



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105277135 B

(45)授权公告日 2018.04.03

(21)申请号 201510604502.X

CN 103712575 A,2014.04.09,

(22)申请日 2015.09.22

CN 203148398 U,2013.08.21,

(65)同一申请的已公布的文献号

JP 2007248213 A,2007.09.27,

申请公布号 CN 105277135 A

冯向荣 张兵.基于七芯光纤的高温传感器优化与设计.《光器件》.2015,

(43)申请公布日 2016.01.27

赵宇 等.基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究.《中国激光》.2010,

(73)专利权人 东北大学

审查员 楚显玉

地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路  
东3巷11号东北大学

(72)发明人 赵勇 蔡露 李晋 胡海峰

(51)Int.Cl.

G01B 11/24(2006.01)

(56)对比文件

CN 103712575 A,2014.04.09,

CN 102538702 A,2012.07.04,

CN 103345020 A,2013.10.09,

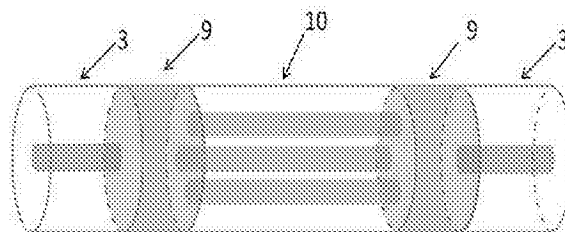
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54)发明名称

一种具有温度不敏感特性的高灵敏度光纤曲率传感结构

(57)摘要

本发明提出了一种具有温度不敏感特性的高灵敏度光纤曲率传感结构,以三芯光纤为中心敏感元件,三芯光纤的三个纤芯为等边三角形排列。宽谱光经过单模光纤3进入多模光纤9,激发出多个传输模式,传输模场变大,随后进入三芯光纤10,三个纤芯模式独立传输距离L后重新进入多模光纤9,此时三个模式的光发生干涉,光信号被调制,再以单模形式在单模光纤3中继续向前传播,最终被光谱分析仪2记录。通过检测干涉光谱的移动量可以推算出曲率的变化量。实验结果表明,该光纤传感结构可以测量弯曲曲率,并得到了良好的线性特性,在曲率范围为 $2.79 \text{ m}^{-1} \sim 3.24 \text{ m}^{-1}$ 时测量灵敏度可达 $-28.29 \text{ nm/m}^{-1}$ 。



1.一种具有温度不敏感特性的高灵敏度光纤曲率传感结构,其特征在于:该光纤曲率传感结构是以单模三芯光纤为中心敏感元件的全光纤结构,为了提高基模与三个芯模间的耦合效率,在普通单模传输光纤与单模三芯光纤间各熔接一段长为2mm直径125 $\mu$ m的无芯多模光纤作为桥梁,基于三芯光纤三个基模间的干涉原理,利用三个独立纤芯的折射率因弯曲时引起的弹光效应而改变这一特点实现高灵敏度的曲率测量。

## 一种具有温度不敏感特性的高灵敏度光纤曲率传感结构

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种具有温度不敏感特性的高灵敏度光纤曲率传感结构,属于光纤传感器技术领域。

### 背景技术

[0002] 在工业、制造业和建筑业等许多领域中,如机械手臂、建筑结构健康监测、桥梁建设、机械零件加工、微机电系统等,曲率是一个非常重要的参数。但由于在实际中很难被直接测量,而是通过结构的应变等信息来间接地推算出曲率信息,所以使得曲率的直接测量成为一个难题。传统上有多种方法可获得结构的弯曲形变大小,但大都受到一定条件的制约,比如形变后无法恢复,不适用于埋入式测量等。因此,光纤曲率传感器以其具有体积小,质量轻,易弯曲且适用于埋入式分布测量的优点应运而生。目前用于曲率测量的光纤传感器,一般采用光纤光栅、长周期光纤光栅的波长位移检测技术,将曲率变化转化为应变的变化来进行测量,这些方法系统复杂,造价昂贵,受外界环境(如温度等)的影响较大,会出现交叉敏感的问题。

[0003] 近几年来,模间干涉光纤传感技术作为一种新型的光纤传感技术由于具有高灵敏度,制作工序简单,成本低的优点而越来越得到国内外学者的广泛关注,利用模间干涉的原理测量曲率的方法得到迅速发展。2011年,Yuan Gong等人提出将单模光纤-多模光纤-单模光纤结构的模间干涉光纤传感器结构贴在可弯曲的金属横梁上来测量横梁的曲率(文献1.Y.Gong,T.Zhao,Y.J.Rao,and Y.Wu.“All-fiber curvature sensor based on multimode interference.”IEEE Photonics Technology Letters,2011,23(11):679-68.)。同年,葡萄牙的Susana Silva提出一种温度和应变不敏感的模间干涉光纤曲率传感器(文献2.S.Silva,O.Frazao,J.Viegas,L.A.Ferreira,F.M.Araujo,F.Xavier Malcata,and J.L.Santos.“Temperature and strain-independent curvature sensor based on a singlemode/multimode fiber optic structure.”Measurement Science&Technology,2011,22(8):85201-85206.)。通过同时检测透射谱中两个明显波谷来消除温度交叉敏感的影响。在测量曲率方面,多芯光纤的应用在光纤曲率传感器中占有一席之地。通过检测多芯光纤内多个芯模间的干涉相位的改变可以获得曲率信息。较早时期的多芯光纤干涉仪是相位调制型的,比如英国赫瑞瓦特大学的M.J.Gander等人搭建四芯光纤反射式空间光路系统,光经过物镜聚焦后耦合进四芯光纤,出射光光斑打在远场处,形成干涉光斑,改变光纤弯曲的角度并用CCD阵列记录光斑的变化,经过信号处理后可提取出干涉相位的变化(文献3.M.J.Gander,D.Macrae,E.A.C.Galliot,R.McBride,J.D.C.Jones,P.M.Blanchard,J.G.Burnett,A.H.Greenaway,and M.N.Inci.“Two-axis bend measurement using multicore optical fibre.”Optics Communications,2000,182(1-3):115-121.)。但是空间光路体积庞大,易受外界干扰,解调系统过于复杂。随着解调技术的发展,波长解调摒弃了复杂的CCD解调系统,多芯光纤波长解调干涉仪成为一种更适用于传感的新型传感结构。Chunying Guan在2015年发表的一篇文章中提出一种基于五芯光纤的应变和曲率传感器

(文献4.C.Guan,X.Zhong,G.Mao,T.Yuan,J.Yang,and L.Yuan.“In-line Mach-Zehnder interferometric sensor based on a linear five-core fiber.”IEEE Photonics Technology Letters,2015,27(6):635-638.),五个纤芯一字型排列形成非中心对称结构,曲率灵敏度可达 $10.37\text{nm}/\text{m}^{-1}$ 。这种方法虽然运用了五芯光纤,但各纤芯能量分布不均,边缘纤芯模能量微弱,并不能很好的应用于传感,获得高灵敏度。

## 发明内容

[0004] (一)要解决的技术问题

[0005] 本发明的目的在于克服已有光纤曲率传感器容易受温度影响的不足,提出一种结构简单、易于制备且能实现高灵敏度测量的模间干涉曲率传感结构。

[0006] (二)技术方案

[0007] 为了达到上述目的,本发明提出一种具有温度不敏感特性的高灵敏度光纤曲率传感结构,研究了这种新型光纤曲率传感结构的曲率和温度特性。该结构以三芯光纤为中心敏感元件,在两端的单模光纤与三芯光纤之间熔接两段多模光纤作为桥梁,以获得高质量的干涉光谱,同时抑制包层模式的干扰。实验中,宽谱光源1发出宽谱光,宽谱光经由单模跳线3入射进多模—三芯—多模光纤结构5之后光信号被调制,三芯光纤内芯模间发生干涉,产生的干涉光谱由光谱分析仪2探测。用两个三维位移调整台7作为光纤曲率的给进单元,一对夹持器4将光纤夹紧,通过调整三个方向的螺旋测微器6使光纤与实验台8平行且与水平位移给进方向保持一致,当位移调整台在水平方向产生位移时,光纤随之弯曲,曲率改变。将该结构放置于恒温箱中即可改变其温度。通过搭建该实验装置进行测量证实了该结构具有低灵敏度的温度响应,高灵敏度的曲率响应以及高质量的干涉光谱。

[0008] 上述方案中,所述的三芯光纤模间干涉曲率传感结构可以由光纤切刀和光纤熔接机制作完成。单模光纤与多模光纤端面切平之后由自动熔接功能完成,多模光纤与三芯光纤端面切平之后由手动熔接功能完成,熔接参数为:放电强度100;放电时间3000ms;Z方向推进距离 $15\mu\text{m}$ ;方向退回距离 $0\mu\text{m}$ 。

[0009] 上述方案中,所述的三芯光纤模间干涉曲率传感结构,多模光纤与三芯光纤长度分别为2mm和12cm,多模光纤采用无芯多模光纤,直径 $125\mu\text{m}$ ,三芯光纤外包层直径是与之相匹配的 $125\mu\text{m}$ ,三个纤芯均为单模纤芯,模场直径为 $10.34\mu\text{m}$ 。

[0010] 上述方案中,所述的三芯光纤模间干涉曲率传感结构中,三芯光纤的三个纤芯是以包层圆心为中心呈等边三角形排列的,纤芯间的圆心距大于 $20\mu\text{m}$ 。

[0011] 上述方案中,所述的三芯光纤模间干涉曲率传感结构中,三芯光纤的三个纤芯具有一定折射率差且它们的热光系数非常相近。

[0012] 上述方案中,所述实验装置是由波长范围在 $1525\text{nm}\sim 1565\text{nm}$ 的放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission,ASE)光源1,波长分辨力为 $0.02\text{nm}$ 的光谱分析仪2和一对精度为 $10\mu\text{m}$ 的三维位移调整台7组成的。

[0013] 上述方案中,所述实验装置通过改变光纤弧的弦长间接改变其曲率,其几何关系可选用近似公式来描述,x为螺旋测微器的推进量, $L_0$ 为原始弦长。

[0014] (三)有益效果

[0015] 从上述技术方案可以看出,本发明具有以下有益效果:

[0016] 1) 利用三芯光纤模间干涉的原理测量曲率要比其他光纤曲率传感技术具有更高的灵敏度,更低廉的成本,更简单的制作过程,且结构紧凑,参数多样,更适用于实际应用。

[0017] 2) 本发明提供的这种利用三芯光纤模间干涉的原理测量曲率的结构,通过在三芯光纤与单模光纤之间引入多模光纤使更多光进入三芯光纤的纤芯而非包层中,抑制了包层模式间干涉对其曲率特性和温度特性的干扰,保证了该结构的温度不敏感特性以及曲率响应的线性度。

[0018] 3) 本发明提供的这种利用三芯光纤模间干涉的原理测量曲率的结构,通过在三芯光纤与单模光纤之间引入多模光纤而使透射谱的干涉条纹对比度有明显提高,从3dB左右提高到14dB,波谷的半高宽明显变窄,更有利于对波谷移动量的监测。

[0019] 4) 本发明提供的这种利用三芯光纤模间干涉的原理测量曲率的结构,因其多纤芯独立且热光系数相近而具有温度不敏感的特性,有效避免温度变化带来的干扰。

## 附图说明

[0020] 以下各图所取的模间干涉光纤曲率传感结构的参数均与具体实施方式中相同。

[0021] 图1为基于三芯光纤的模间干涉曲率传感结构示意图;

[0022] 图2为未引入多模光纤的单模光纤-三芯光纤-单模光纤结构与引入多模光纤后的图1所示结构干涉光谱对比图;

[0023] 图3为三芯光纤模间干涉结构的曲率测量装置示意图;

[0024] 图4为三芯光纤模间干涉结构测量曲率的灵敏度拟合曲线;

[0025] 图5为三芯光纤模间干涉结构对温度特性的灵敏度拟合曲线。

## 具体实施方式

[0026] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,并参照附图,对本发明的具体结构、原理以及结构优化过程作进一步的详细说明。

[0027] 本发明提出了一种具有温度不敏感特性的高灵敏度光纤曲率传感结构,如图1所示,以三芯光纤为中心敏感元件,三芯光纤的三个纤芯为等边三角形排列,纤芯半径为 $r$ ,纤芯间距离为 $d$ 。宽谱光经过单模光纤3进入多模光纤9,激发出多个传输模式,传输模场变大,随后进入三芯光纤10,三个纤芯模式独立传输距离 $L$ 后重新进入多模光纤9,此时三个模式的光发生干涉,光信号被调制,再以单模形式在单模光纤3中继续向前传播,干涉光谱最终被光谱仪记录, $\lambda$ 是自由空间的光波长, $I_n$ 和 $I_m$ 代表不同纤芯模式的能量强度, $\Delta n_{eff}^{n,m}$ 表示任意两个模式间的有效折射率差,三芯光纤的长度为 $L$ 。当光纤感受到应力而以一定的曲率弯曲时,由于石英材料固有的光弹效应,光纤的折射率在横截面方向发生改变,弯曲内侧的折射率降低而外侧则升高,因此 $\Delta n_{eff}^{n,m}$ 发生变化,引起光谱的移动。

[0028] 在单模光纤与多模光纤之间加入一段较短的多模光纤作为连接的桥梁,目的是利用其大模场的特点激发出多个模式同时向前传输,阶数越高的模式模场面积越大,光充满整个 $125\mu\text{m}$ 多模光纤纤芯而不再拘束于 $9\mu\text{m}$ 的单模光纤纤芯中,因此有更多光能够直接耦合进三芯光纤的纤芯。同时,长度较短能够保证光在多模光纤中几乎不产生相位差。实验中制作了未引入和引入多模光纤的两种结构并对比其透射谱如图2所示。可以看出,由于引入了

多模光纤使三个芯模拥有更多能量,透射谱条纹对比度更高,波谷带宽明显变窄,且具有较均匀的自由空间谱宽,更便于对波谷进行监测。另外,进入三芯光纤纤芯的光增多意味着进入包层中的光能量减少,包层模式对干涉光谱的干扰被有效抑制。

[0029] 图3为三芯光纤模间干涉结构的曲率测量装置示意图。波长范围为1525nm~1565nm的宽谱光源1发出宽谱光,宽谱光经由单模跳线3入射进多模—三芯—多模光纤5之后光信号被调制,三芯光纤内芯模间发生干涉,产生的干涉光谱由光谱分析仪2探测。用两个三维位移调整台7作为光纤曲率的给进单元,一对夹持器4将光纤夹紧,通过调整三个方向的螺旋测微器6使光纤与实验台8平行且与水平位移给进方向保持一致,当位移调整台在水平方向产生位移时,光纤随之弯曲,曲率改变。三维调整台的水平方向螺旋测微器以20 $\mu$ m的间隔向光纤的方向给进,每给进一次用光谱仪记录干涉光谱的变化,将位移换算成曲率后绘制曲率改变时光谱移动量的响应曲线如图4所示。由图4中给出的直线拟合斜率可知测量频率范围在2.79 $m^{-1}$ ~3.24 $m^{-1}$ 时曲率灵敏度为-28.29 $nm/m^{-1}$ ,线性回归值为0.9956。此灵敏度高于文献1、2和4中给出的曲率灵敏度数值。

[0030] 实验对该三芯光纤模间干涉曲率传感结构的温度特性进行了研究。将该结构放置在恒温箱中,调节温度从30 $^{\circ}C$ 变化至75 $^{\circ}C$ ,每变化3 $^{\circ}C$ 记录干涉光谱的变化,绘制如图5的曲线。由于实验室光谱仪波长分辨力的限制(0.02nm),3 $^{\circ}C$ 引起的变化并不能被分辨出。对实验数据进行拟合后可知该三芯光纤模间干涉曲率传感结构的温度灵敏度仅0.0022 $nm/^{\circ}C$ ,曲率对温度的交叉敏感灵敏度低于 $10^{-4}m^{-1}/^{\circ}C$ ,因此可以认为该结构具有温度不敏感特性,曲率测量值不受温度变化的干扰。

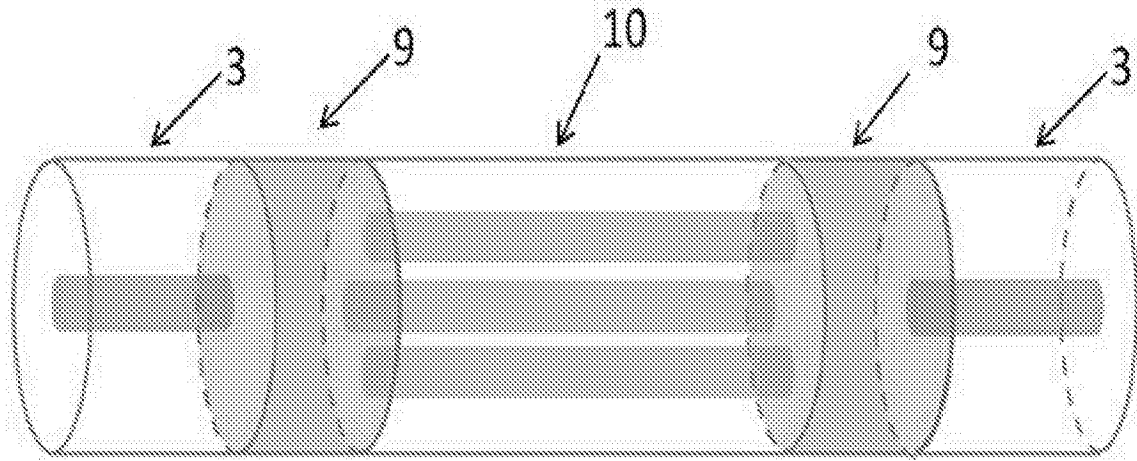


图1

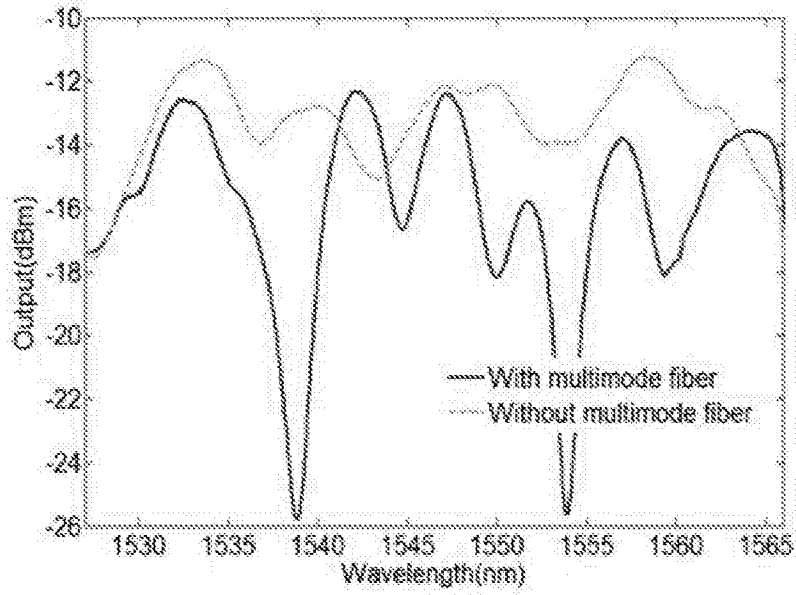


图2

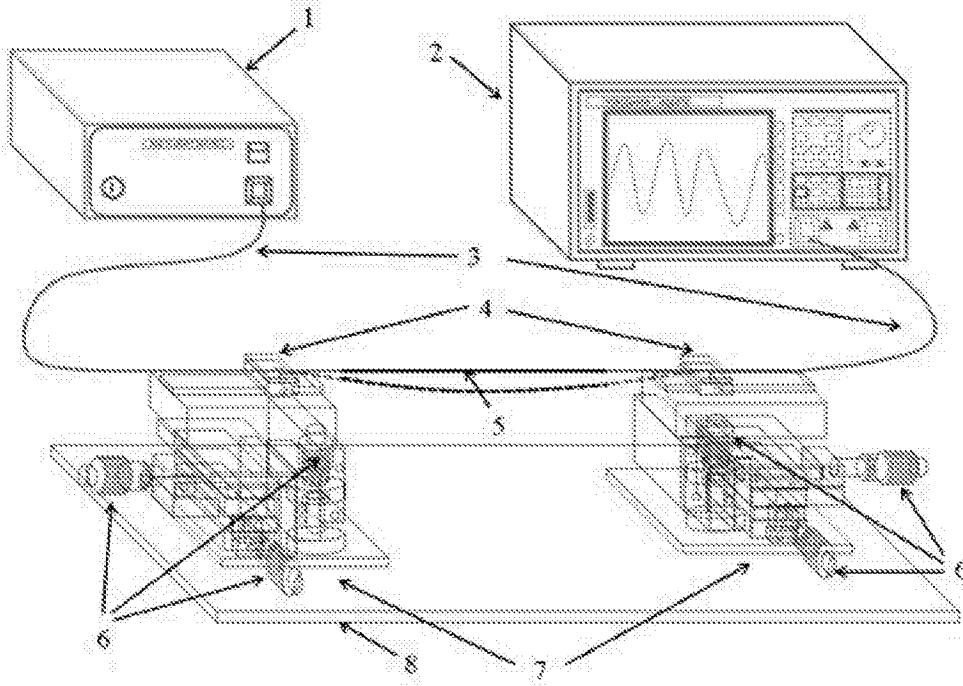


图3

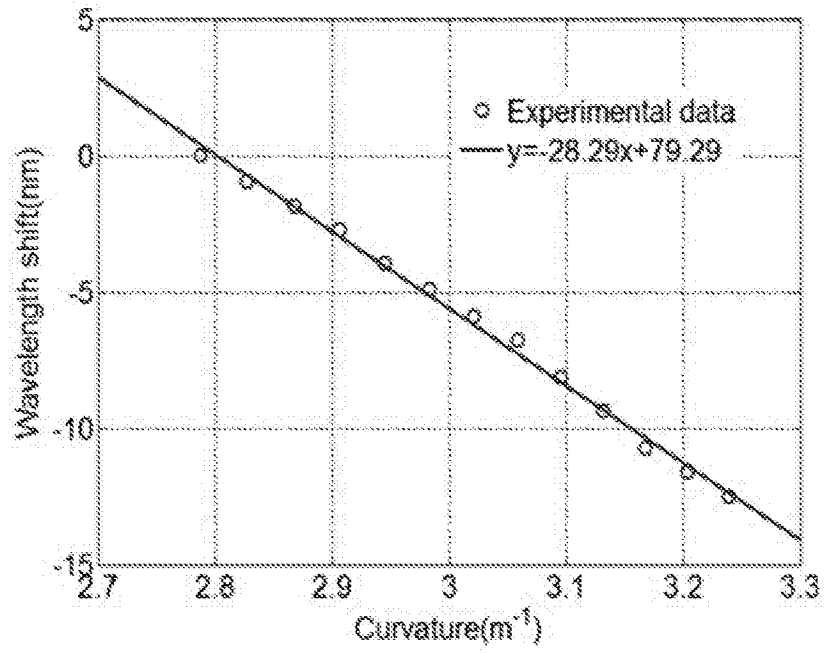


图4



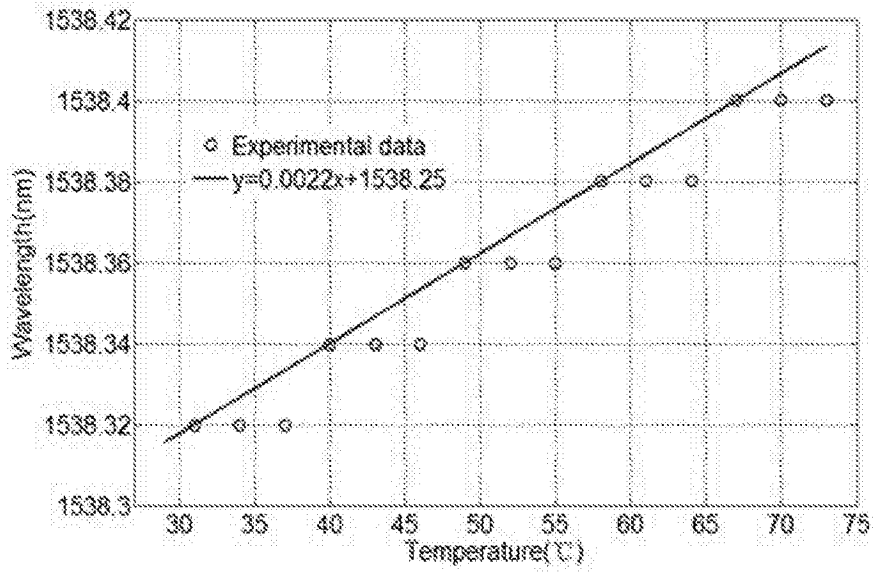


图5