

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200610089246.6

[51] Int. Cl.

G01P 5/20 (2006.01)

G01P 5/00 (2006.01)

G01M 10/00 (2006.01)

[45] 授权公告日 2009 年 9 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 100541204C

[22] 申请日 2006.8.11

[21] 申请号 200610089246.6

[73] 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100080 北京市海淀区北四环西路 15  
号

[72] 发明人 李战华 郑 旭 王绪伟

[56] 参考文献

CN1654962A 2005.8.17

US6653651B1 2003.11.25

CN1588092A 2005.3.2

梯形截面微管道内流场的 PIV 测量. 王健等. 实验流体力学, 第 19 卷第 3 期. 2005

审查员 雒晓明

[74] 专利代理机构 北京泛华伟业知识产权代理有

限公司

代理人 高存秀

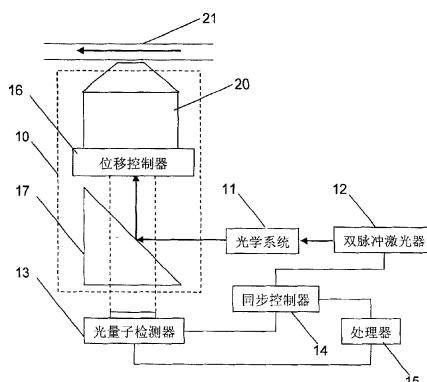
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 1 页

[54] 发明名称

一种微流道速度分布的测量装置和测量方法

[57] 摘要

本发明公开了一种微流道速度分布的测量装置和测量方法。该装置包括：一显微镜；一双脉冲激光器，一光量子检测器；一同步控制器；一处理器。该方法包括如下步骤：1) 将各仪器调整至准备工作状态；2) 向微流道注入荧光粒子溶液，驱动管道内液体流动；3) 调节物镜的垂直位置直到微流道的下底面成像最清晰的位置；4) 双脉冲激光照射得到的同一个粒子的两个光斑的间距在 20 ~ 50 像素；5) 在双脉冲激光照射下，连续拍摄多帧图像；6) 调整物镜焦平面到新的位置再拍摄多帧图像；7) 重复步骤 6)，拍摄不同位置的图像。本发明具有光学探测灵敏度高、流场速度探测空间分辨率高、垂直方向位移调节精度高的优点。



1、一种微流道速度分布的测量装置，包括：

一显微镜（10），该显微镜有一物镜（20）和一反射装置（17）；其特征在于，还包括：

一双脉冲激光器（12），该双脉冲激光器发出的激光经过一光学系统（11）进入所述显微镜（10）的反射装置（17），激光反射进入所述物镜（20）并进入视场；

一用于记录物镜（20）所观测的微流道（21）中荧光粒子的光强分布的光量子检测器（13）与所述显微镜（10）配合；

一同步控制器（14）分别与所述光量子检测器（13）和双脉冲激光器（12）连接；

一处理器（15）分别与所述同步控制器（14）、光量子检测器（13）连接，所述处理器（15）为一计算机；

一用于调节所述物镜（20）位置的位移控制器（16）安装在所述物镜（20）上；所述物镜（20）为 100X 物镜；

所述光量子检测器（13）采用 Andor iXon DV885 单光子检测器；

所述位移控制器（16）为 PI 物镜纳米位移控制器，该 PI 物镜纳米位移控制器的位移调节范围  $100\mu\text{m}$ ，位移调节精度  $10\text{nm}$ 。

2、根据权利要求 1 所述微流道速度分布的测量装置，其特征在于，所述光学系统（11）为聚焦透镜和准直透镜。

3、一种根据权利要求 1 的所述微流道速度分布的测量装置进行测量的方法，包括如下步骤：

1) 将各仪器调整至准备工作状态；

2) 向微流道注入荧光粒子的直径  $\leq 500\text{nm}$  的荧光粒子溶液，通过气源驱动管道内液体流动，然后将微管道固定在显微镜工作台上；

3) 关闭环境光源，使用连续光观察粒子运动，并通过光量子检测器采集图像；调节物镜的垂直位置直到微流道的下底面成像最清晰的位置；

4) 设定光量子探测器曝光时间  $T$ ，激光双脉冲间隔时间  $t$ ，且  $t < T$ ；调整  $t$  值，使得光量子检测器捕捉的图像中，双脉冲激光照射得到的同一个粒子的两个光斑的间距在  $20\sim 50$  像素；

- 5) 使用 PI 纳米位移控制器数控模式精确调节，调整物镜焦平面到新的位置，调整激光双脉冲时间间隔  $t$ ，在双脉冲激光照射下，使用单光子检测器再拍摄一组图像；重复步骤 4) - 步骤 5)，拍摄不同位置的图像；所述曝光时间为 0ms~100ms；
- 6) 将步骤 5) 拍摄的图像以 tif 序列图像格式导出，使用图像分析软件进行处理。

---

## 一种微流道速度分布的测量装置和测量方法

### 技术领域

本发明涉及一种微流道速度分布的测量装置和测量方法。

### 背景技术

微尺度流动主要的流动特点：（1）在这种特征尺度范围内，表面积与体积之比增大到  $10^6 \text{ m}^{-1}$ ，与表面有关的传热、传质过程对流动有很大影响；（2）尺度缩小使得流场中某些梯度量变大，与速度梯度、温度梯度有关的物理参数的作用将增强；（3）界面力（液固、液气）对流动的作用将明显增强。为了深入认识这些新的流动问题，在理论研究的同时进行实验观测尤为重要。

微流动是 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System, 即微电子机械系统) 研究中的一个重要内容，对微流动机理的研究成为 MEMS 领域发展的重要基础。MicroPIV (Micro Particle Image Velocimetry) 技术逐渐发展成熟并已成功的被应用于微流动的实验测量中。

现有的微流道速度分布的测量技术（指目前 MicroPIV 技术），比如文献 1：“王昊利等，Micro-PIV 技术——粒子图像测速技术的新进展，力学进展，第 35 卷第 1 期，2005 年 2 月 25 日”中公开的技术，其流场分辨率仅在小于  $5\sim10 \mu\text{m}$  的水平，而微尺度流动特征长度为  $0.1 \mu\text{m}\sim1 \text{ mm}$ ，流场速度测量的空间分辨率要求达到  $0.5 \mu\text{m}$ 。又如文献 2：“郝鹏飞，微细管道和微喷管的流动特征研究，清华大学博士论文，2006”中，在  $\phi 168 \mu\text{m}$  圆管中的使用直径  $1\mu\text{m}$  的荧光粒子。而比如商业产品 TSI 公司和 Dantec 公司均推荐使用直径  $\geq 1\mu\text{m}$  的荧光粒子。

为了观测  $20\mu\text{m}$  以下微流道，必须使用直径  $\leq 200\text{nm}$  的荧光粒子。根据 Rayleigh 散射公式，粒子散射光强随粒子直径减小而成  $a_p^6$  规律减弱。因此目前商用产品无法观测直径  $< 1\mu\text{m}$  的荧光粒子，无法满足几十微米截面尺寸的微管道和近壁流动的观测。

鉴于现有技术的不足，就需要一种新的微流道速度分布的测量装置和测量方法。

## 发明内容

本发明的目的是克服现有技术的不足，从而提供一种微流道速度分布的测量装置和测量方法。

为了达到上述目的，本发明采取如下技术方案：

一种微流道速度分布的测量装置，包括：

一显微镜 10，该显微镜有一物镜 20 和一反射装置 17；其特征在于，还包括：

一双脉冲激光器 12，该双脉冲激光器发出的激光经过一光学系统 11 进入所述显微镜 10 的反射装置 17，激光反射进入所述物镜 20 并进入视场；

一光量子检测器 13 与所述显微镜 10 配合，用于记录物镜 20 所观测的微流道 21 的光强分布。

一同步控制器 14 分别与所述光量子检测器 13 和双脉冲激光器 12 连接；

一处理器 15 分别与所述同步控制器 14、光量子检测器 13 连接。

在上述技术方案中，进一步地，还包括一位移控制器 16 安装在所述物镜上，位移控制器 16 调节物镜的位置，可以观测微流道中不同深度位置的流场。

进一步地，所述处理器 15 为一计算机。

进一步地，所述光学系统 11 为聚焦透镜和准直透镜。

基于上述装置的一种微流道速度分布的测量方法，包括如下步骤：

1) 将各仪器调整至准备工作状态；

2) 向微流道注入荧光粒子溶液，驱动管道内液体流动，然后将微管道固定在显微镜工作台上；

3) 关闭环境光源，使用连续光观察粒子运动，并通过光量子检测器采集图像；调节物镜的垂直位置直到微流道的下底面成像最清晰的位置；此处的连续光是指显微镜的汞灯光源发出的荧光；

4) 设定光量子探测器曝光时间 T，激光双脉冲间隔时间 t，且  $t < T$ ；调整 t 值，使得光量子检测器捕捉的图像中，双脉冲激光照射得到的同一个粒子的两个光斑的间距在 20~50 像素；

5) 在双脉冲激光照射下，连续拍摄多帧图像；

6) 调整物镜焦平面到新的位置，调整激光双脉冲时间间隔 t，使用光量子检测器再拍摄多帧图像；

7) 重复步骤 6), 拍摄不同位置的图像。

在上述技术方案中, 进一步地, 所述步骤 2) 中, 通过气源驱动管道内液体流动。

进一步地, 所述步骤 4) 中曝光时间为 0ms~100ms。

与现有技术相比, 本发明的优点在于:

- 1) 光学探测灵敏度高;
- 2) 流场速度探测空间分辨率高;
- 3) 垂直方向位移调节精度高。

#### 附图说明

图 1 是本发明的微流道速度分布的测量装置示意图。

#### 具体实施方式

下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细描述:

参照图 1 制作本发明的微流道速度分布的测量装置示意图。其中, 显微镜 10 采用 Olympus IX71 倒置荧光显微镜, 具有白光和 UV 光双光源, 有 10X、40X、60X 和 100X 物镜 20, 其中 100X 为油镜, 数值孔径 NA=1.35, 镜头油折射率 n=1.516, 光学分辨率  $\delta = 0.35 \mu\text{m}$ , 工作距离为 100  $\mu\text{m}$ 。反射装置 17 采用直角反射棱镜。

光学系统 11 采用市场所售常规聚焦透镜和准直透镜产品。

双脉冲激光器 12 采用 NewWave Solo PIV120, Nd:YAG 双脉冲激光器, 发射光波长  $\lambda=532\text{nm}$ , 脉冲频率 1~15Hz 可调, 光斑直径 5mm, 脉宽 3~5ns, 最大激光能量 120mJ, 实际测量时使用范围可以为 5~15mJ。

光量子检测器 13 采用 Andor iXon DV885 单光子检测器, 拍摄图像  $1004 \times 1002$  像素, 单个像素宽度为 8 $\mu\text{m}$ , 配合荧光显微镜在  $1 \times 1$ bining 下图像分辨率可达到 80nm。具有电子增益功能, 冷却至-70℃暗电流仅为  $0.007\text{e-}/\text{pix/sec}$ , 量子效率达 65%。读出速度 35MHz, 图像传输 31.5 帧/秒, 帧转模式下最短曝光时间 10 $\mu\text{s}$ 。

同步控制器 14 采用市场所售常规产品, 如北京立方天地 MicroPulse 710 产品。

处理器 15 采用市场所售常规计算机。

位移控制器 16 采用市场所售常规产品，如 PI-721.LLQ 产品，位移调节范围  $100\mu\text{m}$ ，位移调节精度  $10\text{nm}$ 。

本发明优点如下：

1. 采用高光灵敏度的单光子检测器，使系统具有高的光学探测灵敏度

为了检测直径  $\leq 500\text{nm}$  粒子的图像，选用在荧光波长范围内 ( $\approx 620\text{nm}$ )，量子效率高达 70% 的单光子检测器。在  $5\text{ns}$  脉宽的激光照射下，可以捕捉到直径  $\leq 200\text{nm}$  的荧光粒子的图像，这是目前商业系统所无法达到的。

2. 采用  $100\times$  物镜和上述单光子探测器配合，提高了速度空间分辨率

采用  $100\times$  物镜时，观测流场为  $80\mu\text{m}$ 。单光子检测器拍摄像素为  $1004 \times 1002$ ，单个像素尺寸为  $8\mu\text{m}$ ，因此该系统的速度空间分辨率达到  $80\text{nm}$ 。

3. 采用纳米位移控制器，提高了纳米垂直位移调节精度

本系统将 PI 物镜纳米位移控制器引入，使物镜在  $100\mu\text{m}$  范围内的垂直移动精度达到  $10\text{nm}$ 。

基于上述装置的微流道速度分布的测量方法，包括如下步骤：

1) 打开显微镜白光、UV 光光源、激光器、单光子探测器、PI 纳米位移控制器和电脑(包括电脑中的激光器、单光子检测器同步控制软件以及 PI 纳米位移控制软件)，将各仪器都调整至准备工作状态。

2) 向微流道注入荧光粒子溶液，通过气源等方式驱动管道内液体流动，然后将微管道固定在显微镜工作台上。如果使用  $100\times/1.35$  的油镜，需要在固定之前滴加镜头油。在白光下(使用第 1 档滤镜)通过显微镜观测并调节工作平台方位，将管道置于显微镜视野内。

3) 关闭环境光源，使用连续光(使用第 5 档滤镜)观察粒子运动，并通过单光子检测器采集图像(曝光时间  $20\sim 30\text{ms}$ )显示于电脑中。调节物镜的垂直位置(可使用 PI 纳米位移控制器精确调节)，一般调整到流道的下底面成像最清晰，并以此作为实验开始的位置。

4) 切换光路到激光照射模式(并使用第 4 档滤镜)，将单光子检测器和激光器都设为外触发模式，通过同步器的控制软件设置好同步控制器的时序。设定单光子探测器曝光时间  $T$ ，激光双脉冲间隔时间  $t$ ，且保证  $t < T$ 。调整  $t$  值，使得单光子检测

器捕捉的图像中，双脉冲激光照射得到的同一个粒子的两个光斑的间距适合（一般在20~50像素）。调整好后，在双脉冲激光照射下，一次连续拍摄50~100帧图像。

5) 调整物镜焦平面到新的位置（使用PI纳米位移控制器数控模式精确调节），调整激光双脉冲时间间隔t，使用单光子检测器再拍摄一组图像。重复4-5的步骤，即可拍摄不同位置的图像。

6) 将拍摄的图像以tif序列图像格式导出，使用图像分析软件进行处理。

利用本实施例的上述装置和方法，结合下述三个测量实验来说明本发明的优越性：

(1) 微流道实验：

对截面 $50 \times 20\mu\text{m}$ 的方管微流道，驱动压力 $P=30\text{kPa}$ ，示踪粒子 $\phi 200\text{nm}$ ，激光脉冲脉宽5ns，脉冲间隔1ms，激光强度约10mJ条件下观测流动。对10个垂向位置纪录了流场图像，并用PIV方法分析速度场，最大速度达到0.22m/s。

(2) 磁性液体在Y型微流道混合实验：

观测磁性液体在Y型微流道（宽 $101.6\mu\text{m}$ 、深 $67.1\mu\text{m}$ 、长1cm）中的混合过程，流场观测范围在 $10\times$ 时达到 $800\mu\text{m}$ 。

(3)  $\phi 50\text{nm}$ 荧光粒子溶液静态观测：

利用PI物镜纳米定位仪，调节物镜焦平面位置，静态观测溶液中 $\phi 50\text{nm}$ 荧光粒子的灰度变化，在垂直方向 $0\sim 300\text{nm}$ 范围调节，精度为10nm。

最后所应说明的是，以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细说明，本领域的普通技术人员应当理解，对本发明的技术方案进行修改或者等同替换，都不脱离本发明技术方案的精神和范围，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

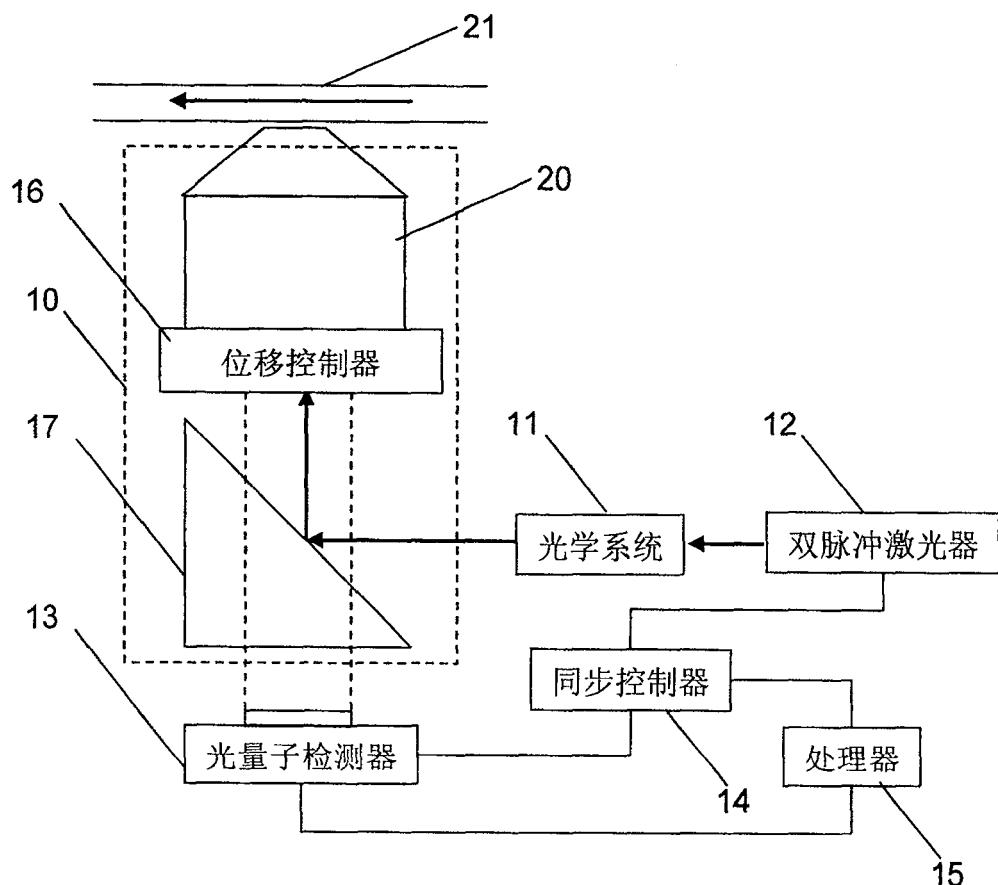


图 1