



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108627099 B

(45)授权公告日 2020.03.20

(21)申请号 201810708633.6

(22)申请日 2018.07.02

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108627099 A

(43)申请公布日 2018.10.09

(73)专利权人 清华大学
地址 100084 北京市海淀区100084信箱82
分箱清华大学专利办公室
专利权人 北京华卓精科科技股份有限公司

(72)发明人 张鸣 朱煜 杨富中 王磊杰
成荣 李鑫 叶伟楠 胡金春

(74)专利代理机构 北京鸿元知识产权代理有限公司 11327
代理人 李琳 张超艳

(51)Int.Cl.

G01B 11/02(2006.01)

(56)对比文件

CN 207487599 U,2018.06.12,
CN 106813578 A,2017.06.09,
US 6020964 A,2000.02.01,
CN 106017308 A,2016.10.12,
CN 106091940 A,2016.11.09,
CN 106091940 A,2016.11.09,

审查员 黄莉

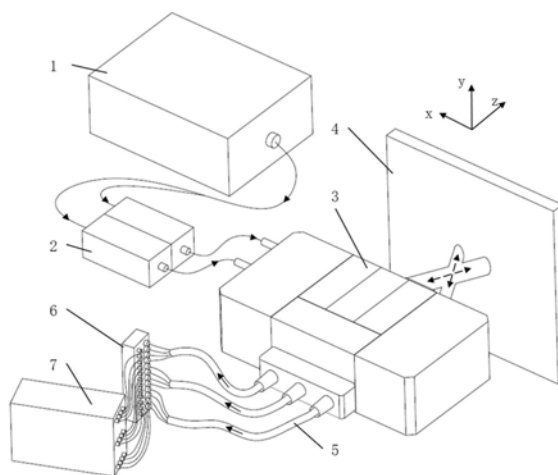
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

五自由度外差光栅干涉测量系统

(57)摘要

本发明提供一种五自由度外差光栅干涉测量系统,包括:单频激光器,用于发出单频激光,所述单频激光可分束为一束参考光和一束测量光;干涉仪镜组和测量光栅,用于将所述参考光和测量光形成参考干涉信号和测量干涉信号;多束光纤束,分别接收所述测量干涉信号和参考干涉信号,每束光纤束中有多根多模光纤,分别接收同一平面上不同位置处的干涉信号。该测量系统具有对环境不敏感、体积小、质量轻、便于布置等优点,采用多个五自由度干涉测量系统布置,利用冗余信息即可实现六自由度的超精密测量,适用于光刻机工件台等六自由度位置和姿态测量的需求。



1. 一种五自由度外差光栅干涉测量系统,包括:单频激光器(1),用于发出单频激光,所述单频激光分束为一束参考光和一束测量光;干涉仪镜组(3)和测量光栅(4),用于将所述参考光和测量光形成参考干涉信号和测量干涉信号,其特征在于,还包括:多束光纤束(5),分别接收所述测量干涉信号和参考干涉信号,每束光纤束(5)中有多根多模光纤,分别接收同一平面上不同位置处的干涉信号,

其中,所述干涉仪镜组(3)从一侧顶端到另一侧依次包括:反射镜(35)、折光元件(33)、1/4波片(34)、分光棱镜(31)和偏振分光棱镜(32),其中,所述分光棱镜(31)位于所述偏振分光棱镜(32)的上层;

其中,所述参考光经过所述分光棱镜(31)后分为三束,并通过所述偏振分光棱镜(32)反射后作为三路干涉信号的参考光;

所述测量光经过所述分光棱镜(31)后分为三束,其中两束测量光经过所述偏振分光棱镜(32)反射后,依次通过所述1/4波片(34)、所述折光元件(33)后入射至所述测量光栅(4),经光栅衍射后返回,再次经过所述偏振分光棱镜(32)透射后,与所述三路干涉信号的参考光中的两路干涉,形成两路测量干涉信号;

另一束测量光经过所述偏振分光棱镜(32)反射后,先通过所述1/4波片(34),然后经所述反射镜(35)反射后沿原光路返回,再次经过所述1/4波片(34)、经所述偏振分光棱镜(32)透射后与所述三路干涉信号的参考光中的另一路干涉,形成一路参考干涉信号。

2. 根据权利要求1所述的光栅干涉测量系统,其特征在于,所述参考干涉信号为一路,所述测量干涉信号为两路,所述两路测量干涉信号和一路参考干涉信号分别经所述光纤束(5)接收,每束光纤束(5)中有四根多模光纤,分别接收同一平面上不同位置处的干涉信号,每束多模光纤输出四个光信号,共十二路光信号。

3. 根据权利要求1或2所述的光栅干涉测量系统,其特征在于,所述测量光栅(4)相对于所述干涉仪镜组(3)做水平向和垂向两个自由度的线性运动,以及三个转角运动。

4. 根据权利要求1所述的光栅干涉测量系统,其特征在于,所述干涉仪镜组(3)中各组件之间邻接固定,集成为一体化结构。

5. 根据权利要求1所述的光栅干涉测量系统,其特征在于,所述折光元件(33)截面为等腰梯形,所述测量光经梯形两侧透射时发生折射,经梯形顶部透射时发生反射。

6. 根据权利要求1所述的光栅干涉测量系统,其特征在于,所述其中两束测量光经所述折光元件(33)后,以特定角度的入射光路至所述测量光栅(4),所述特定角度使得衍射光路与所述入射光路重合,所述衍射光路经过所述折光元件(33)与所述三路干涉信号的参考光中的两路平行干涉,形成两路测量干涉信号。

7. 根据权利要求1所述的光栅干涉测量系统,其特征在于,所述干涉测量系统还包括声光调制器(2),用于对分束后的所述单频激光进行移频。

8. 根据权利要求2所述的光栅干涉测量系统,其特征在于,所述干涉测量系统还包括光电转换单元(6)和电子信号处理部件(7),其中:

所述光电转换单元(6)用于接收所述光纤束(5)传输的光信号并转换为电信号,以输入至所述电子信号处理部件(7);

所述电子信号处理部件(7)接收所述电信号,用以解算所述测量光栅(4)的线性位移和/或转角运动。

五自由度外差光栅干涉测量系统

技术领域

[0001] 本发明涉及干涉测量技术领域,更具体地,涉及一种五自由度外差光栅干涉测量系统。

背景技术

[0002] 干涉测量系统作为一种典型的位移传感器具有对长度的可追溯性、测量精度高、测量范围大、动态测量范围大、易于安装和调试等优点,而被广泛应用于精密和超精密测量领域,常见于精密机械和加工设备中。目前干涉测量系统主要可以分为激光干涉测量系统和光栅干涉测量系统,激光干涉测量系统是基于激光干涉的测量原理,而光栅干涉测量系统基于衍射干涉原理,其测量基准为光栅的栅距,对环境波动的敏感性相对较低,重复测量精度更高。

[0003] 工业应用中普遍采用的干涉仪只能实现单个方向的位移测量,目前现有的商用干涉仪测量精度通常可以达到纳米量级,实现较高的测量精度,但在实际测量过程中,往往会受到如阿贝误差和余弦误差等几何安装误差的影响,造成测量结果的不准确;且在运动过程中,由于振动等引起的微小转角带来的附加位移无法避免。随着精密机械的不断进步,测量精度、测量距离、测量速度等运动指标的不断提高,如在光刻机超精密工件台的位置测量系统中,多自由度测量的需求逐渐提升。

[0004] 针对上述问题,通常方法是采用多个单自由度激光测量系统组成分布式的多自由度测量系统,如荷兰ASML公司美国专利US 6020964B2(公开日2000年2月1日)、日本Nikon公司美国专利US 6980279B2(公开日2005年12月27日)、美国Agilent公司美国专利US 7355719B2(公开日2008年4月8日)中均采用类似的六自由度测量系统,即水平方向上布置多轴激光干涉仪,利用 45° 反射镜将测量光引入Z轴,侧面和Z向安装反射镜,利用位移差分计算转角,实现六自由度测量,但分布式的干涉测量系统占用空间大、安装调整困难,难以满足测量需求。光栅干涉测量系统中,常见的为二自由度测量系统如德国Heidenhain公司美国专利US0058173A1(公开日2007年3月15日),而无法实现更多自由度的同时测量。其他如Lee等基于二自由度光栅干涉测量系统,利用PSD和特定光路结构提出的一种简单的六自由度同时测量方法[C.B.Lee,G.H.Kim,and S.K.Lee,“Design and construction of a single unit multi-function optical encoder for a six-degree-of-freedom motion error measurement in an ultra-precision linear stage”,Meas.Sci.Technol,2011],但测量系统的结构较复杂,多自由度的测量依赖于特定的光路结构,测量的一致性和稳定性较差,并且测量精度很大程度上受限于探测器性能,一般转角测量精度只能达到角秒量级,位移测量精度只能达到微米量级,难以满足超精密测量系统的性能要求。

发明内容

[0005] 考虑到上述技术方案的局限,寻求一种精密五自由度外差光栅干涉测量系统,该测量系统具有光学结构简单紧凑,便于实际安装操作,稳定性及经济性均较好等优点。该光

栅干涉测量系统能够实现纳米和亚微弧度的分辨率,且能够同时测量两个直线位移和三个较小行程的旋转。该测量系统能够有效的降低分布式干涉测量系统在超精密工件台应用中的不足,使光刻机超精密工件台性能提升。此外,该光栅干涉测量系统还能应用于精密机床、三坐标测量机、半导体检测设备等的工件台多自由度位移的精密测量等需要大行程直线位移和多自由度测量的场合。

[0006] 本发明所采用的技术方案为:

[0007] 一种五自由度外差光栅干涉测量系统,包括:单频激光器1,用于发出单频激光,所述单频激光可分束为一束参考光和一束测量光;干涉仪镜组3和测量光栅4,用于将所述参考光和测量光形成参考干涉信号和测量干涉信号;多束光纤束5,分别接收所述测量干涉信号和参考干涉信号,每束光纤束5中有多根多模光纤,分别接收同一平面上不同位置处的干涉信号。

[0008] 进一步的,所述参考干涉信号为一路,所述测量干涉信号为两路;所述两路测量干涉信号和一路参考干涉信号,分别经所述光纤束5接收,每束光纤束5中有四根多模光纤,分别接收同一平面上不同位置处的干涉信号,每束多模光纤输出四个光信号,共十二路光信号。

[0009] 进一步的,所述测量光栅4可相对于所述干涉仪镜组3做水平向和垂向两个自由度的线性运动,以及三个转角运动。

[0010] 进一步的,所述干涉仪镜组3从一侧顶端向相对另一侧依次包括:反射镜35、折光元件33、1/4波片34、分光棱镜31和偏振分光棱镜32,其中,所述分光棱镜31位于所述干涉仪镜组3上层,所述偏振分光棱镜32位于干涉仪镜组3下层。

[0011] 进一步的,所述参考光经过所述分光棱镜31后分为三束,并通过所述偏振分光棱镜32反射后作为三路干涉信号的参考光;

[0012] 所述测量光经过所述分光棱镜31后分为三束,其中两束测量光经过所述偏振分光棱镜32反射后,依次通过所述1/4波片34、所述折光元件33后入射至所述测量光栅4,经光栅衍射后返回,再次经过所述偏振分光棱镜32透射后,与所述三路干涉信号的参考光中的两路干涉,形成两路测量干涉信号;

[0013] 另一束测量光经过所述偏振分光棱镜32反射后,先通过所述1/4波片34,然后经所述反射镜35反射后沿原光路返回,再次经过所述1/4波片34、经所述偏振分光棱镜32透射后与与所述三路干涉信号的参考光中的另一路干涉,形成一路参考干涉信号。

[0014] 进一步的,所述干涉仪镜组3中各组件之间紧密邻接固定,集成为一体化结构。

[0015] 进一步的,所述折光元件33截面为等腰梯形,所述测量光经梯形两侧透射时发生折射,经梯形顶部透射时发生反射。

[0016] 进一步的,所述其中两束测量光经所述折光元件33后,以特定角度的入射光路至所述测量光栅4,所述特定角度使得衍射光路与所述入射光路重合,所述衍射光路经过所述折光元件33与所述三路干涉信号的参考光中的两路平行干涉,形成两路测量干涉信号。

[0017] 进一步的,所述干涉测量系统还包括声光调制器2,所述声光调制器2用于对分束后的所述单频激光进行移频。

[0018] 进一步的,所述干涉测量系统还包括光电转换单元6和电子信号处理部件7,其中:所述光电转换单元6用于接收所述多模光纤5传输的光信号并转换为电信号,以输入至所述

电子信号处理部件7；

[0019] 所述电子信号处理部件7接收所述电信号，用以解算所述测量光栅4的线性位移和/或转角运动。

[0020] 与现有技术相比，本发明所提供的一种精密五自由度外差光栅干涉测量系统，具有以下优点：

[0021] (1) 本发明的测量系统能够实现包括两个平动位移和三个转角在内的五自由度同时测量，极大提高测量效率的同时，环境敏感度低，测量信号易于处理，分辨率与精度可达纳米甚至更高。

[0022] (2) 本发明测量系统的体积小，集成度高，有效地提高了空间利用率和整个应用系统的集成度。

[0023] (3) 本发明测量系统对比以往的多自由干涉测量系统，在满足测量精度要求的基础上，可有效的避免了单自由度测量时存在的由于干涉仪和运动单元间几何安装误差对测量精度的影响。

附图说明

[0024] 通过参考以下具体实施方式及权利要求书的内容并且结合附图，本发明的其它目的及结果将更加明白且易于理解。在附图中：

[0025] 图1为本发明所述五自由度外差光栅干涉测量系统的示意图；

[0026] 图2为本发明所述干涉仪镜组的结构示意图；

[0027] 图3为本发明所述光纤束的示意图；

[0028] 图4为本发明图3的A向示意图。

[0029] 图中，1—单频激光器，2—声光调制器，3—干涉仪镜组，4—测量光栅，5—光纤束，6—光电转换单元，7—电子信号处理部件；31—分光棱镜，32—偏振分光棱镜，33—折光元件，34—1/4波片，35—反射镜。

具体实施方式

[0030] 下面将结合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。

[0031] 在本发明的描述中，需要说明的是，术语“中心”、“上”、“下”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。此外，术语“第一”、“第二”、“第三”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0032] 在本发明的描述中，需要说明的是，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或一体地连接；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0033] 图1为本发明所述五自由度外差光栅干涉测量系统的示意图,如图1所示,所述五自由度外差光栅干涉测量系统包括单频激光器1、声光调制器2、干涉仪镜组3、测量光栅4、光纤束5、光电转换单元6和电子信号处理部件7。优选地,所述测量光栅4为一维反射型光栅。

[0034] 图2为本发明所述干涉仪镜组的结构示意图,如图2所示,干涉仪镜组3从一侧顶端向相对另一侧(图2中从左侧向右侧,或从靠近测量光栅4的一侧向相对另一侧)依次包括:反射镜35、折光元件33、1/4波片34、分光棱镜31和偏振分光棱镜32,其中,分光棱镜31位于干涉仪镜组上层,偏振分光棱镜32位于干涉仪镜组下层,折光元件33位于干涉仪镜组一侧顶端附近(图2中左侧顶端附近),为实现高度一体化集成,优选地将干涉仪镜组3中各组件之间紧密邻接固定,集成为一体化结构,更为优选地,各组件之间均采用粘接的方式固定。

[0035] 图3为本发明所述光纤束的截面示意图,图4为本发明图3的A向示意图,如图3和4所示,每束光纤束5包括四根多模光纤。位于同一平面内的不同位置,用于接收不同空间位置处的干涉信号,经光纤传输后产生四个独立的光信号。

[0036] 结合图1和图2详细说明光栅干涉测量系统的原理,具体地:

[0037] 单频激光器1出射单频光,经光纤耦合、光线分束器分束后入射至声光调制器2移频,并经格林透镜准直后得到两路带有频差的偏振光s光,其中一路作为参考光,一路作为测量光。

[0038] 参考光经过上层分光棱镜31两次分光后得到三束激光,向下入射经过偏振分光棱镜反射后作为三路干涉信号的参考光。

[0039] 测量光经过分光棱镜31分光后同样得到三束激光向下入射,其中两路经过偏振分光棱镜32反射后,依次通过1/4波片34,折光元件33偏转后入射至测量光栅4,经光栅衍射后, ± 1 级衍射光中包含光栅的转角和位移信息,沿原光路返回,再次经过1/4波片34,偏振分光棱镜32透射后与参考光干涉,形成两路测量干涉信号;另一路测量光经过偏振分光棱镜32反射,依次通过1/4波片34,反射镜35反射后沿原光路返回,再次经过1/4波片34,偏振分光棱镜32透射后与参考光干涉,形成参考干涉信号。

[0040] 优选地,本发明光路采用利特罗式布置,即所述测量光经折光元件33后偏转后,测量光以特定角度入射至测量光栅4,使得衍射光路与入射光路重合,衍射光路经过折光元件33形成与参考光平行的测量光,再次通过1/4波片34,偏振分光棱镜32透射后与参考光干涉,形成两路测量信号。

[0041] 所述两路测量干涉信号和一路参考干涉信号,分别经三束光纤束5接收,每束光纤束内部含有四根多模光纤,采集同一干涉信号不同空间位置处的光信号,一共有十二根光纤,共形成十二路信号,传输至光电转换单元6转换为电信号,并输入至电子信号处理部件7进行处理,利用得到的相位信息,基于差分波前原理即可解算出光栅的转角信息,同时实现三个转动角度的测量;根据所得转角对附加位移引起的相位进行补偿,解算二自由度线性运动。所述测量光栅4相对于干涉仪镜组3做水平向和垂向两个自由度的线性运动,和三个转角运动时,电子信号处理部件7将输出二自由度线性位移和转角运动。

[0042] 五自由度运动解算的表达式为

$$[0043] \quad \theta_x = \frac{(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_6) - (\phi_3 + \phi_4 + \phi_7 + \phi_8)}{\Gamma_x}$$

$$[0044] \quad \theta_y = \frac{(\phi_1 + \phi_3 + \phi_5 + \phi_7) - (\phi_2 + \phi_4 + \phi_6 + \phi_8)}{\Gamma_y}$$

$$[0045] \quad \theta_z = \frac{(\phi_1 + \phi_2 + \phi_7 + \phi_8) - (\phi_3 + \phi_4 + \phi_5 + \phi_6)}{\Gamma_z}$$

$$[0046] \quad x = \left[\frac{(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4) - (\phi_5 + \phi_6 + \phi_7 + \phi_8)}{4} + \phi_{x\theta} \right] \times \frac{p}{4\pi}$$

$$[0047] \quad z = \left[\frac{(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4) + (\phi_5 + \phi_6 + \phi_7 + \phi_8)}{4} + \phi_{z\theta} \right] \times \frac{\lambda}{8\pi \cos \theta}$$

[0048] 式中, $\theta_{x,y,z}$ 为光栅转角, x, z 为光栅位移, $\phi_{1,2,3,4,5,6,7,8}$ 为电子信号处理卡读数, $\Gamma_{x,y,z}$ 为标定常数, $\phi_{x\theta, z\theta}$ 为附加位移补偿相位, p 为光栅的栅距, λ 为激光波长, θ 为利特罗角。

[0049] 上述实施方式中给出的测量系统及结构方案能够实现三个转动自由度和两个线性自由度的同时测量, 且系统测量光路短, 受环境影响很小, 测量系统采用光纤束可有效的减少系统部件数量, 提高系统的抗干扰能力和系统集成性, 测量信号易于处理, 转角的测量分辨率可达微弧度, 线性位移的测量分辨率可达 nm 级; 同时该光栅干涉仪测量系统还具有结构简单, 体积小, 质量轻, 易于安装和布置, 应用方便等优点。应用于光刻机超精密工件台的位移测量, 对比激光干涉仪测量系统, 在满足测量需求的基础上, 可有效的降低工件台体积、质量, 大大提高工件台的动态性能, 使工件台整体性能综合提高。该五自由度外差光栅干涉测量系统还可应用于精密机床、三坐标测量机、半导体检测设备等的工件台多自由度位移的精密测量中。采用多个五自由度干涉测量系统布置, 利用冗余信息即可实现六自由度的超精密测量, 适用于光刻机工件台等六自由度位置和姿态测量的需求。

[0050] 尽管前面公开的内容示出了本发明的示例性实施例, 但是应当注意, 在不背离权利要求限定的范围的前提下, 可以进行多种改变和修改。此外, 尽管本发明的元素可以以个体形式描述或要求, 但是也可以设想具有多个元素, 除非明确限制为单个元素。

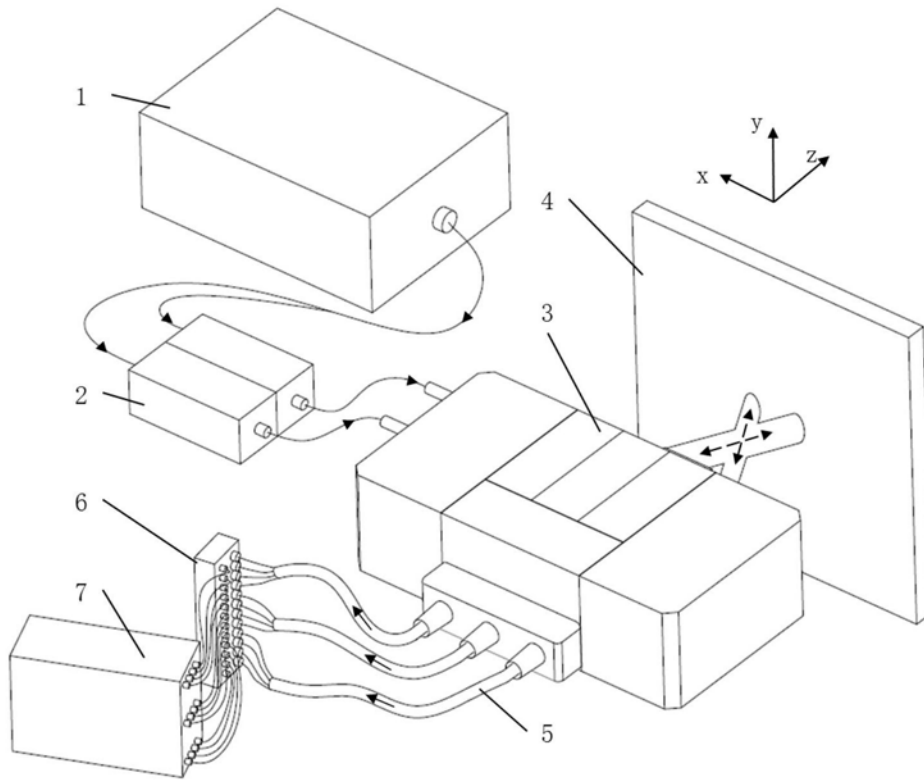


图1

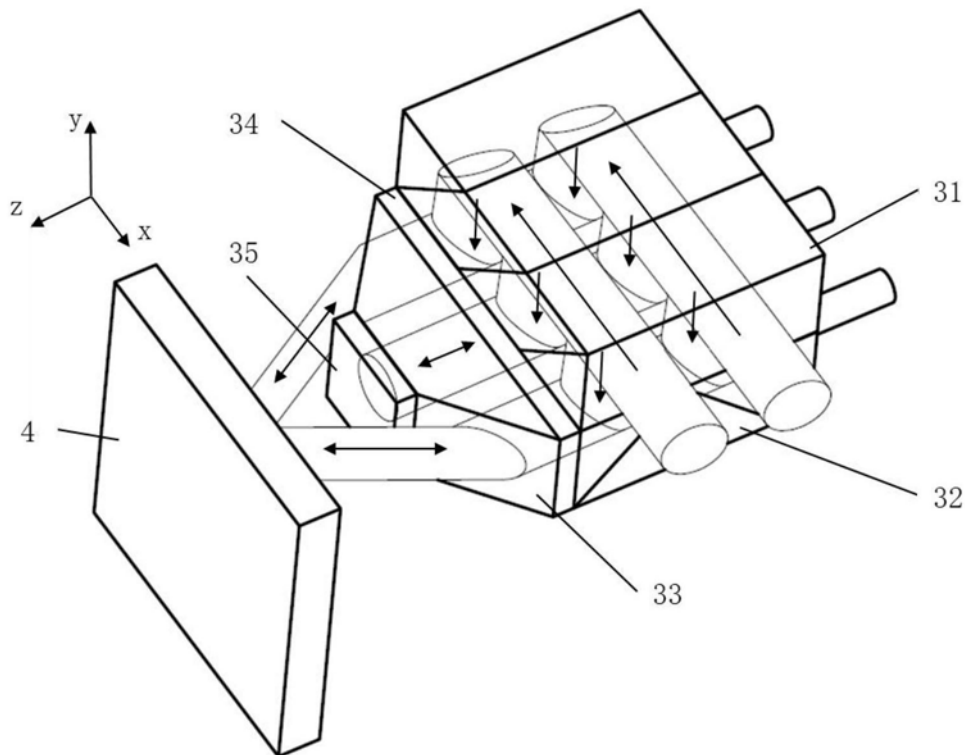


图2

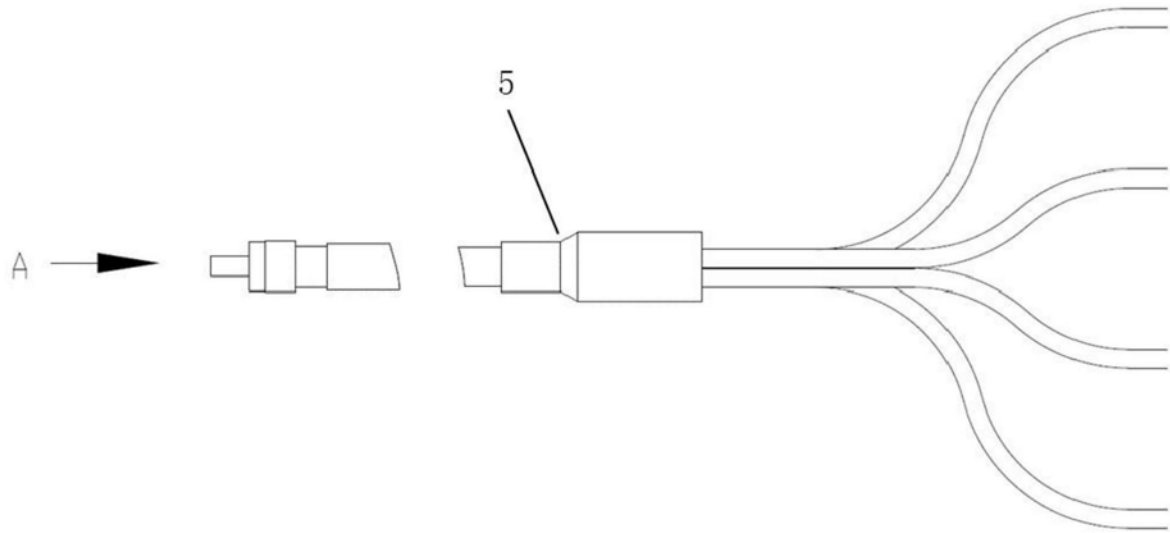


图3

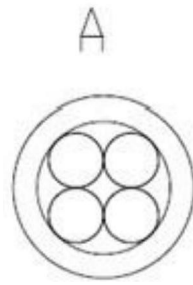


图4