

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102589439 A

(43) 申请公布日 2012.07.18

(21) 申请号 201110456051.1

(22) 申请日 2011.12.16

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大  
直街 92 号

(72) 发明人 崔继文 李磊 杨福铃 李俊英  
谭久彬

(51) Int. Cl.

G01B 11/02 (2006.01)

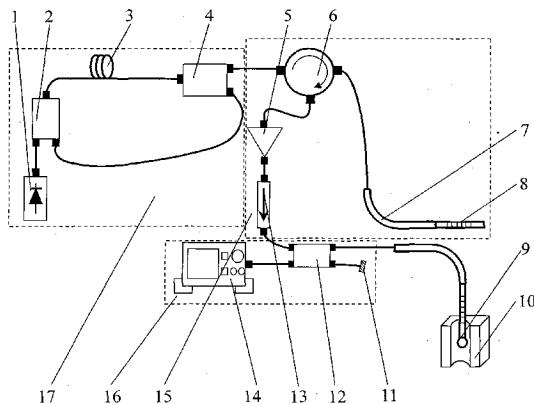
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 3 页

(54) 发明名称

基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维  
探测传感器

(57) 摘要

基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器属于精密仪器制造和精密测试计量技术领域；该传感器包括由泵浦激光器、WDM 耦合器、掺铒光纤和分束器组成的宽频光源系统、由 EDFA、第一环形器、导管、参考 FBG 和光纤阻隔器组成的温度补偿系统、探针和由光谱分析仪、光纤耦合器和折射率匹配液组成的信号接收系统装配构成，温度补偿系统的参考 FBG 放置在探针空间距离 30cm 内，本发明实现了三维传感，大幅度提高了传感器对环境的适应能力，具有结构简单、实时性好、易于实际应用的特点，在对微小内腔尺寸实施快速、超精密的测量与校准中具有显著优势。



1. 一种基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于本传感器由宽频光源系统（17）、温度补偿系统（15）、探针（9）和信号接收系统（16）构成；所述的宽频光源系统（17）包括泵浦激光器（1）、WDM耦合器（2）、掺铒光纤（3）和分束器（4），掺铒光纤（3）的两端分别与WDM耦合器（2）和分束器（4）连接，光纤分别将泵浦激光器（1）与WDM耦合器（2）、WDM耦合器（2）与分束器（4）连通；信号接收系统（16）由光谱分析仪（14）、光纤耦合器（12）和折射率匹配液（11）组成，光纤依次分别将光谱分析仪（14）与光纤耦合器（12）、光纤耦合器（12）与折射率匹配液（11）连通；EDFA（5）、第一环形器（6）、导管（7）、参考FBG（8）、光纤阻隔器（13）构成温度补偿系统（15），其中参考FBG（8）安装在导管（7）上，光纤依次分别将光纤阻隔器（13）与EDFA（5）、EDFA（5）与第一环形器（6）、第一环形器（6）与导管（7）连通，温度补偿系统（15）的参考FBG（8）放置在探针（9）空间距离30cm内；通过光纤将分束器（4）与第一环形器（6）、光纤耦合器（12）与光纤阻隔器（13）、光纤耦合器（12）与探针（9）连接，探针（9）置于待测微孔（10）内。

2. 根据权利要求1所述的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于宽频光源系统（17）由宽频光源（18）与掺铒光纤（19）连接构成。

3. 根据权利要求1所述的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于信号接收系统（16）由光功率计（20）、光纤耦合器（12）和折射率匹配液（11）构成，光纤依次分别将光功率计（20）与光纤耦合器（12）、光纤耦合器（12）与折射率匹配液（11）连接。

4. 根据权利要求1或3所述的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于信号接收系统（16）由光功率计（21）和第二环形器（22）组成，光纤将其连通。

5. 根据权利要求1所述的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于在信号接收系统（16）的将光纤耦合器（12）与折射率匹配液（11）相互连通的光纤末端上镀增透膜（23）。

6. 根据权利要求1或5所述的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于信号接收系统（16）的将光纤耦合器（12）与折射率匹配液（11）相互连通的光纤末端呈斜面（24）。

7. 根据权利要求1所述的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于探针（9）与温度补偿系统（15）的参考FBG（8）呈相互平行或者相交放置。

8. 根据权利要求1或7所述的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器，其特征在于探针（9）是单根FBG，且其末端呈微球体状。

## 基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器

### 技术领域

[0001] 本发明属于精密仪器制造及测量技术领域,特别涉及一种基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器。

### 背景技术

[0002] 随着航空航天工业、汽车工业、电子工业以及尖端工业等的不断发展,对于精密微小内腔构件的需求急剧增长。由于受到空间尺度的限制以及测量接触力的影响,微小内腔构件内尺寸的精密测量变得难以实现,尤其是测量深度难以提高,这些已然成为制约行业发展的“瓶颈”。为了实现更小的内尺寸测量、增加测量深度,最广泛使用的办法就是使用细长的探针深入微小内腔进行探测,通过瞄准发讯的方式测量不同深度上的微小内尺寸。因此,目前微小内尺寸的精密测量主要以坐标测量机结合具有纤细探针的瞄准发讯式探测系统为主,由于,坐标测量机技术的发展已经比较成熟,可以提供精密的三维空间运动,因此瞄准触发式探针的探测方式成为微小内腔尺寸探测系统设计的关键。

[0003] 目前,微小内腔尺寸测量的主要手段包括以下几种方法:

[0004] 1. 天津大学的杨世民教授等人提出了一种弹性尺寸传递理论,并依据此理论研制了膜片式盲小孔测头。该测头以膜片为敏感元件,并运用电容传感器来检测膜片的形变,把测杆视为弹性体,通过精密标定,可以自动补偿弹性测杆的变形误差。将此测头安装在三坐标测量机上,可对各种方向的通盲小孔进行接触测量,测出其任意截面的尺寸和形状误差。这种测头可以用于测量直径 0.3mm 以上、深径比达 30 的盲孔,测量的线性范围  $\pm 20 \mu m$ ,精度优于  $\pm 1 \mu m$ 。这种方法测头与测杆难以进一步小型化,且测头的最大非线性误差为  $0.2 \mu m$ ,测量精度难以进一步提高。

[0005] 2. 日本的 T. Masuzawa 等人利用硅加工的工艺制作了硅质微型探针,把探针作为阻抗元件接入电路中,提出一种振动扫描的方法进行孔径测量,把探针的机械变动量直接转变为电信号进行测量,能够对  $\Phi 100 \mu m$  孔径实施测量,测量深度为 0.2mm。这种测量方法由于采用了外加振动源,测量数据的漂移较大,另外,它的探针测头末端几何形状为矩形,测量孔时存在盲区,导致测量精度只能达到亚微米级。

[0006] 3. 德国联邦物理技术研究院的 H. Schwenke 教授等人提出了一种微光珠散射成像法,实现了对探针测头位置信息的二维检测。该方法利用单光纤作为探针测杆,把微光珠粘接或者焊接到测杆末端,使光线耦合进入光纤内部传播到微光珠上形成散射,用一个面阵 CCD 接收散射光形成敏感信号,实现了微力接触式测量。后来 H. Schwenke 教授等人拓展了这种方法,在测杆上粘接了一个微光珠,同时增加了一路对该微光珠的成像光路,这使得该探测系统具有了三维探测能力,测量标准球时得到的标准偏差为  $0.2 \mu m$ 。据相关报道,此方法实现测量  $\Phi 151 \mu m$  的孔径,测量深度为 1mm。这种方法在测量深孔过程中,由于微光珠散射角度较大,随着测量深度的增加,微光珠散射成像光斑的质量由于散射光线受到孔壁遮挡而逐渐降低,导致成像模糊,降低了测量精度,因此无法实施大深径比的高精度测量。

[0007] 4. 中国哈尔滨工业大学谭久彬教授和崔继文博士等人提出一种基于双光纤耦

合的探针结构,把两根光纤通过末端熔接球连接,熔接球作为测头,一根较长光纤引入光线,另外一根较短导出光线,克服了微光珠散射法测量深度的局限,可以实现对直径不小于0.01mm、深径比不大于50:1的微深孔测量时的精确瞄准。这种方法耦合球中存在相干光干涉,导致获取的信号信噪比较低,影响测量精度进一步提升。

[0008] 5. 美国国家标准技术研究院使用了单光纤测杆结合微光珠测头的探针,通过光学设计在二维方向上将光纤测杆成像放大35倍左右,用2个面阵CCD分辨接收二维方向上光纤测杆所成的像,然后对接收到的图像进行轮廓检测,从而监测光纤测杆的在测量过程中的微小移动,进而实现触发式测量,该探测系统的理论分辨力可以达到4nm,探测系统的探针测头直径为Φ75μm,实验中测量了Φ129μm的孔径,其扩展不确定度概算值达到了70nm(k=2),测量力为μN量级。这种方法探测分辨力高,测量精度高,使用的测头易于小型化,可以测量较大深径比的微孔。该方法的局限是成像单元对光纤测杆的微位移放大倍数较低(仅有35倍),必须通过图像算法进一步提高分辨力,探测光纤测杆的二维微位移必须使用两套成像系统,导致系统结构比较复杂,测量数据计算量比较大,这些因素导致探测系统的分辨力难以进一步提高,探测系统的实时性较差,系统构成比较复杂。

[0009] 6. 瑞士联合计量办公室研发了一个新型的坐标测量机致力于小结构件纳米精度的可追溯的测量。该测量机采用了基于并联运动学原理的弯曲铰链结构的新型接触式探针,该设计可以减小移动质量并且确保全方向的低硬度,是一个具有三维空间结构探测能力的探针。这一传感结构的测量力低于0.5mN,同时支持可更换的探针,探针测头的直径最小到Φ100μm。探测系统结合了一个由Philips CFT开发的高位置精度的平台,平台的位置精度为20nm。该测量系统测量重复性的标准偏差达到5nm,测量结果的不确定度为50nm。该种方法结构设计复杂,同时要求测杆具有较高的刚度和硬度,否则难以实现有效的位移传感,这使得测杆结构难以进一步小型化,测量深径比同时受到制约,探测系统的分辨力难以进一步提高。

[0010] 7. 中国哈尔滨工业大学谭久彬教授和王飞等人提出了一种基于单光纤探针测杆的一维微焦准直的测量方法,该方法利用单光纤探针侧测杆的超大曲率与微柱面透镜的结构特点组建了点光源一维微焦准直成像光路,通过测量成像亮条纹的能量中心的位置与条纹宽度,从而获得光纤探针测杆的二维位移量信息,若对该装置如下配置:光纤探针测杆半径为10μm,其折射率n=1.7,像距l'=300mm,光电接收器像元尺寸为7μm,利用图像算法能够分辨0.1个像元的变化,其理论分辨力可达0.03nm。该方法所成像亮条纹的条纹宽度不易测量,同时在二维位移测量时,存在成像信息中的耦合问题,即成像亮条纹的能量中心的位置与条纹宽度的耦合问题。

[0011] 综上所述,目前微小内腔尺寸和二维坐标探测方法中,由于光纤制作的探针具有探针尺寸小、测量接触力小、测量深径比大、测量精度高的特点而获得了广泛关注,利用其特有的光学特性和机械特性通过多种方式实现了一定深度上的微小内尺寸的精密测量。现存测量手段主要存在的问题有:

[0012] 1. 探测系统的位移分辨力难以进一步提高。现存的探测系统的初级放大率较低,导致了其整体放大率较低,难以实现其位移分辨力的进一步提高。美国国家标准技术研究院采用的探测方法的光学测杆的光学光路放大倍率仅有35倍,较低的初级放大倍率导致了其位移分辨力难以进一步提高。

[0013] 2. 探测系统实时性差,难以实现精密的在线测量。美国国家标准技术研究院采用的探测方法必须使用两路面阵 CCD 接收信号图像,并且由于光纤测杆成像光路放大倍率仅有 35 倍,必须使用较复杂的图像算法才能实现对光纤测杆位移的高分辨力监测,这导致测量系统需要处理的数据量大大增加,降低了探测系统的实时性能,难以实现微小内腔尺寸和二维坐标测量过程中瞄准发讯与启、止测量的同步性。

[0014] 3. 二维位移方向探测能力不足。哈尔滨工业大学提出的基于单光纤探针测杆的一维微焦准直的测量方法在沿轴方向离焦探测时没有方向探测能力,从而无法实现全面的二维位移测量。

[0015] 4. 存在二维位移传感的耦合。哈尔滨工业大学提出的基于单光纤探针测杆的一维微焦准直的测量方法在二维位移传感时存在耦合,被测位移量为二维位时,该方法获得的二维信息之间有相关性,而且无法分离,导致二维测量存在很大误差,无法实现二维位移的准确测量。

## 发明内容

[0016] 本发明的目的是克服微小内尺度测量方法现有技术中存在的不足之处,提供一种适用于大深径比微小内尺度测量的基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器,利用光纤布拉格光栅受力后其中心波长发生相应改变的特性,通过检测光纤布拉格光栅(FBG)的返回光波信号变化来确定触测信号的发出与否,从而实现了一种全新的微纳内尺度的触测式测量,通过温度补偿系统消除了环境温度变化对测量的影响,大大提高了传感器对环境的适应能力。

[0017] 本发明的技术解决方案是:一种基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器由宽频光源系统、温度补偿系统、探针和信号接收系统构成;所述的宽频光源系统包括泵浦激光器、WDM 耦合器、掺铒光纤和分束器,掺铒光纤的两端分别与 WDM 耦合器和分束器连接,光纤分别将泵浦激光器与 WDM 耦合器、WDM 耦合器与分束器连通;信号接收系统由光谱分析仪、光纤耦合器和折射率匹配液组成,光纤依次分别将光谱分析仪与光纤耦合器、光纤耦合器与折射率匹配液连通;EDFA、第一环形器、导管、参考 FBG、光纤阻隔器构成温度补偿系统,其中参考 FBG 安装在导管上,光纤依次分别将光纤阻隔器与 EDFA、EDFA 与第一环形器、第一环形器与导管连通,温度补偿系统的参考 FBG 放置在探针空间距离 30cm 内;通过光纤将分束器与第一环形器、光纤耦合器与光纤阻隔器、光纤耦合器与探针连接,探针置于待测微孔内。

[0018] 所述的宽频光源系统由宽频光源与掺铒光纤连接构成。

[0019] 所述的信号接收系统由光功率计、光纤耦合器和折射率匹配液构成,光纤依次分别将光功率计与光纤耦合器、光纤耦合器与折射率匹配液连接。

[0020] 所述的信号接收系统由光功率计和第二环形器组成,光纤将其连通。

[0021] 在信号接收系统的将光纤耦合器与折射率匹配液相互连通的光纤末端上镀增透膜。

[0022] 信号接收系统的将光纤耦合器与折射率匹配液相互连通的光纤末端呈斜面。

[0023] 探针与温度补偿系统的参考 FBG 呈相互平行或者相交放置。

[0024] 探针是单根 FBG,且其末端呈微球体状。

[0025] 本发明的优点是：

[0026] 1. 传感器中的敏感元件对于沿轴方向作用力和垂轴方向作用力均会产生响应，因而可以实现三维空间位置信号探测，即本传感器具有三维探测能力。

[0027] 2. 本传感器利用 FBG 对于应力的超高灵敏性，通过对返回信号波形（峰峰值）的检测，从而实现了沿轴方向的分辨力可达到亚纳米级，垂轴方向可达到纳米级。

[0028] 3. 探针主要由单根 FBG 构成，光学探测信号仅在 FBG 内部传输，不受微孔内壁的影响，测量深径比可达 100 : 1，满足大深径比微孔测量要求。

[0029] 4. 传感器中设计有温度补偿系统，消除了环境温度变化对测量的影响，大大提高了传感器对环境的适应能力，适于深入对于传统测量工具无法正常工作的空间和环境，如狭小的半封闭空间及易燃易爆环境等进行精密测量，可适用于工业现场测量。

[0030] 5. 测量中数据处理简单，测量速度快，满足工业高速测量要求。

## 附图说明

[0031] 图 1 是基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器结构示意图；

[0032] 图 2 是宽频光源系统结构示意图；

[0033] 图 3 是信号接收系统结构示意图；

[0034] 图 4 是信号接收系统结构示意图；

[0035] 图 5 是与光纤耦合器相连的光纤结构示意图；

[0036] 图 6 是与光纤耦合器相连的光纤结构示意图；

[0037] 图中：1. 泵浦激光器，2. WDM 耦合器，3. 掺铒光纤，4. 分束器，5. EDFA，6. 第一环形器，7. 导管，8. 参考 FBG，9. 探针，10. 待测微孔，11. 折射率匹配液，12. 光纤耦合器，13. 光纤阻隔器，14. 光谱分析仪，15. 温度补偿系统，16. 信号接收系统，17. 宽频光源系统，18. 宽频光源，19. 掺铒光纤，20. 光功率计，21. 光功率计，22. 第二环形器，23. 增透膜，24. 斜面。

## 具体实施方式

[0038] 下面结合附图对本发明实施例作进一步详细描述：

[0039] 实施例 1：

[0040] 一种基于光纤布拉格光栅的接触式温度无感三维探测传感器由宽频光源系统 17、温度补偿系统 15、探针 9 和信号接收系统 16 构成；所述的宽频光源系统 17 包括泵浦激光器 1、WDM 耦合器 2、掺铒光纤 3 和分束器 4，掺铒光纤 3 的两端分别与 WDM 耦合器 2 和分束器 4 连接，光纤分别将泵浦激光器 1 与 WDM 耦合器 2、WDM 耦合器 2 与分束器 4 连通；信号接收系统 16 由光谱分析仪 14、光纤耦合器 12 和折射率匹配液 11 组成，光纤依次分别将光谱分析仪 14 与光纤耦合器 12、光纤耦合器 12 与折射率匹配液 11 连通；EDFA5、第一环形器 6、导管 7、参考 FBG8、光纤阻隔器 13 构成温度补偿系统 15，其中参考 FBG8 安装在导管 7 上，光纤依次分别将光纤阻隔器 13 与 EDFA5、EDFA5 与第一环形器 6、第一环形器 6 与导管 7 连通，温度补偿系统 15 的参考 FBG8 放置在探针 9 空间距离 30cm 内；通过光纤将分束器 4 与第一环形器 6、光纤耦合器 12 与光纤阻隔器 13、光纤耦合器 12 与探针 9 连接，探针 9 置于待测微孔 10 内。

[0041] 为了消除环境温度变化对位置测量的干扰，加入了温度补偿系统 15，即在探针 9

空间位置距离小于30cm加入了另一根参考光纤布拉格光栅8,当温度变化时,由于探针9与参考FBG8空间距离很近,所处环境相同,二者将对环境温度变化产生相同的响应,即探针9中的FBG与参考FBG8将产生相同的温度漂移。此时参考FBG8和探针9的FBG所反射的光波频谱将始终处于重叠状态,且不会随环境温度变化而变化,即此时接收系统16获得的返回光波峰峰值保持恒定;当探针9的末端接触到待测微孔10的侧壁后会产生挠曲变形(bending),会引起探针9中FBG反射中心波长的偏移,而参考FBG8的反射中心波长不变,因此参考FBG8和探针9的FBG的反射光波频谱重叠状态将会改变,即此时接收系统16获得的返回光波峰峰值将会迅速降低,从而实现温度无感的应力测量。

[0042] 本发明的工作过程如下:

[0043] 提前一小时打开泵浦激光器1,使宽带光源系统17发出的光束稳定。将探针9深入到待测微孔10内部,但不接触孔壁。调整光纤耦合器12使光谱分析仪14接收到信号的最大峰峰值不至于超过其量程。横向移动探针9,当光谱分析仪14接收到信号的峰峰值开始减小时传感器精确瞄准。宽带光源系统17产生的宽频光束经过第一环形器6进入参考FBG8,由参考FBG8反射回来的光波再经过第一环形器6,通过EDFA5进行放大,放大后的光波经过光纤耦合器12进入探针9,经过探针9中的FBG将二次反射的光通过光谱分析仪14进行接收。当探针9的末端接触到待测微孔10的侧壁后会产生挠曲变形(bending),引起探针9中FBG反射中心波长的偏移,但是参考FBG8的反射中心波长不变,因此参考FBG8和探针9的FBG反射光波频谱重叠状态将会改变,此时光谱分析仪14接收的返回光波峰峰值将会迅速降低,从而感知探针9与被测表面的接触情况。为了避免菲涅尔反射对有用信号的干扰,光纤耦合器12一段的光纤末端浸入折射率匹配液11中。

[0044] 实施例2:

[0045] 宽频光源系统17由宽频光源18和掺铒光纤19连接组成,宽频光源18直接产生宽频光束,经过掺铒光纤19进入后续的各个系统。本实施例的其他部件及工作原理均与实施例1相同。

[0046] 实施例3:

[0047] 信号接收系统16由光功率计20、光纤耦合器12和折射率匹配液11组成,经过探针9中的FBG反射的光通过光功率计20进行接收。当探针9的末端接触到待测微孔10的侧壁后会产生挠曲变形(bending),引起探针9中FBG反射中心波长的偏移,但是参考FBG8的反射中心波长不变,因此参考FBG8和探针9的FBG的反射光波频谱重叠状态将会改变,此时光功率计20接收的返回光波功率将会迅速降低,从而感知探针9与被测表面的接触情况。本实施例的其他部件及工作原理均与实施例1相同。

[0048] 实施例4:

[0049] 信号接收系统16由光功率计21和第二环形器22组成,并去除温度补偿系统中的光纤阻隔器13,第二环形器22可以阻止光波再次返回温度补偿系统15,从而替代光纤阻隔器13的作用。经过探针9中的FBG反射的光经过第二环形器22,再由光功率计21进行接收。本实施例的其他部件及工作原理均与实施例1相同。

[0050] 实施例5:

[0051] 为了避免菲涅尔反射对有用信号的干扰,信号接收系统16的将光纤耦合器12与折射率匹配液11相互连通的光纤末端上镀增透膜23,增透膜23裸露在空气中。本实施例

的其他部件及工作原理均与实施例 1 相同。

[0052] 实施例 6：

[0053] 为了避免菲涅尔反射对有用信号的干扰,信号接收系统 16 的将光纤耦合器 12 与折射率匹配液 11 相互连通的光纤末端呈斜面 24,其斜面 24 置于空气中。本实施例的其他部件及工作原理均与实施例 1 相同。

[0054] 实施例 7：

[0055] 探针 9 与温度补偿系统 15 的参考 FBG8 呈相互平行或者相交放置。

[0056] 实施例 8：

[0057] 探针 9 由单根 FBG 及其末端微球体组成。

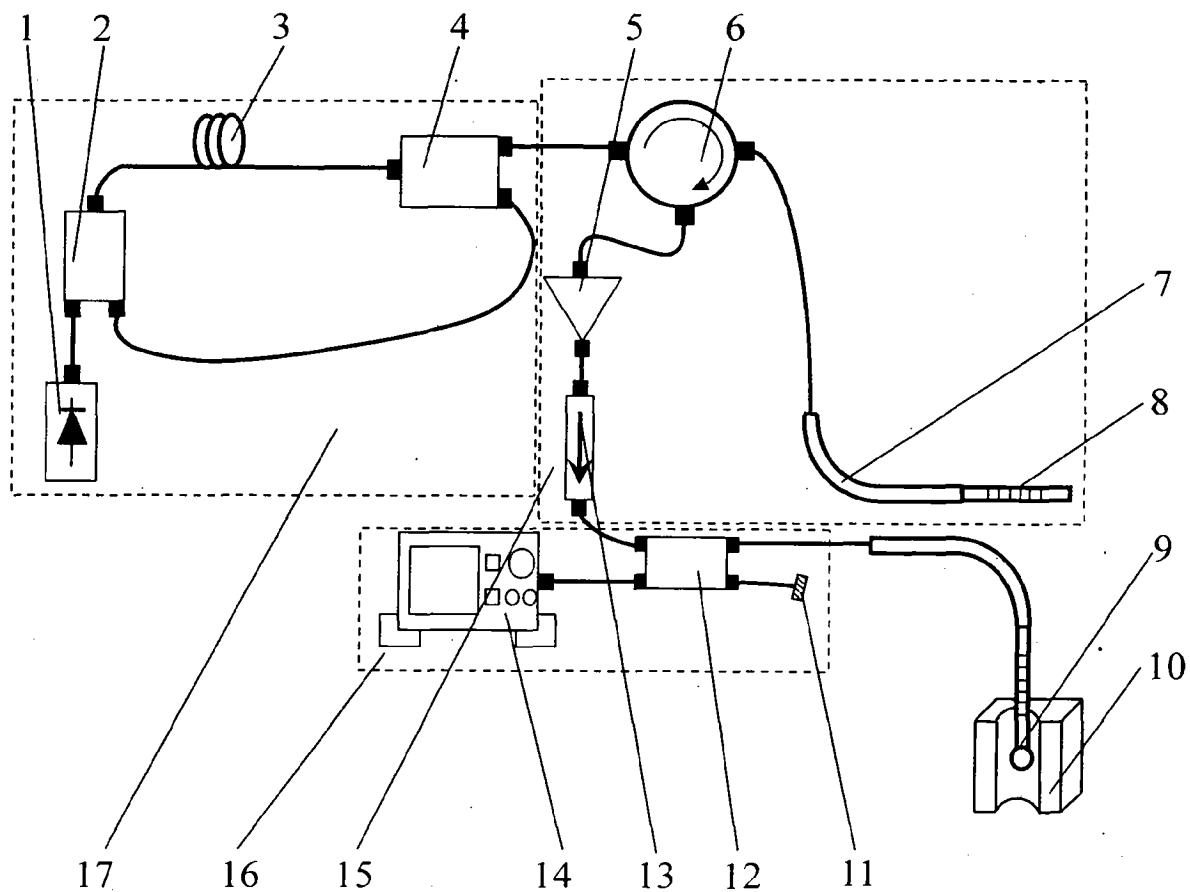


图 1

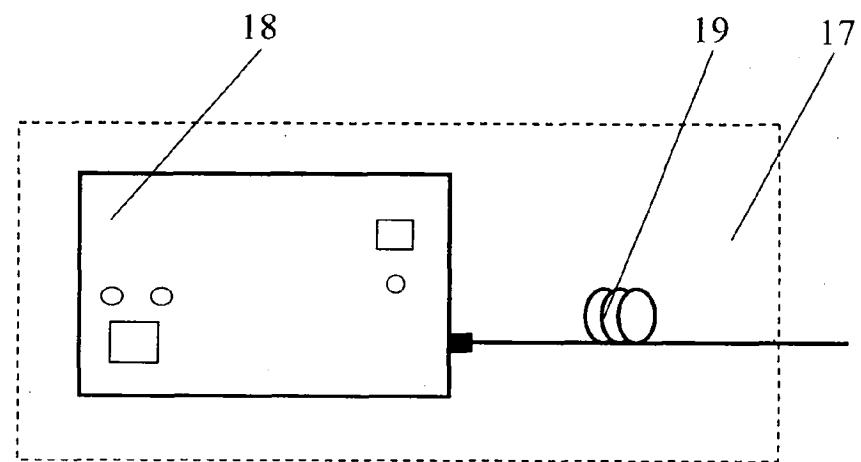


图 2

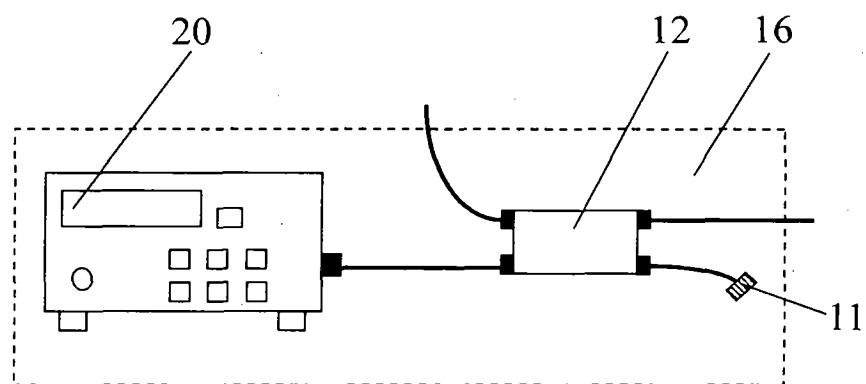


图 3

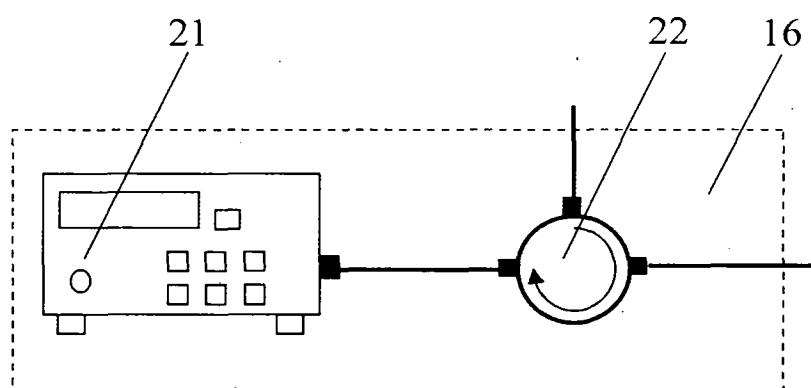


图 4

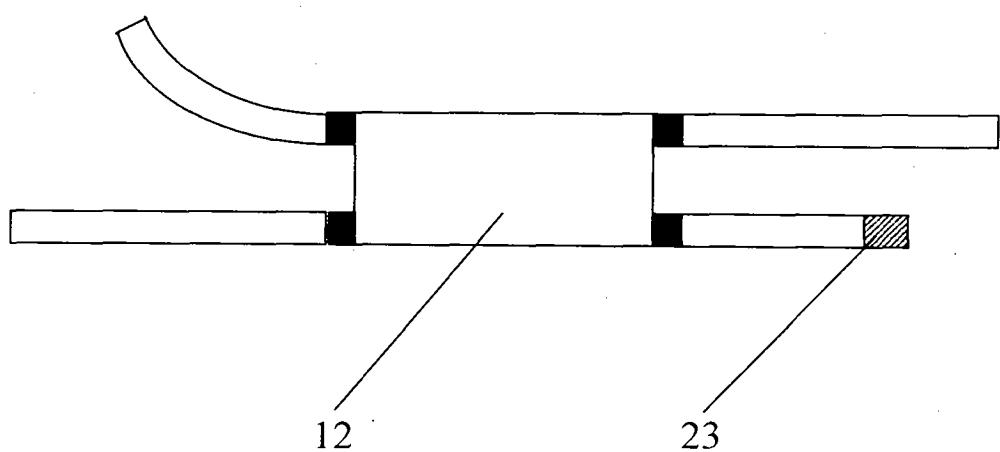


图 5

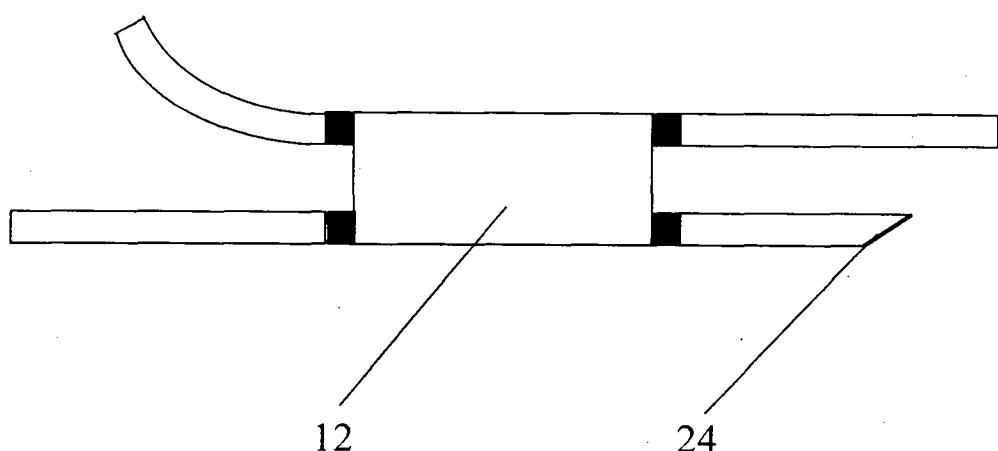


图 6