,光束探测激光光束穿过待测样品,基于待测样品的三阶非线性效应所产生相干反斯托克斯拉曼散射光,经由滤光片滤除混杂于相干反斯托克斯拉曼散射光中的泵浦光以及斯托克斯光后,由探测器进行检测。本发明解决了已有技术不能满足对稳定分布物种浓度、温度场等信息进行大范围断层扫描等使用需求的缺陷。



1. 一种基于CARS的断层扫描成像装置,其特征在于,包括:

探测光源,其用以输出由泵浦光以及斯托克斯光所合成的探测激光光束;

待测样品承载台;

光学机械装置,其用以使得所述探测激光光束穿过承载于其上的待测样品时能够改变光束到座标原点距离 l 和入射角 θ ;

滤光片,其用以滤除泵浦光以及斯托克斯光;

以及探测器,其用以对待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测;

其中,所述探测激光光束穿过待测样品,基于待测样品的三阶非线性效应所产生相干反斯托克斯拉曼散射光,经由滤光片滤除混杂于相干反斯托克斯拉曼散射光中的泵浦光以及斯托克斯光后,由探测器对待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测。

2. 根据权利要求1所述的基于CARS的断层扫描成像装置,其特征在于:

所述探测激光光束依据待测样品所对应的拉曼频移设置泵浦光以及斯托克斯光之间的频率差。

3. 根据权利要求1或者2所述的基于CARS的断层扫描成像装置,其特征在于:

所述装置依据检测需求设置探测激光光束以及探测器类型;若检测温度断层扫描参数则所述探测激光光束选择宽带激光光束,同时所述探测器选择光谱仪光纤;若检测样品浓度分布扫描参数则所述探测激光光束选择窄带激光光束,同时所述探测器选择Pin管。

4. 根据权利要求3所述的基于CARS的断层扫描成像装置,其特征在于:

所述装置还包括数据分析器,其用以依据探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号分析获得待测样品各断层所对应的样品浓度分布扫描参数或者温度断层扫描参数。

5. 根据权利要求4所述的基于CARS的断层扫描成像装置,其特征在于:

所述物种浓度分布扫描参数的分析过程为:若假定所述Pin管所检测到相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度为 I ,泵浦光信号强度为 I_p ,斯托克斯光信号强度为 I_s ;待测样品的浓度为 f ,则依据非线性光学的理论,上述物理量对应的关系为 $f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}, I = \frac{f^2 I_s I_p^2}{k^2}$,其中,

比例系数 k 通过测已知浓度的被测样品进行标定,对应的样品浓度分布扫描参数即样品浓度场为非均匀场 $f(x, y)$,对应的样品中各处产生相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度也是

非均匀场,表示为 $I(x, y) = \frac{[f(x, y)]^2 I_s I_p^2}{k^2}$ (1);

自上述公式(1)可知,鉴于探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号的电流强度反映的是 $I(x, y)$ 沿着光线的积分值,则引入Radon变换进行求解,即若探测激光光束的入射光线到光轴座标原点距离和入射角分别为 l 和 θ ,入射光线所在的直线为 L ,则 $I(x, y)$ 对应的Radon变换是如下式(2)所示函数 $\mathcal{R}I(l, \theta)$:

$$(\mathcal{R}I)(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL \quad (2)$$

则公式(2)对应的傅里叶变换与和 $I(x, y)$ 的傅里叶变换存在如下关系:

$$\mathcal{F}_l[\mathcal{R}I(l, \theta)] = \tilde{I}(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}(k_x, k_y)$$

式中 \mathcal{F}_l 为对入射光线到座标原点距离 l 作傅立叶变换, \tilde{I} 表示 $I(x, y)$ 的傅里叶变换

$\tilde{I}(k_x, k_y)$;

最后通过光学机械装置不断改变光束到座标原点距离 l 和入射角 θ , 遍历所有可能的值, 以获得全部 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

对所述 $\tilde{I}(k_x, k_y)$ 作逆傅里叶变换求出对应的 $I(x, y)$ 后, 基于 $f = \frac{k}{l_p} \sqrt{\frac{l}{l_s}}$ 求出待测样品各断层所对应的样品浓度分布扫描参数 $f(x, y)$ 。

6. 根据权利要求4所述的基于CARS的断层扫描成像装置, 其特征在于:

所述温度断层扫描参数的分析过程为:

首先通过光谱仪光纤探测待测样品中多个转动能级的粒子分布构成的连续转动光谱 P 支光谱以及 Q 支光谱所构成的函数 $I_\lambda(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL$, 并通过光学机械装置遍历 l 和 θ ; 其中下标 λ 表示波长为 λ 的光谱线在光谱仪上的积分;

其次依据所述 P 支光谱和 Q 支光谱计算对应的温度, 所述计算过程为

对 $I_\lambda(l, \theta)$ 中的 l 作傅里叶变换, 得到

$$\mathcal{F}_l[I_\lambda(l, \theta)] = \tilde{I}_\lambda(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)$$

再对 k_x, k_y 分别作傅里叶逆变换, 得到

$$\mathcal{F}_{k_x} \mathcal{F}_{k_y}[\tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)] = I_\lambda(x, y)$$

最后根据光谱分布函数 $I_\lambda(x, y)$ 求解出温度分布函数 $T(x, y)$ 。

7. 一种基于CARS的断层扫描成像的检测系统, 其包括权利要求1-6任意一项所述的断层扫描成像装置。

8. 一种基于CARS的断层扫描成像的检测方法, 其基于上述权利要求1-6任意一项所述的CARS的断层扫描成像装置进行检测, 具体包括如下步骤:

步骤1、将待测样品装入待测样品承载台中;

步骤2、基于待测样品所对应的拉曼频移数据设置探测光源;

步骤3、通过探测器、光学机械装置使得激光光束进入样品时在某一座标原点距离 l 和某一入射角 θ 条件下待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测;

步骤4、通过光学机械装置依次改变光光束到座标原点距离和入射角获得全部检测数据;

步骤5、依据探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号分析获得待测样品断层所对应的样品浓度分布扫描参数或者温度断层扫描参数。

9. 根据权利要求8所述的基于CARS的断层扫描成像的检测方法, 其特征在于:

所述探测激光光束依据待测样品所对应的拉曼频移设置泵浦光以及斯托克斯光之间的频率差且依据待测样品检测需求设置探测激光光束以及探测器类型; 若检测温度断层扫描参数则所述探测激光光束选择宽带激光光束, 同时所述探测器选择光谱仪光纤; 若检测样品浓度分布扫描参数则所述探测激光光束选择窄带激光光束, 同时所述探测器选择Pin管。

10. 根据权利要求8所述的基于CARS的断层扫描成像的检测方法, 其特征在于:

所述物种浓度分布扫描参数的分析过程为: 若假定所述Pin管所检测到相干反斯托克

斯拉曼散射光信号强度为 I , 泵浦光信号强度为 I_p , 斯托克斯光信号强度为 I_s ; 待测样品的浓度为 f , 则依据非线性光学的理论, 上述物理量对应的关系为 $f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}$, $I = \frac{f^2 I_s I_p^2}{k^2}$, 其中, 比例系数 k 通过测已知浓度的被测样品进行标定, 对应的样品浓度分布扫描参数即样品浓度场为非均匀场 $f(x, y)$, 对应的样品中各处产生相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度也是非均匀场, 表示为 $I(x, y) = \frac{[f(x, y)]^2 I_s I_p^2}{k^2}$ (1);

自上述公式(1)可知, 鉴于探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号的电流强度反映的是 $I(x, y)$ 沿着光线的积分值, 则引入Radon变换进行求解, 即若探测激光光束的入射光线到光轴坐标原点距离和入射角分别为 l 和 θ , 入射光线所在的直线为 L , 则 $I(x, y)$ 对应的Radon变换式如下式(2)所示函数 $\mathcal{R}I(l, \theta)$:

$$(\mathcal{R}I)(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL \quad (2)$$

则公式(2)对应的傅里叶变换与和 $I(x, y)$ 的傅里叶变换存在如下关系:

$$\mathcal{F}_l[\mathcal{R}I(l, \theta)] = \tilde{I}(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}(k_x, k_y)$$

式中 \mathcal{F}_l 为对入射光线到坐标原点距离 l 作傅立叶变换, \tilde{I} 表示 $I(x, y)$ 的傅里叶变换 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

最后通过光学机械装置不断改变光束到坐标原点距离 l 和入射角 θ 以获得全部 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

对所述 $\tilde{I}(k_x, k_y)$ 作逆傅里叶变换求出对应的 $I(x, y)$ 后, 基于 $f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}$ 求出待测样品各断层所对应的样品浓度分布扫描参数 $f(x, y)$;

所述温度断层扫描参数的分析过程为:

首先通过光谱仪光纤探测待测样品中多个转动能级的粒子分布构成的连续转动光谱 P 支光谱以及 Q 支光谱所构成的函数 $I_\lambda(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL$, 并通过光学机械装置遍历 l 和 θ ; 其中下标 λ 表示波长为 λ 的光谱线在光谱仪上的积分;

其次依据所述 P 支光谱和 Q 支光谱计算对应的温度, 所述计算过程为

对 $I_\lambda(l, \theta)$ 中的 l 作傅里叶变换, 得到

$$\mathcal{F}_l[I_\lambda(l, \theta)] = \tilde{I}_\lambda(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)$$

再对 k_x, k_y 分别作傅里叶逆变换, 得到

$$\mathcal{F}_{k_x} \mathcal{F}_{k_y}[\tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)] = I_\lambda(x, y)$$

最后根据光谱分布函数 $I_\lambda(x, y)$ 求解出温度分布函数 $T(x, y)$ 。

一种基于CARS的断层扫描成像装置、检测系统及方法

技术领域

[0001] 本发明属于激光光谱技术领域，具体涉及一种基于CARS的断层扫描成像装置、检测系统及方法。

背景技术

[0002] CARS (相干反斯托克斯拉曼散射) 光谱技术是一种三阶非线性激光光谱技术，利用分子的拉曼活性共振获取气态、液态和固态中分子的光谱信号。与普通的拉曼光谱技术相比，具有SN比高、信号不易受到荧光信号干扰的优点。但是目前的CARS技术的应用多注重一维、二维的成像。例如，探测均匀气体、液体中的物种浓度；或者利用CARS显微镜技术，通过扫描振镜的二维扫描快速取得样品的二维物种浓度分布；或者通过扫描获得火焰的二维温度场。但是上述技术尚不能满足对稳定分布物种浓度、温度场等信息进行断层扫描等使用需求。

发明内容

[0003] 鉴于已有技术不能满足对稳定分布物种浓度、温度场等信息进行断层扫描等使用需求的缺陷，本发明的目的是要提供一种基于CARS的断层扫描成像装置，其结合了相干反斯托克斯拉曼光谱技术和Radon变换技术来对样品进行断层扫描，以得到待测物种浓度和其温度的三维分布。

[0004] 为了实现上述目的，本发明的技术方案：

[0005] 一种基于CARS的断层扫描成像装置，其特征在于，包括：

[0006] 探测光源，其用以输出由泵浦光以及斯托克斯光所合成的探测激光光束；

[0007] 待测样品承载台；

[0008] 光学机械装置，其用以使得所述探测激光光束穿过承载于其上的待测样品时能够改变光束到座标原点距离 l 和入射角 θ ；

[0009] 滤光片，其用以滤除泵浦光以及斯托克斯光；

[0010] 以及探测器，其用以对待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测；

[0011] 其中，所述探测激光光束穿过待测样品，基于待测样品的三阶非线性效应所产生相干反斯托克斯拉曼散射光，经由滤光片滤除混杂于相干反斯托克斯拉曼散射光中的泵浦光以及斯托克斯光后，由探测器对待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测。

[0012] 基于上述方案，进一步优选的，

[0013] 所述探测激光光束依据待测样品所对应的拉曼频移设置泵浦光以及斯托克斯光之间的频率差。

[0014] 基于上述方案，进一步优选的，

[0015] 所述装置依据待测样品检测需求设置探测激光光束以及探测器类型；若检测温度

断层扫描参数则所述探测激光光束选择宽带激光光束,同时所述探测器选择光谱仪光纤;若检测样品浓度分布扫描参数则所述探测激光光束选择窄带激光光束,同时所述探测器选择Pin管。

[0016] 基于上述方案,进一步优选的,

[0017] 所述装置还包括数据分析器,其用以依据探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号分析获得待测样品各断层所对应的样品浓度分布扫描参数或者温度断层扫描参数。

[0018] 基于上述方案,进一步优选的,

[0019] 所述物种浓度分布扫描参数的分析过程为:若假定所述Pin管所检测到相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度为 I ,泵浦光信号强度为 I_p ,斯托克斯光信号强度为 I_s ;待测样品的浓度为 f ,则依据非线性光学的理论,上述物理量对应的关系为

$f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}$, $I = \frac{f^2 I_s I_p^2}{k^2}$,其中,比例系数 k 通过测已知浓度的被测样品进行标定,对应的样品浓度分布扫描参数即样品浓度场为非均匀场 $f(x, y)$,对应的样品中各处产生相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度也是非均匀场,表示为 $I(x, y) = \frac{[f(x, y)]^2 I_s I_p^2}{k^2}$ (1);

[0020] 自上述公式(1)可知,鉴于探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号的电流强度反映的是 $I(x, y)$ 沿着光线的积分值,则引入Radon变换进行求解,即若探测激光光束的入射光线到光轴座标原点距离和入射角分别为 l 和 θ ,入射光线所在的直线为 L ,则 $I(x, y)$ 对应的Radon变换式如下式(2)所示函数 $RI(l, \theta)$:

[0021] $(RI)(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL$ (2)

[0022] 则公式(2)对应的傅里叶变换与和 $I(x, y)$ 的傅里叶变换存在如下关系:

[0023] $\mathcal{F}_l[RI(l, \theta)] = \tilde{I}(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}(k_x, k_y)$

[0024] 式中 \mathcal{F}_l 为对入射光线到座标原点距离 l 作傅立叶变换, \tilde{I} 表示 $I(x, y)$ 的傅里叶变换 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0025] 最后通过光学机械装置不断改变光束到座标原点距离 l 和入射角 θ 以获得全部 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0026] 对所述 $\tilde{I}(k_x, k_y)$ 作逆傅里叶变换求出对应的 $I(x, y)$ 后,基于 $f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}$ 求出待测样品各断层所对应的样品浓度分布扫描参数 $f(x, y)$ 。

[0027] 基于上述方案,进一步优选的,

[0028] 所述温度断层扫描参数的分析过程为:

[0029] 首先通过光谱仪光纤探测待测样品中多个转动能级的粒子分布构成的连续转动光谱 P 支光谱以及 Q 支光谱所构成的函数 $I_\lambda(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL$,并通过光学机械装置遍历 l 和 θ ;其中下标 λ 表示波长为 λ 的光谱线在光谱仪上的积分;

[0030] 其次依据所述 P 支光谱和 Q 支光谱计算对应的温度,所述计算过程为

[0031] 对 $I_\lambda(l, \theta)$ 中的 l 作傅里叶变换,得到

[0032] $\mathcal{F}_l[I_\lambda(l, \theta)] = \tilde{I}_\lambda(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)$

[0033] 再对 k_x, k_y 分别作傅里叶逆变换,得到

[0034] $\mathcal{F}_{k_x} \mathcal{F}_{k_y}[\tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)] = I_\lambda(x, y)$

[0035] 最后根据光谱分布函数 $I_\lambda(x, y)$ 可以求解出温度分布函数 $T(x, y)$ 。

[0036] 发明的另一目的是要提供一种基于CARS的断层扫描成像的检测系统,其包括上述任意一项方案所述的CARS的断层扫描成像装置。

[0037] 发明的另一目的是要提供一种基于CARS的断层扫描成像的检测方法,其基于上述任意一项方案所述的CARS的断层扫描成像装置进行检测,其具体包括如下步骤:

[0038] 步骤1、将待测样品装入待测样品承载台中;

[0039] 步骤2、基于待测样品所对应的拉曼频移数据设置探测光源;

[0040] 步骤3、通过探测器、光学机械装置使得激光光束进入样品时在某一坐标原点距离1和某一入射角 θ 条件下待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测;

[0041] 步骤4、通过光学机械装置依次改变光光束到座标原点距离和入射角获得全部检测数据。

[0042] 所述方法还包括步骤5、依据探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号分析获得待测样品断层所对应的样品浓度分布扫描参数或者温度断层扫描参数。

[0043] 基于上述方案,进一步优选的,

[0044] 所述探测激光光束依据待测样品所对应的拉曼频移设置泵浦光以及斯托克斯光之间的频率差且依据待测样品检测需求设置探测激光光束以及探测器类型;若检测温度断层扫描参数则所述探测激光光束选择宽带激光光束,同时所述探测器选择光谱仪光纤;若检测样品浓度分布扫描参数则所述探测激光光束选择窄带激光光束,同时所述探测器选择Pin管。

[0045] 基于上述方案,进一步优选的,

[0046] 所述物种浓度分布扫描参数的分析过程为:若假定所述Pin管所检测到相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度为 I ,泵浦光信号强度为 I_p ,斯托克斯光信号强度为 I_s ;待测样品的浓度为 f ,则依据非线性光学的理论,上述物理量对应的关系为

$$f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}, \quad I = \frac{f^2 I_s I_p^2}{k^2}, \text{其中,比例系数} k \text{通过测已知浓度的被测样品进行标定,对应的}$$

样品浓度分布扫描参数即样品浓度场为非均匀场 $f(x, y)$,对应的样品中各处产生相干反斯

托克斯拉曼散射光信号强度也是非均匀场,表示为 $I(x, y) = \frac{[f(x, y)]^2 I_s I_p^2}{k^2} \quad (1)$;

[0047] 自上述公式(1)可知,鉴于探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号的电流强度反映的是 $I(x, y)$ 沿着光线的积分值,则引入Radon变换进行求解,即若探测激光光束的入射光线到光轴座标原点距离和入射角分别为1和 θ ,入射光线所在的直线为 L ,则 $I(x, y)$ 对应的Radon变换式如下式(2)所示函数 $\mathcal{R}I(l, \theta)$:

[0048] $(\mathcal{R}I)(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL \quad (2)$

[0049] 则公式(2)对应的傅里叶变换与和 $I(x, y)$ 的傅里叶变换存在如下关系:

[0050] $\mathcal{F}_l[RI(l, \theta)] = \tilde{I}(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta)$

[0051] 式中 \mathcal{F}_l 为对入射光线到座标原点距离 l 作傅立叶变换, \tilde{I} 表示 $I(x, y)$ 的傅里叶变换 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0052] 最后通过光学机械装置不断改变光束到座标原点距离 l 和入射角 θ 以获得全部 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0053] 对所述 $\tilde{I}(k_x, k_y)$ 作逆傅里叶变换求出对应的 $I(x, y)$ 后, 基于 $f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}$ 求出待测

样品各断层所对应的样品浓度分布扫描参数 $f(x, y)$;

[0054] 所述温度断层扫描参数的分析过程为:

[0055] 首先通过光谱仪光纤探测待测样品中多个转动能级的粒子分布构成的连续转动光谱即P支光谱以及Q支光谱;

[0056] 其次依据所述P支光谱和Q支光谱计算对应的温度, 所述计算过程为

[0057] 基于Radon变换原理获得待测样品中断层中CARS光谱分布函数 $I_\lambda(x, y)$, 且由于 I_λ 表示波长为 λ 的光谱线在光谱仪上的积分, 即

[0058] $I_\lambda = \int_L I_\lambda(x, y) dL$

[0059] 最后计算出温度断层扫描参数即温度分布 $T(x, y)$ 。首先通过光谱仪光纤探测待测样品中多个转动能级的粒子分布构成的连续转动光谱P支光谱以及Q支光谱所构成的函数 $I_\lambda(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL$, 并通过光学机械装置遍历 l 和 θ ; 其中下标 λ 表示波长为 λ 的光谱线在光谱仪上的积分;

[0060] 其次依据所述P支光谱和Q支光谱计算对应的温度, 所述计算过程为

[0061] 对 $I_\lambda(l, \theta)$ 中的 l 作傅里叶变换, 得到

[0062] $\mathcal{F}_l[I_\lambda(l, \theta)] = \tilde{I}_\lambda(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)$

[0063] 再对 k_x, k_y 分别作傅里叶逆变换, 得到

[0064] $\mathcal{F}_{k_x} \mathcal{F}_{k_y}[\tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)] = I_\lambda(x, y)$

[0065] 最后根据光谱分布函数 $I_\lambda(x, y)$ 可以求解出温度分布函数 $T(x, y)$ 。

[0066] 与现有技术相比, 本发明的有益效果:

[0067] 为了解决前述问题, 本发明结合了相干反斯托克斯拉曼光谱技术和Radon变换技术, 实现了对待测样品进行断层扫描并得到待测物种浓度和其温度的三维分布; 与普通的窄带CARS光谱技术相比, 其实现了测量样品内部的物种浓度分布并作断层扫描; 和共焦CARS显微镜技术相比, 其实现了对体积比较大的样品进行扫描, 并克服了共焦CARS显微镜技术探测深度所受到镜头焦深的限制; 因而可以说本发明扩展了CARS光谱技术的应用领域。

附图说明

[0068] 图1为本发明所述装置的原理结构示意图;

[0069] 图2为本发明所述装置-用于测量静态样品的优化结构示意图;

[0070] 图3为本发明所述装置-化工现场测量的优化结构示意图。

[0071] 图中:1-探测器,2-待测样品承载台,3-滤波片,4-激光光束,5-激光光源,6.光电机械装置,7-反射镜,8-产生稳定的部分预混层流火焰的化工反应器,9、光轴。

具体实施方式

[0072] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0073] 针对以上应用需求和目前技术的不足之处,本发明借鉴计算机断层扫描(CT)的概念,提出了一种基于CARS的断层扫描装置,以对具有稳定分布物种浓度、温度场等信息进行断层扫描,进而进行三维重建,所述断层扫描是利用探测激光光束与灵敏度极高的探测器以逐一改变方位即其与座标原点距离和入射角的方式对各个断面进行扫描;而这种三维重建在化工流体力学、航空发动机流场分析中十分具有应用潜力。

[0074] 基于上述设计目的,如图1所示原理:一种基于CARS的断层扫描成像装置,其特征在于,包括:探测光源5,其用以输出由泵浦光以及斯托克斯光所合成的探测激光光束4;待测样品承载台2;光学机械装置6,其用以使得所述探测激光光束穿过承载于其上的待测样品时能够改变激光光束到光轴座标原点距离 l 和入射角 θ ;滤光片3,其用以滤除泵浦光以及斯托克斯光使得相干反斯托克斯拉曼散射光通过;以及探测器1,其用以对待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测;其中,所述探测激光光束穿过待测样品,基于待测样品的三阶非线性效应所产生相干反斯托克斯拉曼散射光,经由滤光片滤除混杂于相干反斯托克斯拉曼散射光中的泵浦光以及斯托克斯光后,由探测器对待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测。

[0075] 基于上述方案,进一步的优选例1,所述探测器的选取根据具体要求选择光电探头或者光谱仪光纤头中任意一种。

[0076] 基于上述优选例1,进一步的优选例2,所述探测激光光束依据待测样品所对应的拉曼频移设置泵浦光以及斯托克斯光即Stokes光之间的频率差,且所述泵浦光和Stokes光首先合为一束细而平行度高的激光束4后次穿过待测样品、滤光片照射到光电探测器(或光谱仪光纤头)上;在穿过待测样品时由于待测物种的三阶非线性效应,产生了相干反斯托克斯拉曼散射光即CARS光。

[0077] 基于上述优选例2,进一步的优选例3,所述光学机械装置具有承载台且能够实现使得承载台进行平移或者旋转,进而改变激光光束到座标原点距离 l 和入射角 θ 。

[0078] 基于上述优选例3,进一步的优选例4,所述所述装置还包括数据分析器,其用以依据探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号分析获得待测样品断层所对应的样品浓度分布扫描参数或者温度断层扫描参数。

[0079] 基于上述优选例4,进一步的优选例5,本发明通过上述装置对样品作物种浓度分布扫描的原理是利用窄带CARS光谱和Radon变换;其中Radon变换成像原理和医学影像学CT类似,不同的是,医疗CT采用X光吸收光谱成像,而本发明采用CARS光谱成像;具体的所述物种浓度分布扫描参数的分析过程为:若假定所述探测器所检测到相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度为 I ,泵浦光信号强度为 I_p ,斯托克斯光信号强度为 I_s ;待测样品的浓度为 f ,则依

据非线性光学的理论,上述物理量对应的关系为 $f = \frac{k}{l_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}$, $I = \frac{f^2 I_s l_p^2}{k^2}$,其中,比例系数k通过测已知浓度的被测样品进行标定,对应的样品浓度分布扫描参数即样品浓度场为非均匀场 $f(x, y)$,对应的样品中各处产生相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度也是非均匀场,表示为 $I(x, y) = \frac{[f(x, y)]^2 I_s l_p^2}{k^2}$ (1);

[0080] 自上述公式(1)可知,鉴于探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号的电流强度反映的是 $I(x, y)$ 沿着光线的积分值,则引入Radon变换进行求解,即若探测激光光束的入射光线到座标原点距离和入射角分别为 l 和 θ ,入射光线所在的直线为 L ,则 $I(x, y)$ 对应的Radon变换式如下式(2)所示光强对于 l 和 θ 的函数 $(\mathcal{R}I)(l, \theta)$

$$[0081] \quad (\mathcal{R}I)(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL \quad (2)$$

[0082] 自上式可得出探测器直接探测到的物理量就是 $(\mathcal{R}I)(l, \theta)$;

[0083] 则公式(2)对应的傅里叶变换与和 $I(x, y)$ 的傅里叶变换存在如下关系:

$$[0084] \quad \mathcal{F}_l[\mathcal{R}I(l, \theta)] = \tilde{I}(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}(k_x, k_y)$$

[0085] 式中 \mathcal{F}_l 为对入射光线到座标原点距离 l 作傅立叶变换, \tilde{I} 表示 $I(x, y)$ 的傅里叶变换 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0086] 最后通过光学机械装置不断改变光束到座标原点距离 l 和入射角 θ 以获得全部 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0087] 对所述 $\tilde{I}(k_x, k_y)$ 作逆傅里叶变换求出对应的 $I(x, y)$ 后,基于 $f = \frac{k}{l_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}$ 求出待测

样品断层所对应的样品浓度分布扫描参数 $f(x, y)$ 。

[0088] 基于上述优选例5,进一步的优选例6,所述数据分析器还用以依据光电探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号分析获得温度断层扫描参数。

[0089] 其对应的测量原理利用了宽带CARS光谱和Radon变换实现的;由于可以通过宽带CARS光谱测量相邻两个转动能级的粒子数之比,并利用Boltzman分布公式,即下式

$$[0090] \quad \frac{n_1}{n_0} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

[0091] 来计算温度 T ,其中 k 为Boltzman常数, ΔE 为两个转动能级的能量之差;且由于基于样品中单点的CARS光谱 I_λ 计算单点的温度 T 已经有成熟方法,则可以考虑利用Radon变换取得 $I_\lambda(x, y)$,

[0092] 基于上述原理,在本发明所述温度断层扫描参数的分析过程为:

[0093] 首先通过光谱仪光纤探测待测样品中多个转动能级的粒子分布构成的连续转动光谱 P 支光谱以及 Q 支光谱所构成的函数 $I_\lambda(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL$,并通过光学机械装置遍历 l 和 θ ;其中下标 λ 表示波长为 λ 的光谱线在光谱仪上的积分;

[0094] 其次依据所述 P 支光谱和 Q 支光谱计算对应的温度,所述计算过程为

[0095] 对 $I_\lambda(l, \theta)$ 中的 l 作傅里叶变换,得到

$$[0096] \quad \mathcal{F}_l[I_\lambda(l, \theta)] = \tilde{I}_\lambda(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)$$

[0097] 再对 k_x, k_y 分别作傅里叶逆变换,得到

$$[0098] \quad \mathcal{F}_{k_x} \mathcal{F}_{k_y} [\tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)] = I_\lambda(x, y)$$

[0099] 最后根据光谱分布函数 $I_\lambda(x, y)$ 可以求解出温度分布函数 $T(x, y)$ 。

[0100] 具体求解方法为,利用Boltzman公式计算不同温度下转动能级上的粒子数,通过粒子数计算理论上的光谱加宽线型,再根据实验测到的光谱的加宽线型进行拟合温度 T 。

[0101] 本发明的另一目的是要提供一种基于CARS的断层扫描成像的检测系统,其包括上述任意一项方案所述的CARS的断层扫描成像装置。

[0102] 发明的另一目的是要提供一种基于CARS的断层扫描成像的检测方法,其基于上述任意一项方案所述的CARS的断层扫描成像装置进行检测,其具体包括如下步骤:

[0103] 步骤1、将待测样品装入待测样品承载台中;

[0104] 步骤2、基于待测样品所对应的拉曼频移数据设置探测光源;

[0105] 步骤3、通过探测器、光学机械装置使得激光光束进入样品时在某一坐标原点距离 l 和某一入射角 θ 条件下待测样品受激所产生的相干反斯托克斯拉曼散射光进行检测;

[0106] 步骤4、通过光学机械装置依次改变光光束到坐标原点距离和入射角获得全部检测数据。

[0107] 步骤5、依据探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号分析获得待测样品断层所对应的样品浓度分布扫描参数或者温度断层扫描参数。

[0108] 步骤2中所述探测激光光束依据待测样品所对应的拉曼频移设置泵浦光以及斯托克斯光之间的频率差且依据待测样品检测需求设置探测激光光束以及探测器类型;若检测温度断层扫描参数则所述探测激光光束选择宽带激光光束,同时所述探测器选择光谱仪光纤;若检测样品浓度分布扫描参数则所述探测激光光束选择窄带激光光束,同时所述探测器选择Pin管。

[0109] 步骤5中的所述物种浓度分布扫描参数的分析过程为:若假定所述Pin管所检测到相干反斯托克斯拉曼散射光信号强度为 I ,泵浦光信号强度为 I_p ,斯托克斯光信号强度为 I_s ;待测样品的浓度为 f ,则依据非线性光学的理论,上述物理量对应的关系为

$$f = \frac{k}{I_p} \sqrt{\frac{I}{I_s}}, \quad I = \frac{f^2 I_s I_p^2}{k^2}, \text{其中,比例系数} k \text{通过测已知浓度的被测样品进行标定,对应的}$$

样品浓度分布扫描参数即样品浓度场为非均匀场 $f(x, y)$,对应的样品中各处产生相干反斯

托克斯拉曼散射光信号强度也是非均匀场,表示为 $I(x, y) = \frac{[f(x, y)]^2 I_s I_p^2}{k^2}$ (1);

[0110] 自上述公式(1)可知,鉴于探测器所检测的相干反斯托克斯拉曼散射光信号的电流强度反映的是 $I(x, y)$ 沿着光线的积分值,则引入Radon变换进行求解,即若探测激光光束的入射光线到光轴坐标原点距离和入射角分别为 l 和 θ ,入射光线所在的直线为 L ,则 $I(x, y)$ 对应的Radon变换式如下式(2)所示函数 $\mathcal{R}I(l, \theta)$:

$$[0111] \quad (\mathcal{R}I)(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL \quad (2)$$

[0112] 则公式(2)对应的傅里叶变换与和 $I(x, y)$ 的傅里叶变换存在如下关系:

$$[0113] \quad \mathcal{F}_l[\mathcal{R}I(l, \theta)] = \tilde{I}(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta)$$

[0114] 式中 \mathcal{F}_l 为对入射光线到座标原点距离 l 作傅立叶变换, \tilde{I} 表示 $I(x, y)$ 的傅里叶变换 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0115] 最后通过光学机械装置不断改变光束到座标原点距离 l 和入射角 θ 以获得全部 $\tilde{I}(k_x, k_y)$;

[0116] 对所述 $\tilde{I}(k_x, k_y)$ 作逆傅里叶变换求出对应的 $I(x, y)$ 后,基于 $f = \frac{k}{l_p} \sqrt{\frac{l}{l_s}}$ 求出待测样品各断层所对应的样品浓度分布扫描参数 $f(x, y)$;

[0117] 所述温度断层扫描参数的分析过程为:

[0118] 首先通过光谱仪光纤探测待测样品中多个转动能级的粒子分布构成的连续转动光谱 P 支光谱以及 Q 支光谱所构成的函数 $I_\lambda(l, \theta) = \int_L I(x, y) dL$,并通过光学机械装置遍历 l 和 θ ;其中下标 λ 表示波长为 λ 的光谱线在光谱仪上的积分;

[0119] 其次依据所述 P 支光谱和 Q 支光谱计算对应的温度,所述计算过程为

[0120] 对 $I_\lambda(l, \theta)$ 中的 l 作傅里叶变换,得到

$$[0121] \quad \mathcal{F}_l[I_\lambda(l, \theta)] = \tilde{I}_\lambda(k_l \cos \theta, k_l \sin \theta) = \tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)$$

[0122] 再对 k_x, k_y 分别作傅里叶逆变换,得到

$$[0123] \quad \mathcal{F}_{k_x} \mathcal{F}_{k_y}[\tilde{I}_\lambda(k_x, k_y)] = I_\lambda(x, y)$$

[0124] 最后根据光谱分布函数 $I_\lambda(x, y)$ 可以求解出温度分布函数 $T(x, y)$ 。

[0125] 下述以具体实施例对本发明所述方案作进一步说明及论证:

[0126] 实施例1:采用本发明所述装置对某种冷冻生物组织样品中NO的含量进行检测;其中NO是动物体内一种的小分子,在很多生理活动中起重要的信号传递作用,检测不同部位NO的浓度分布具有临床意义。

[0127] 其实际实验装置如附图2所示;由于NO的拉曼频移为 1874.35cm^{-1} ,则探测器(采用PIN管),其采用波长为 532nm 的固体激光作为泵浦光(绿色),则相应Stokes光的波长为 590.92nm (黄色);又由于本实验只需要测浓度,因此用可调谐窄带染料激光器即可,染料用RhB;将 532nm 的固体激光和 590.92nm 的染料激光合束之后,通过反射镜7射入样品中,进而产生波长为 483.76nm 的CARS光(应为蓝色);同时选择选取截止波长为 500nm 的短通滤波片安装在探测器上;优选的,如图所述光电机机械装置的载物台可以经由轴承、丝杠、电机等进行二维调整,即能够平移 l 和转动 θ ;随后遍历所有的 l 和 θ ,并记录PIN管响应 $I(\theta, l)$;最后通

过对 $I(\theta, l)$ 中 l 作逆Radon变换,求出 $I(x, y)$,进一步基于 $f = \frac{k}{l_p} \sqrt{\frac{l}{l_s}}$ 求出断层NO的浓度分布 $f(x, y)$ 。

[0128] 实施例2:采用本发明所述装置对火焰温度进行断层扫描;由于稳定火焰温度是燃烧诊断研究中最常用到也是最重要的物理量,是对燃烧过程最直观的描述;则测量火焰温度就能够了解燃烧过程中发生的各种物理化学反应的机理,了解燃烧过程,评估燃烧能量利用,进而对火箭发动机、化工反应器总体评价。

[0129] 所述装置如图3所示,其中8是能够产生稳定预混火焰的化工反应器;由于氮气的拉曼频移是 2330cm^{-1} 左右则对应激光光源中Stokes波长中心为 607.27nm ;同时为了获得氮

气在高温高压下加宽的光谱,需要采用宽带CARS技术,因此激光采用共线的532nm、线宽 0.3cm^{-1} 窄带泵浦光和中心波长607nm、线宽5nm的宽带染料激光器,染料采用RhB;双波长激光射出,穿过预混火焰,达到探测器,其采用光谱仪探头采集光谱。其运动控制装置即光电机械装置,通过轴承、丝杠、电机控制光轴的旋转角 θ 和光轴 θ 的偏移量 l ;遍历 θ 和 l 后得到光谱 $I_{\lambda}(\theta, l)$,对 $I_{\lambda}(\theta, l)$ 做逆Radon变换,就得到了断层中每一个点所对应的CARS光谱 $I_{\lambda}(x, y)$ 。进而根据光谱的形状可以求出每一个点的氮气的温度。

[0130] 综上所述,本发明实现了对待测样品进行断层扫描并得到待测物种浓度和其温度的三维分布情况,其扩展了CARS光谱技术的应用领域。

[0131] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,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,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

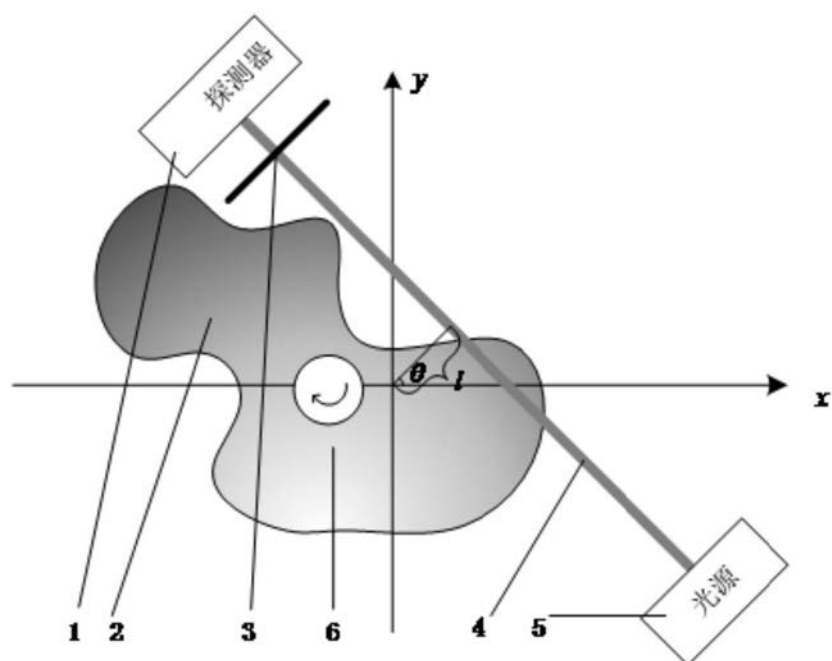


图1

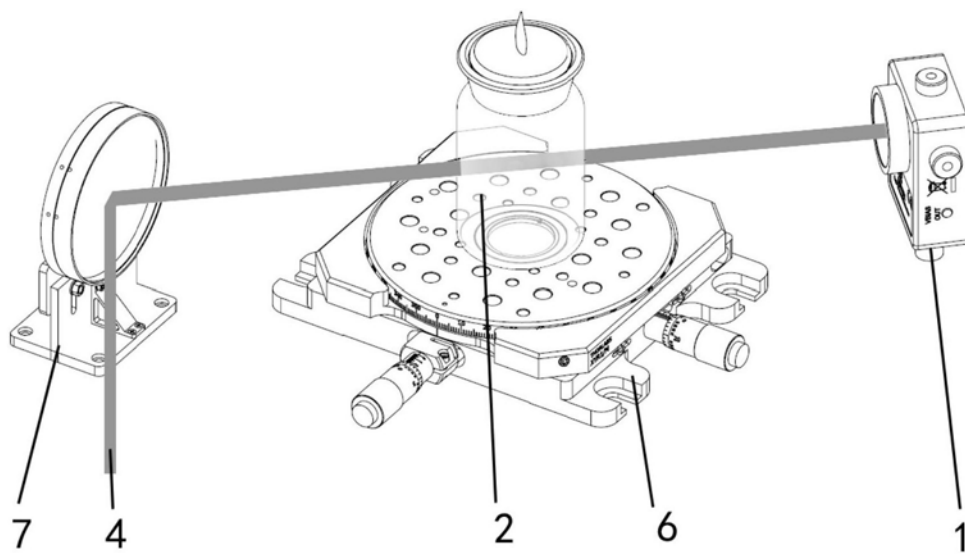


图2

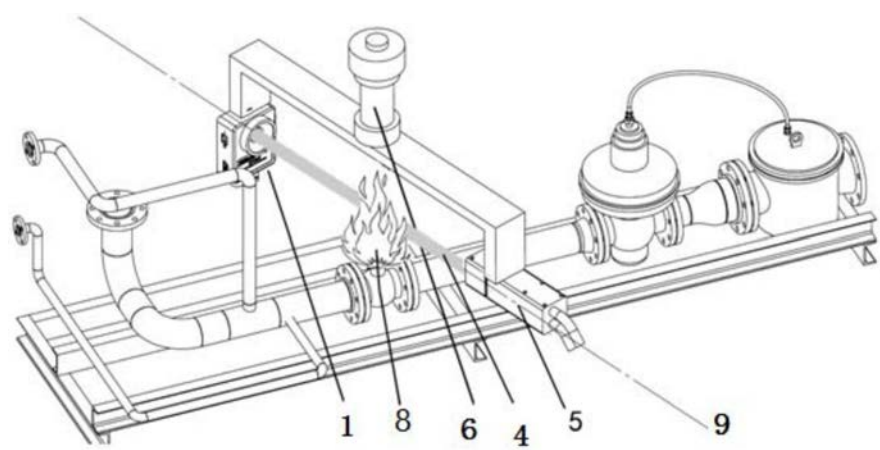


图3