



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102564909 B

(45) 授权公告日 2014. 05. 07

(21) 申请号 201110386025. 6

审查员 孙昕

(22) 申请日 2011. 11. 29

(73) 专利权人 中国科学院安徽光学精密机械研究所

地址 230031 安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

(72) 发明人 桂华侨 王秀丽 陆亦怀 刘建国
王杰 伍德侠 张静

(74) 专利代理机构 安徽合肥华信知识产权代理有限公司 34112

代理人 余成俊

(51) Int. Cl.

G01N 15/00 (2006. 01)

G01N 15/06 (2006. 01)

G01N 15/02 (2006. 01)

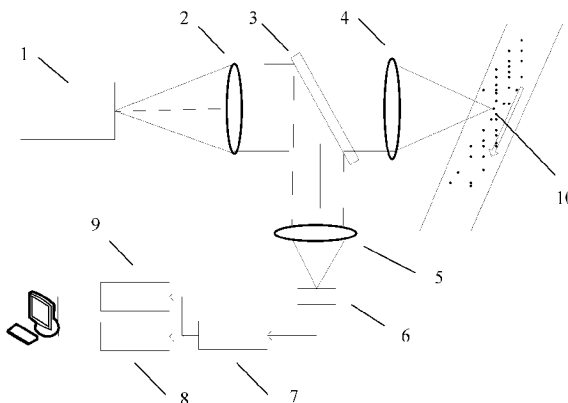
权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

激光自混合大气颗粒物多物理参数测量方法和装置

(57) 摘要

本发明公开了一种激光自混合大气颗粒物多物理参数测量方法和装置,包括微片激光器、准直透镜、分光镜、会聚透镜、光电探测器、放大器、数据采集卡、频谱分析仪构成。微片激光器出射激光经准直和会聚透镜聚焦到待测大气颗粒物上,由于光路可逆原理,产生的部分后向散射光反馈回激光器,从而引起激光功率和波长等参数的改变,即产生激光自混合效应。另外,在光路中加入分光镜,分出小部分激光束,由光电探测器接收,并经过放大器、数据采集卡、频谱分析仪实现激光自混合信号的采集与分析。本发明结构简单、易于调节,有效地提高了大气颗粒物探测装置的探测精度。



1. 一种激光自混合大气颗粒物多物理参数测量装置的测量方法,其特征在于:所述的测量装置包括微片激光器和依次安装在其发射端轴线上的准直透镜、第一会聚透镜,所述准直透镜与第一会聚透镜之间安装有能将微片激光器发射光分光在发射光轴垂直方向的分光镜,所述分光镜分光后激光光路上安装有第二会聚透镜,所述第二会聚透镜焦点处安装有光电探测器,所述光电探测器后依次电连接有信号放大器、数据采集卡、频谱分析仪和计算机,所述光电探测器的输出端与信号放大器的输入端电连接,信号放大器的输出端分别电连接在数据采集卡和频谱分析仪的输入端,所述数据采集卡和频谱分析仪的输出端电连接在计算机上;激光自混合大气颗粒物多物理参数测量方法,包括以下步骤:

1) 微片激光器输出单横模单纵模激光,经过准直透镜准直后投射到分光镜上;

2) 经过分光镜的透射光通过第一会聚透镜会聚到待测大气颗粒物上,部分后向散射光沿着入射路径反馈回微片激光器的谐振腔;

3) 经过分光镜的反射光通过第二会聚透镜会聚到光电探测器上,实时监测由颗粒物光反馈产生的激光自混合效应,光电探测器将光功率的调制转变为光功率电信号,光功率电信号再经过信号放大器放大;

4) 经信号放大器的电信号分别接入数据采集卡和频谱分析仪,数据送入计算机;

5) 由数据采集卡得到放大后的功率电信号,计算出信号起伏的标准差;首先测量已知颗粒物浓度下光电探测器上信号起伏的标准差,得到颗粒物浓度和信号起伏标准差的标准变化关系图谱,然后测量待测颗粒物通过激光聚焦点的激光功率信号,将所得的信号的标准差与得出的标准变化关系图谱比对,得出颗粒物浓度信息;

6) 频谱分析仪检测的信号电功率频谱的峰值功率即与颗粒物运动速度对应,信号频谱消失进入噪声频谱时的频率即为颗粒物运动引起的多普勒频移,颗粒物运动速度由公式计算得到;

7) 由频谱分析仪得到多个标准粒径下的功率谱曲线,得到颗粒物粒径和功率谱半宽的标准变化关系图谱,然后测量待测颗粒物通过激光聚焦点的激光功率信号,将所得的信号功率谱与得出的标准变化关系图谱比对,得出颗粒物粒径信息。

2. 根据权利要求1所述的激光自混合大气颗粒物多物理参数测量装置的测量方法,其特征在于:所述微片激光器采用激光二极管泵浦微片激光器,单横模和单纵模激光输出。

3. 根据权利要求1所述的激光自混合大气颗粒物多物理参数测量装置的测量方法,其特征在于:所述微片激光器、准直透镜、第一会聚透镜、第二会聚透镜以及颗粒物共同构成共焦系统。

激光自混合大气颗粒物多物理参数测量方法和装置

技术领域

[0001] 本发明涉及大气颗粒物监测技术领域,尤其涉及一种大气颗粒物多物理参数的快速非接触测量方法和装置。

背景技术

[0002] 随着经济的不断发展,颗粒物污染成为大气的首要污染源,大气颗粒物浓度、粒径和运动速度等作为影响和表征大气空气质量的重要参数,越来越受到人们的关注。城市空气中颗粒物主要来源于土壤风沙尘、工业排放的烟气、施工扬尘、机动车尾气尘等,对于生态环境、工业生产、人类健康等领域都有着十分严重的危害。大气颗粒物会吸收或反射太阳的辐射,干扰自然界的能量辐射平衡,降低大气能见度。同时,大气中的颗粒物表面会吸附各种有害物质,一旦进入人体就会引发各种呼吸系统疾病,人类长期生活在颗粒物污染严重的环境中会导致体质下降或引发慢性疾病。

[0003] 目前,对于大气颗粒物微物理特征参数的测量技术,较为成熟的是激光多普勒和光散射技术。激光多普勒测速是利用外差方法测量多普勒频移来获得颗粒物的速度信息,具有非介入、高空间分辨和快速响应等优点,但一般需要分光器件以形成外部干涉,并且光程差需要在激光相干长度内才能观测到多普勒干涉信号,因此同时存在光路复杂、难以准直、对光源相干性要求高等不足,较难广泛应用于普通场合的颗粒物测量如烟道颗粒物监测等。光散射法是通过测量颗粒物对入射光在一定角度上的散射光信号并根据米散射原理推算出颗粒物粒径分布,主要有结合光散射的光学粒子计数和双光斑飞行时间测量技术,可实现多通道、高精度的微米级颗粒物粒径测量,但信号探测结构更为复杂,需要设计精巧的椭球镜信号收集系统,并将散射和接收光分别调整到不同的焦点上才能实现颗粒物粒径的测量。

[0004] 近年来,由激光多普勒技术发展而来的激光自混合技术(即激光器的出射光经外部物体散射或反射后,部分光反馈回激光腔形成新的谐振,通过测量激光功率、频率的变化来获取外部物体运动、形貌等信息的测量技术),无需外部干涉,具有系统结构简单、体积小、易于调节、精度高且不受激光器功率波动影响等优点,可广泛应用于速度、位移、距离等物理量的高精度测量。但是,由于大气颗粒物散射信号很弱、颗粒物多种物理特性会同时影响激光自混合信号并存在一定的随机波动,很难测量到明显的激光自混合信号,更无法实现颗粒物多种物理参数的有效提取。因此,普通的激光自混合传感系统无法实现大气颗粒物多参数的准确测量。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种激光自混合大气颗粒物多物理参数测量方法和装置,以解决现有对于大气颗粒物微物理特征参数的测量技术中探测结构复杂、测量精度不高的问题。

[0006] 为达到上述目的,本发明采用的技术方案为:

[0007] 一种激光自混合大气颗粒物多物理参数测量方法和装置,包括微片激光器和依次安装在其发射端轴线上的准直透镜、第一会聚透镜,其特征在于:所述准直透镜与第一会聚透镜之间安装有能将微片激光器发射光分光在发射光轴垂直方向的分光镜,所述分光镜分光后激光光路上安装有第二会聚透镜,所述第二会聚透镜焦点处安装有光电探测器,所述光电探测器后依次电连接有信号放大器、数据采集卡、频谱分析仪和计算机,所述光电探测器的输出端与信号放大器的输入端电连接,信号放大器的输出端分别电连接在数据采集卡和频谱分析仪的输入端,所述数据采集卡和频谱分析仪的输出端电连接在计算机上。

[0008] 所述微片激光器采用激光二极管泵浦微片激光器,单横模和单纵模激光输出。选用的激光器单纵模工作可使得在激光聚焦点附近反馈下自混合波形无明显畸变,单横模工作使得自混合信号的频谱展宽较小。

[0009] 所述激光器、准直透镜、会聚透镜、颗粒物共同构成共焦系统,只有在会聚点附近的散射光才能大量返回到激光器谐振腔中产生自混合效应,可以进一步提高系统的测量精度。

[0010] 本发明的有益效果为:

[0011] 本发明保持了激光自混合技术系统具有的结构简单、易于调节等优点,并且采用单纵模单横模微片激光器有效提高了激光自混合大气颗粒物传感的灵敏度,降低了大气颗粒物光反馈下的激光自混合信号频谱的展宽效应;同时设计的激光传输系统采用共焦光路,在提高反馈光强的同时限制会聚点以外的杂散光进入激光器谐振腔,进一步提高系统的灵敏度和测量精度。

附图说明

[0012] 图1为本发明的激光自混合大气颗粒物多物理参数测量装置原理图。

[0013] 图2为本发明的激光自混合模型原理图。

具体实施方式

[0014] 如图1所示,包括微片激光器1和依次安装在其发射端轴线上的准直透镜2、第一会聚透镜4,准直透镜2与第一会聚透镜4之间安装有能将微片激光器1发射光分光在发射光轴垂直方向的分光镜3,分光镜3分光后激光光路上安装有第二会聚透镜5,第二会聚透镜5焦点处安装有光电探测器6,光电探测器6后依次电连接有信号放大器7、数据采集卡8、频谱分析仪9和计算机,光电探测器6的输出端与信号放大器7的输入端电连接,信号放大器7的输出端分别电连接在数据采集卡8和频谱分析仪9的输入端,数据采集卡8和频谱分析仪9的输出端电连接在计算机上。

[0015] 具体测量步骤如下:

[0016] 1) 微片激光器1输出单横模单纵模激光,经过准直透镜2准直后投射到分光镜上3;

[0017] 2) 经过分光镜3的透射光通过第一会聚透镜会聚到待测大气颗粒物10上,部分后向散射光沿着入射路径反馈回微片激光器1的谐振腔;

[0018] 3) 经过分光镜3的反射光通过第二会聚透镜会聚到光电探测器6上,实时监测由颗粒物光反馈产生的激光自混合效应,光电探测器6将光功率的调制转变为光功率电信

号,光功率电信号再经过信号放大器 7 放大;

[0019] 4) 经信号放大器 7 的电信号分别接入数据采集卡 8 和频谱分析仪 9,数据送入计算机;

[0020] 5) 由数据采集卡 8 得到放大后的功率电信号,计算出信号起伏的标准差;首先测量已知颗粒物浓度下光电探测器上信号起伏的标准差,得到颗粒物浓度和信号起伏标准差的标准变化关系。然后测量待测颗粒物通过激光聚焦点的激光功率信号,将所得的信号的标准差与得出的标准图谱比对,得出颗粒物浓度信息;

[0021] 6) 频谱分析仪 9 检测的信号电功率频谱的峰值功率即与颗粒物运动速度对应,信号频谱消失进入噪声频谱时的频率即为颗粒物运动引起的多普勒频移,颗粒物运动速度由公式 (6) 计算得到;

[0022] 7) 由频谱分析仪 9 得到多个标准粒径下的功率谱曲线,得到颗粒物粒径和功率谱半宽的标准变化关系。然后测量待测颗粒物通过激光聚焦点的激光功率信号,将所得的信号功率谱与得出的标准图谱比对,得出颗粒物粒径信息。

[0023] 本发明的激光自混合大气颗粒物多物理参数测量原理如下:

[0024] 激光自混合干涉模型基本原理如图 2 所示, F_1 和 F_2 分别是激光器前后端面,光波振幅反射率分别为 r_1 和 r_2 ,构成系统内腔;出射端面 F_2 和被测颗粒物构成系统外腔。系统内外腔长分别为 L_D 和 L_E ;激光腔内媒质的复折射率为 n_c 。激光经 F_2 端面出射至颗粒物,部分光被颗粒物散射并反馈回激光器谐振腔,和腔内的激光形成自混合干涉。

[0025] 设 F_1 为起点,向右传播的光波为 $E_0(t)$,部分光在内腔经历一次往返至 F_1 ,光波为 $E_1(t) = r_1 r_2 E_0(t) \exp[i(2k n_c L_D)]$,其中波矢 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长。经 F_2 透射并到达颗粒物的光场为 $E_2(t) = \kappa E_0(t) \exp[i(k n_c L_D + k L_E)]$, κ 为 F_2 的透过率。

[0026] 将 $E_2(t)$ 分解为垂直分量 $E_{2z}(t, \theta)$ 和平行分量 $E_{2\parallel}(t, \theta)$, θ 为光的电矢量与观测平面的夹角,被颗粒物散射后的光场为:

$$[0027] \quad \begin{pmatrix} E_{2z}(t, \theta, \phi) \\ E_{2\parallel}(t, \theta, \phi) \end{pmatrix} = \frac{\exp(ikr' - ikz)}{-ikr'} \begin{pmatrix} S_2(\theta) & 0 \\ 0 & S_1(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{2z}(t, \phi) \\ E_{2\parallel}(t, \phi) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$[0028] \quad \text{其中} \quad \begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta)] \end{cases} \quad \begin{cases} \pi_n = \frac{P_n(\cos \theta)}{\sin \theta} \\ \tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n(\cos \theta) \end{cases}$$

$$[0029] \quad \begin{cases} a_n = \frac{\varphi_n(w) \varphi_n'(mw) - m \varphi_n'(w) \varphi_n(mw)}{\xi_n(w) \varphi_n'(mw) - m \xi_n'(w) \varphi_n(mw)} \\ b_n = \frac{m \varphi_n(w) \varphi_n'(mw) - \varphi_n'(w) \varphi_n(mw)}{m \xi_n(w) \varphi_n'(mw) - \xi_n'(w) \varphi_n(mw)} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_n = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} J_n(x) \\ \xi_n = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} H_n(x) \end{cases}$$

[0030] 这里, $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 是散射函数, $J_n(x)$ 、 $H_n(x)$ 为第一类贝塞尔函数和汉克尔函数, P_n 为勒让德函数。 r' 为颗粒物中心到观测点的距离, $w = kr$ 为颗粒物尺度参数, r 为颗粒物半径, m 为颗粒物复折射率, θ 为散射角。颗粒物的后向散射光经过 F_2 透射和 F_1 反射

后光场为：

$$[0031] \quad E_3(t) = \frac{1}{L_x} r_1 S_1(\pi) \kappa E_0(t) \exp[i(2kx L_D + 2kx + \pi/2)] \quad (2)$$

[0032] 其中 $r_2^2 + \kappa f = 1$, $S_1(\pi)$ 是复数, 令 $S_1(\pi) = a + bi$, 其中 a, b 是颗粒物半径和复折射率的函数。

[0033] 根据激光器稳态条件, 可得到外腔反馈激光系统的阈值增益变化：

$$[0034] \quad \Delta G = -\frac{\eta}{2L_D} \cos(2kx + \beta) \quad (3)$$

[0035] 激光器输出功率同样被反馈光调制, 输出的光功率可表示为：

$$[0036] \quad I = I_0 [1 + m \cos(\omega t_x + \beta)] \quad (4)$$

[0037] 这里调制系数 m 在工作电流一定时为比例于 C 的常数, ω 为颗粒物反馈下激光

圆频率, $\tan \beta = -\eta_1 / \eta_2$, $\eta_1 = \frac{r_{31} f \kappa}{r_2}$, $\eta_2 = \frac{r_{32} f \kappa}{r_2}$, $r_{31} = \frac{a}{L_x}$, $r_{32} = \frac{b}{L_x}$, $\eta = \sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2}$ 。由公式 4 可知, 大气颗粒物运动速度、粒径等参数则可通过激光自混合信号的分析得到。

[0038] 根据外腔长 $L_x = L_0 - Vt$, L_0 为外腔的初始腔长度, V 为被测颗粒物沿激光光轴方向的运动速度, 可得颗粒物光反馈下激光器输出光功率的变化频率与颗粒物运动速度的关系式：

$$[0039] \quad f = \frac{4\pi\nu V}{4\pi\nu L_0 - 2\pi c + \beta c} \quad (5)$$

[0040] 这里, ν 为光波频率, 常数 c 为激光在真空中的传播速度。由此可见, 颗粒物光反馈下输出光功率的变化频率与颗粒物运动速度是线性关系。

[0041] 当激光器特性和外腔长度 L_0 固定时, 颗粒物运动速度与激光器输出光功率的变化频率的关系式：

$$[0042] \quad V = \frac{2\nu V}{c} \quad (6)$$

[0043] 激光器的光谱线宽是一个重要参数, 对于单频激光器, 假定谱线线宽为 Lorentzian 线型, 可得到激光自混合效应下激光线宽：

$$[0044] \quad \delta\nu = \frac{\delta\nu_0}{\{1 + C \cos[2\pi\nu t_x - \arctan(\alpha) + \beta]\}^2} \quad (7)$$

[0045] 其中 $\delta\nu_0$ 为无反馈时激光器输出的光谱线宽, $\alpha = \chi/\rho$ 为激光器线宽展宽因子,

$t_x = 2L_x/c$ 为激光在外腔往返时间, $C = \frac{\eta t_x \sqrt{1 + \chi^2/\rho^2}}{t_D(1 - \chi g/n_0 \rho)}$, 反映自混合干涉系统外部光反馈

强度水平, 与腔外颗粒物浓度和激光器参数有关。

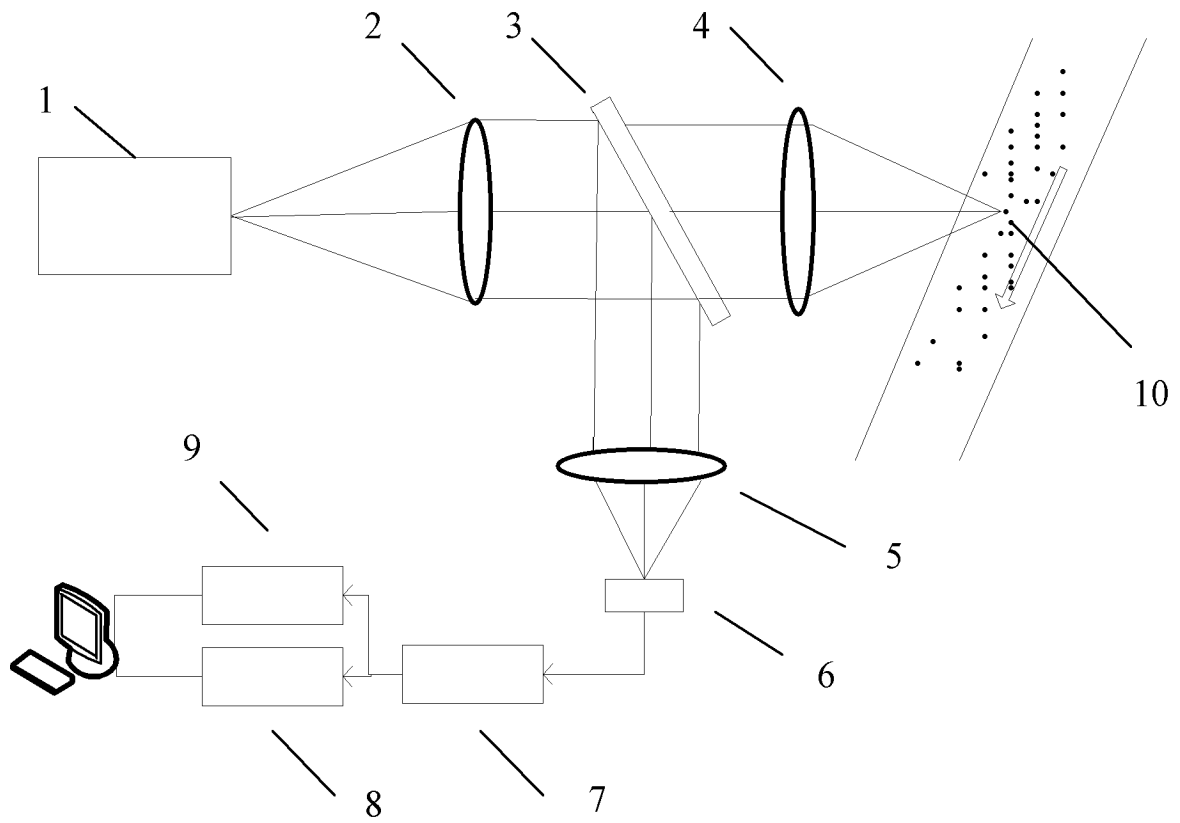


图 1

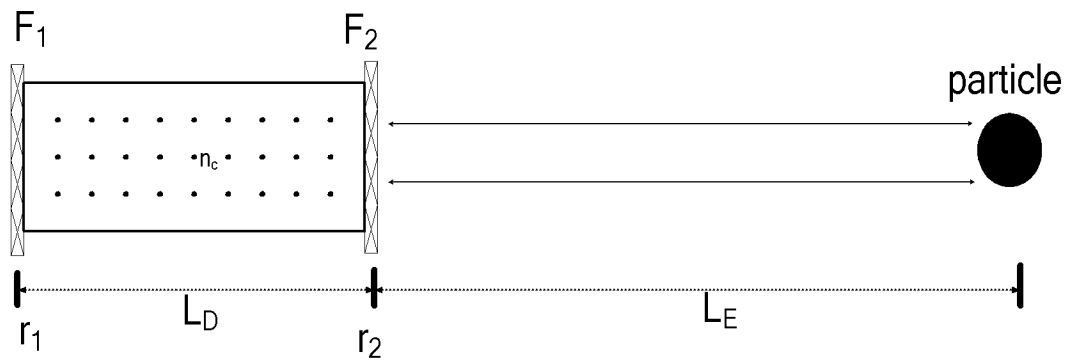


图 2