



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107687907 B

(45)授权公告日 2020.03.24

(21)申请号 201710578998.7

(22)申请日 2017.07.17

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 107687907 A

(43)申请公布日 2018.02.13

(73)专利权人 东北大学  
地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路  
三巷11号

(72)发明人 赵勇 夏凤 胡海峰

(74)专利代理机构 大连理工大学专利中心  
21200

代理人 梅洪玉

(51) Int. Cl.  
G01K 11/32(2006.01)

(56)对比文件

- CN 103412360 A, 2013.11.27,
- CN 106595730 A, 2017.04.26,
- CN 102226725 A, 2011.10.26,
- CN 102564639 A, 2012.07.11,
- CN 102269700 A, 2011.12.07,
- CN 104614092 A, 2015.05.13,
- CN 101281274 A, 2008.10.08,
- CN 102378931 A, 2012.03.14,
- CN 106525278 A, 2017.03.22,
- CN 206161892 U, 2017.05.10,
- CN 106525278 A, 2017.03.22,

审查员 陈雪妮

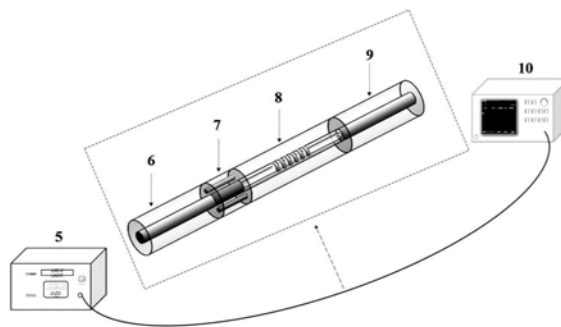
权利要求书1页 说明书6页 附图8页

(54)发明名称

一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法

(57)摘要

一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法。空芯环状光纤的上半环上刻制长周期光纤光栅,此非对称长周期光纤光栅将入射线偏振基模 $HE_{11x}$ 转化为 $TE_{01}$ 模式和 $HE_{21x}$ 模式。输入的 $HE_{11x}$ 模式由于光能量损耗,在其透射光谱中形成谐振谷,谐振谷的中心波长为谐振波长。在空芯环状光纤的空芯中填充具有高热光系数的折射率匹配液,环境温度变化时,折射率匹配液的折射率值发生改变,引起光栅谐振波长位置改变。温度传感系统由宽谱光源,输入单模光纤,保偏光纤,空芯环状光纤光栅,输出单模光纤和光谱分析仪组成。随温度升高,光栅谐振波长线性增大。该方法测量具有稳定性好、灵敏度高等优点。



1. 一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤1:通过化学气相沉积法和光纤拉制制得空芯环状光纤;该空芯环状光纤的环芯内径 $a_1$ 为 $0.5\sim 1.5\mu\text{m}$ ,环芯外径 $a_2$ 为 $2.5\sim 3.5\mu\text{m}$ ,包层半径 $a_3$ 为 $50\sim 65\mu\text{m}$ ,高折射率环折射率 $n_2$ 为 $1.468\sim 1.469$ ,包层折射率 $n_3$ 为 $1.44\sim 1.446$ ;该空芯环状光纤支持六个以上矢量模式,即至少包括前六阶矢量模式 $\text{HE}_{11x}$ 、 $\text{HE}_{11y}$ 、 $\text{HE}_{21x}$ 、 $\text{HE}_{21y}$ 、 $\text{TE}_{01}$ 和 $\text{TM}_{01}$ ;

步骤2:将不透光液体填充于空芯环状光纤,并进行单侧紫外曝光,使该空芯环状光纤的上半环刻制有非对称光栅;光栅周期 $\Lambda$ 为 $150\sim 300\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N$ 为 $25\sim 60$ ;折射率调制值 $\Delta n$ 为 $2.6\times 10^{-4}\sim 3.2\times 10^{-4}$ ;

步骤3:利用毛细作用或压差法在空芯环状光纤光栅的空芯内填充折射率匹配液;所述折射率匹配液,在温度为 $15^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$ 时,其折射率 $n_1$ 为 $1.4362\sim 1.4479$ ;

步骤4:连接温度传感系统;宽谱光源通过输入单模光纤连接到保偏光纤,液体填充的空芯环状光纤光栅一端连接到保偏光纤,另一端通过输出单模光纤与光谱分析仪相连;通过保偏光纤控制输入的模式为线偏振基模 $\text{HE}_{11x}$ 模式,经过空芯环状光纤光栅后,入射的 $\text{HE}_{11x}$ 模式转化为 $\text{TE}_{01}$ 模式和 $\text{HE}_{21x}$ 模式;再经过输出单模光纤滤除高阶 $\text{TE}_{01}$ 模式和 $\text{HE}_{21x}$ 模式,输入的 $\text{HE}_{11x}$ 模式光在其透射光谱中对应模式转换波长处形成谐振谷,谐振谷的中心波长为谐振波长;

步骤5:通过光谱分析仪监测谐振波长位置的改变,实现对温度的测量。

2. 根据权利要求1所述的一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法,其特征在于,步骤1中该空芯环状光纤的环芯内径 $a_1$ 为 $0.7\sim 1.3\mu\text{m}$ ,环芯外径 $a_2$ 为 $2.7\sim 3.3\mu\text{m}$ ,包层半径 $a_3$ 为 $60\sim 62.5\mu\text{m}$ ,高折射率环折射率 $n_2$ 为 $1.4681\sim 1.4685$ ,包层折射率 $n_3$ 为 $1.442\sim 1.444$ 。

3. 根据权利要求1或2所述的一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法,其特征在于,步骤2中使该空芯环状光纤的上半环刻制有非对称光栅,光栅周期 $\Lambda$ 为 $170\sim 250\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N$ 为 $40\sim 50$ ;折射率调制值 $\Delta n$ 为 $2.8\times 10^{-4}\sim 2.9\times 10^{-4}$ 。

## 一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于传感器技术领域,涉及一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法。

### 背景技术

[0002] 由于其体积小,高灵敏度,不受电磁干扰,耐化学腐蚀等优点,光纤温度传感器的研究越来越受学者们关注。目前,已有报道多种光纤温度传感器,例如光纤光栅温度传感器,侧边抛磨光纤温度传感器,光纤荧光温度传感器,光纤环温度传感器,光纤干涉仪温度传感器等。普通光纤传感器的温度测量灵敏度较低,因为其温度传感机理主要依赖于二氧化硅材料的热光特性,而二氧化硅材料的热光系数较低。近年来,许多学者报道了将光纤与具有高热光系数的材料结合的方法来提高光纤温度传感器的灵敏度。光纤与高热光系数材料结合的温度传感器可以分为两大类:一类是将光纤结构密封在具有高热光系数的材料中,另一种将高热光系数的材料填充到具有微孔结构的特殊光纤中。对于材料封装型光纤温度传感器,例如酒精封装的微光纤锥和液体封装的S形锥,材料的热光效应和热膨胀效应使得光纤结构对温度变化非常敏感,酒精封装的微光纤锥和液体封装的S形锥的温度测量灵敏度分别高达 $-3.88\text{nm}/^\circ\text{C}$ 和 $-1.403\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。然而,为了获得较高的温度测量灵敏度,通常采用细长的光纤锥结构,这将降低传感器的机械性能和使用寿命。将高热光系数的材料填充到具有微孔结构的特殊光纤中由于其极高的温度测量灵敏度,引起学者们的极大研究兴趣。Erick Reyes-vera等提出一种将全光纤Sagnac环干涉仪与铟填充的侧孔光子晶体光纤结合的结构,其温度灵敏度可达 $-9.0\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。然而Sagnac环结构的测量系统具有较复杂的结构,使得其测量系统的稳定性较差。由此可知,结构紧凑、机械性能好、稳定性好且灵敏度高是目前光纤温度传感器的发展方向。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的是克服上述锥形光纤结构温度传感器机械性能和使用寿命、环类光纤温度传感器测量系统的稳定性较差的缺点,提出一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的高灵敏度温度传感方法,其具有结构紧凑、机械性能好、稳定性好、灵敏度高等优点。

[0004] 具体技术方案为:

[0005] 一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的温度传感方法,包括如下步骤:

[0006] 步骤1:通过化学气相沉积法和光纤拉制制得空芯环状光纤;该空芯环状光纤的环芯内径 $a_1$ 为 $0.5\sim 1.5\mu\text{m}$ ,环芯外径 $a_2$ 为 $2.5\sim 3.5\mu\text{m}$ ,包层半径 $a_3$ 为 $50\sim 65\mu\text{m}$ ,高折射率环折射率 $n_2$ 为 $1.468\sim 1.469$ ,包层折射率 $n_3$ 为 $1.44\sim 1.446$ ;该空芯环状光纤支持六个以上矢量模式,即至少包括前六阶矢量模式 $\text{HE}_{11x}$ 、 $\text{HE}_{11y}$ 、 $\text{HE}_{21x}$ 、 $\text{HE}_{21y}$ 、 $\text{TE}_{01}$ 和 $\text{TM}_{01}$ ;

[0007] 步骤2:将不透光液体填充于空芯环状光纤,并进行单侧紫外曝光,使该空芯环状光纤的上半环刻制有非对称光栅;光栅周期 $\Lambda$ 为 $150\sim 300\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N$ 为 $25\sim 60$ ;折射率调制值 $\Delta n$ 为 $2.6\times 10^{-4}\sim 3.2\times 10^{-4}$ ,由于非对称光纤光栅打破了光纤结构的圆对称

性,可实现环内角向非同阶模式之间的转换;

[0008] 步骤3:利用毛细作用或压差法在空芯环状光纤光栅的空芯内填充折射率匹配液;所述折射率匹配液,在温度为 $15^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ 时,其折射率 $n_1$ 为 $1.4362\sim 1.4479$ ;

[0009] 步骤4:连接温度传感系统;宽谱光源通过输入单模光纤连接到保偏光纤,液体填充的空芯环状光纤光栅一端连接到保偏光纤,另一端通过输出单模光纤与光谱分析仪相连;通过保偏光纤控制输入的模式为线偏振基模 $\text{HE}_{11x}$ 模式,经过空芯环状光纤光栅后,入射的 $\text{HE}_{11x}$ 模式转化为 $\text{TE}_{01}$ 模式和 $\text{HE}_{21x}$ 模式;再经过输出单模光纤滤除高阶 $\text{TE}_{01}$ 模式和 $\text{HE}_{21x}$ 模式,输入的 $\text{HE}_{11x}$ 模式光在其透射光谱中对应模式转换波长处形成谐振谷,谐振谷的中心波长为谐振波长;

[0010] 步骤5:通过光谱分析仪监测谐振波长位置的改变,实现对温度的测量。原因在于环境温度变化引起折射率匹配液的折射率值改变,折射率改变引起光栅相位匹配条件变化,从而引起光栅谐振波长的移动。

[0011] 进一步地,步骤1中该空芯环状光纤的环芯内径 $a_1$ 为 $0.7\sim 1.3\mu\text{m}$ ,环芯外径 $a_2$ 为 $2.7\sim 3.3\mu\text{m}$ ,包层半径 $a_3$ 为 $60\sim 62.5\mu\text{m}$ ,高折射率环折射率 $n_2$ 为 $1.4681\sim 1.4685$ ,包层折射率 $n_3$ 为 $1.442\sim 1.444$ 。

[0012] 进一步地,步骤2中使该空芯环状光纤的上半环刻制有非对称光栅,光栅周期 $\Lambda$ 为 $170\sim 250\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N$ 为 $40\sim 50$ ;折射率调制值 $\Delta n$ 为 $2.8\times 10^{-4}\sim 2.9\times 10^{-4}$ ,由于非对称光纤光栅打破了光纤结构的圆对称性,可实现环内角向非同阶模式之间的转换。

[0013] 本发明的有益效果为:

[0014] (1)本发明提出的一种空芯环状光纤光栅,空芯环状光纤具有高折射率环,可实现在环内传输光;上半环受周期性折射率调制,形成非对称长周期光纤光栅,此非对称光栅打破光纤的圆对称结构,可实现环内角向非同阶模式之间的转换;

[0015] (2)本发明提出的一种基于液体填充空芯环状光纤光栅温度传感方法,其空芯结构中填充折射率可受温度调制的光学功能材料:折射率匹配液,光栅的谐振波长可由液体折射率调谐,使得此结构可实现对环境温度的测量;由于折射率匹配液具有较高的热光系数,此结构在温度测量方面展现出很高的温度测量灵敏度。

[0016] (3)本发明提出的一种基于液体填充空芯环状光纤光栅温度传感方法,结构只在一根光纤上完成,具有传感区域体积小、结构紧凑,传感系统稳定性好的优点。

## 附图说明

[0017] 图1为空芯环状光纤的光栅区域端面结构示意图及折射率分布图;

[0018] 图2为空芯环状光纤光栅三维结构示意图;

[0019] 图3为空芯环状光纤不同尺寸下所支持模式的分布情况,其中虚线和实线分别为 $\text{HE}_{21}$ 模式和 $\text{HE}_{31}$ 模式的截止曲线,计算条件为 $n_1=1.444$ , $n_2=1.4681$ , $n_3=1.444$ , $\lambda=1.55\mu\text{m}$ ,其中插图不同模式电场的矢量分布情况;

[0020] 图4为空芯环状光纤光栅的模式转换规则;

[0021] 图5为 $\text{HE}_{11x}$ 到 $\text{HE}_{21x}$ 和 $\text{TE}_{01}$ 模式转化过程中,谐振波长与光栅周期和环芯外径 $a_2$ 之间的关系图,直线代表 $a_2$ 为 $3.3\mu\text{m}$ ,光栅周期为 $230\mu\text{m}$ 时谐振波长在 $1.5\mu\text{m}$ 附近;

[0022] 图6为线偏振基模 $\text{HE}_{11x}$ 入射空芯环状光纤光栅时,各个模式的传输光谱图;

[0023] 图7为光栅周期固定为 $230\mu\text{m}$ ,光栅周期个数由20变化到70时,入射光 $\text{HE}_{11x}$ 的传输光谱;

[0024] 图8为入射光 $\text{HE}_{11x}$ 的模式转换率和传输光谱的半峰宽与光栅周期个数的关系,光栅周期固定为 $230\mu\text{m}$ ,光栅周期个数由20变化到70;

[0025] 图9为基于液体填充的空芯环状光纤光栅温度传感系统装置图;

[0026] 图10为基于液体填充的空芯环状光纤光栅不同温度下的输出光谱图,光栅参数为折射率调制值 $\Delta n = 2.9 \times 10^{-4}$ ,光栅周期 $\Lambda = 230\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N = 40$ ,光栅长度 $L = 0.92\text{cm}$ ;

[0027] 图11为图10中谐振波长和半峰宽与温度变化的拟合关系;

[0028] 图12为基于液体填充的空芯环状光纤光栅不同温度下的输出光谱图,光栅参数为折射率调制值 $\Delta n = 2.8 \times 10^{-4}$ ,光栅周期 $\Lambda = 220\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N = 35$ ,光栅长度 $L = 0.77\text{cm}$ ;

[0029] 图13为图12中谐振波长与温度变化的拟合关系;

[0030] 图14为基于液体填充的空芯环状光纤光栅不同温度下的输出光谱图,光栅参数为折射率调制值 $\Delta n = 2.9 \times 10^{-4}$ ,光栅周期 $\Lambda = 235\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N = 45$ ,光栅长度 $L = 1.058\text{cm}$ ;

[0031] 图15为图14中谐振波长与温度变化的拟合关系。

[0032] 图中:1液体填充的空芯区域;2高折射率环,其折射率为 $n_2$ ;3折射率调制的上半环,即光栅区域,其折射率为 $n_2 + \Delta n$ ;4光纤包层;5宽谱光源,6输入单模光纤;7保偏光纤;8液体填充的空芯环状光纤光栅;9输出单模光纤;10光谱分析仪。

## 具体实施方式

[0033] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,以下结合本发明具体实施例,并参照附图,对本发明得具体结构、原理以及性能优化过程作进一步的详细说明。

### [0034] 实施例1

[0035] 一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的高灵敏度温度传感方法,包括如下步骤:

[0036] 步骤1:通过化学气相沉积法和光纤拉制设备制得空芯环状光纤。空芯环状光纤具有高折射率环,实现在高折射率环内传输光。空芯环状光纤的光栅区域端面结构示意图及折射率分布如图1所示。空芯环状光纤的环芯内径 $a_1 = 1\mu\text{m}$ ,包层半径 $a_3 = 62.5\mu\text{m}$ ,高折射率环材料为康宁公司SMF-28纤芯材料,其折射率 $n_2 = 1.4681$ ,包层材料为纯二氧化硅,其折射率 $n_3 = 1.444$ ,高折射率环和包层的相对材料折射率差为16%,此材料具有便于获取且制作工艺成熟的优势,且此参数使得此空芯环状光纤可通过化学气相沉积法和光纤拉制设备制得。空芯环状光纤不同尺寸下所支持模式的分布情况如图3所示,其中虚线和实线分别为 $\text{HE}_{21}$ 模式和 $\text{HE}_{31}$ 模式的截止曲线,计算条件为 $n_1 = 1.444$ , $n_2 = 1.4681$ , $n_3 = 1.444$ , $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ ,其中插图不同模式电场的矢量分布情况。为避免环内较多模式引起的干扰,设计此空芯环状光纤只支持前两阶模式组,即六个矢量模式( $\text{HE}_{11x}$ , $\text{HE}_{11y}$ , $\text{HE}_{21x}$ , $\text{HE}_{21y}$ , $\text{TE}_{01}$ , $\text{TM}_{01}$ ),因此环芯内径 $a_1$ 和环厚度 $a_2 - a_1$ 值应该在 $\text{HE}_{21}$ 和 $\text{HE}_{31}$ 模式截止曲线之间区域,选择环芯内径 $a_1 = 1\mu\text{m}$ ,则 $a_2 - a_1$ 值应该 $1.3\mu\text{m} - 2.6\mu\text{m}$ 之间,如双向箭头所示区域。

[0037] 步骤2:通过对不透光液体填充的空芯环状光纤进行单侧紫外曝光,实现对上半环

周期性的折射率调制,制成具有非对称光栅的空芯环状光纤,其三维结构如图2所示。

[0038] 图4所示为空芯环状光纤光栅的模式转换规则。由于非对称光纤光栅打破了光纤结构的圆对称性,可实现环内角向非同阶模式之间的转换。基模入射光通过半环形非对称长周期光纤光栅,当满足相位匹配条件时,环内模式转换规则为 $HE_{11x}$ 模式激发 $HE_{21x}$ 和 $TE_{01}$ 模式, $HE_{11y}$ 模式激发 $HE_{21y}$ 和 $TM_{01}$ 模式。

[0039] 基于上述模式转换规则和已定的光纤参数( $n_1=1.444, n_2=1.4681, n_3=1.444, a_1=1\mu\text{m}$ ),计算出入射模式( $HE_{11x}$ )和所激发模式( $HE_{21x}$ 和 $TE_{01}$ )的相位匹配条件,如图5所示。当环芯外径 $a_2=2.5\mu\text{m}, 2.7\mu\text{m}$ 和 $3.0\mu\text{m}$ 时,相位匹配曲线展现出一个转折点,如图中叉形标记所示,这意味着在转折点附近,一个光栅周期将对应两个模式转换波长,为了避免这种双波长转换现象,选择环芯外径 $a_2=3.3\mu\text{m}$ 。为使谐振波长在 $1.55\mu\text{m}$ 附近,光栅周期确定为 $\Lambda=230\mu\text{m}$ 。

[0040] 步骤3:利用毛细作用或压差法在空芯环状光纤光栅的空芯内填充折射率匹配液;所述折射率匹配液的折射率值在温度为 $25^\circ\text{C}$ 时为 $n_1=1.444$ ,热光系数为 $-0.00039\text{RIU}/^\circ\text{C}$ ,温度升高引起其折射率值降低,在温度为 $15^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$ 时,其折射率 $n_1$ 为 $1.4362\sim 1.4479$ ;

[0041] 步骤4:连接系统结构;宽谱光源通过输入单模光纤连接到保偏光纤,空芯环状光纤光栅一端连接到保偏光纤,另一端通过输出单模光纤与光谱分析仪相连;通过保偏光纤控制输入的模式为线偏振基模 $HE_{11x}$ 模式,经过空芯环状光纤光栅后,入射的 $HE_{11x}$ 模式转化为 $TE_{01}$ 模式和 $HE_{21x}$ 模式;再经过输出单模光纤滤除高阶 $TE_{01}$ 模式和 $HE_{21x}$ 模式,输入的 $HE_{11x}$ 模式光在其透射光谱中对应模式转换波长处形成谐振谷,谐振谷的中心波长为谐振波长。图6为 $HE_{11x}$ 作为入射光时六个矢量模式的传输光谱,温度为 $25^\circ\text{C}$ ,即 $n_1=1.444$ ,光栅参数为折射率调制值 $\Delta n=2.9\times 10^{-4}$ ,光栅周期 $\Lambda=230\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N=40$ ,光栅长度 $L=0.92\text{cm}$ 。由图可知, $HE_{21x}$ 模式和 $TE_{01}$ 模式被入射 $HE_{11x}$ 模式激发,而其他模式没有被激发,验证了图4所示的模式转换规则。谐振谷包含 $HE_{11x}$ 模式转化为 $TE_{01}$ 模式和 $HE_{11x}$ 模式转化为 $HE_{21x}$ 模式的两个单独谐振谷,由于两个单独谐振谷各自的半峰宽较大,且二者的谐振波长间距较小,使得两个单独谐振谷合并为一个更宽的谐振谷。

[0042] 图7为光栅周期固定为 $\Lambda=230\mu\text{m}$ ,折射率调制值 $\Delta n=2.9\times 10^{-4}$ ,环境温度为 $25^\circ\text{C}$ 即 $n_1=1.444$ 时,光栅周期个数 $N$ 由20变化到70时,即光栅长度由变化到 $0.46\text{cm}$ 到 $1.61\text{cm}$ 时,入射光 $HE_{11x}$ 的传输光谱,图8为图7中不同光谱的模式转换率以及半峰宽与光栅周期个数的关系。当光栅周期个数由20增加到40时,模式转换率由 $64.72\%$ 增加到 $99.97\%$ ,当光栅周期个数由40增加到70时,模式转换率由 $99.97\%$ 降低至 $83.46\%$ ,故光栅周期个数为20-30和50-70时分别为欠耦合和过耦合状态,由此可得出光栅周期 $\Lambda=230\mu\text{m}$ 时,光栅周期个数的优化值为 $N=40\sim 50$ ,相应光栅长度 $L=0.92\text{cm}\sim 1.15\text{cm}$ ,此时模式转换率高于 $99.55\%$ ,半峰宽约为 $60\text{nm}$ 。

[0043] 步骤5:改变空芯环状光纤光栅所处环境的温度并通过光谱分析仪监测谐振波长位置的改变;环境温度变化引起折射率匹配液的折射率值改变,折射率改变引起光栅相位匹配条件变化,从而引起光栅谐振波长的移动;通过检测光栅谐振波长的移动实现对温度的测量。

[0044] 图10为基于液体填充的空芯环状光纤光栅不同温度下的输出光谱图,光栅参数为折射率调制值 $\Delta n=2.9\times 10^{-4}$ ,光栅周期 $\Lambda=230\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N=40$ ,光栅长度 $L=$

0.92cm,由图10可看出,随着温度的变化,谐振波长随之增大,且半峰宽增加。

[0045] 图11为基于液体填充的空芯环状光纤光栅的谐振波长及半峰宽与温度变化的拟合关系,在15℃到45℃内,波长随温度的增加线性增加,波长与温度变化线性拟合关系为12.92nm/℃,拟合度为0.9977,等效折射率灵敏度为33128nm/RIU。此外,随着温度的升高,谐振谷的半峰宽增加,二者关系可通过多项式拟合,其拟合度高达99.99%。

[0046] 实施例2

[0047] 一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的高灵敏度温度传感方法,包括如下步骤:

[0048] 步骤1,同实施例1;

[0049] 步骤2:通过对不透光液体填充的空芯环状光纤进行单侧紫外曝光,实现对上半环周期性的折射率调制,制成具有非对称光栅的空芯环状光纤,光栅周期 $\Lambda = 220\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N$ 为35;折射率调制值 $\Delta n = 2.8 \times 10^{-4}$ ,相应光栅长度 $L = 0.77\text{cm}$ ,温度为25℃,即 $n_1 = 1.444$ 时模式转换率高达92.43%,由于非对称光纤光栅打破了光纤结构的圆对称性,可实现环内角向非同阶模式之间的转换;

[0050] 步骤3:利用毛细作用或压差法在空芯环状光纤光栅的空芯内填充折射率匹配液;所述折射率匹配液的折射率值在温度为25℃时为 $n_1 = 1.444$ ,热光系数为 $-0.00039\text{RIU}/\text{℃}$ ,温度升高引起其折射率值降低,在温度为15℃~45℃时,其折射率 $n_1$ 为1.4362~1.4479;

[0051] 步骤4:连接温度传感系统;宽谱光源通过输入单模光纤连接到保偏光纤,空芯环状光纤光栅一端连接到保偏光纤,另一端通过输出单模光纤与光谱分析仪相连;

[0052] 步骤5:改变空芯环状光纤光栅所处环境的温度并通过光谱分析仪监测谐振波长位置的改变;环境温度变化引起折射率匹配液的折射率值改变,折射率改变引起光栅相位匹配条件变化,从而引起光栅谐振波长的移动;通过检测光栅谐振波长的移动实现对温度的测量。

[0053] 图12为基于液体填充的空芯环状光纤光栅不同温度下的输出光谱图,光栅参数为折射率调制值 $\Delta n = 2.8 \times 10^{-4}$ ,光栅周期 $\Lambda = 220\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N = 35$ ,光栅长度 $L = 0.77\text{cm}$ 。由图12可看出,随着温度的变化,谐振波长随之增大,且半峰宽增加。

[0054] 图13为基于液体填充的空芯环状光纤光栅的谐振波长及半峰宽与温度变化的拟合关系,在15℃到45℃内,波长随温度的增加线性增加,波长与温度变化线性拟合关系为11.76nm/℃,拟合度为0.9900,等效折射率灵敏度为30153nm/RIU。

[0055] 实施例3

[0056] 一种基于液体填充空芯环状光纤光栅的高灵敏度温度传感方法,包括如下步骤:

[0057] 步骤1,同实施例1;

[0058] 步骤2:通过对不透光液体填充的空芯环状光纤进行单侧紫外曝光,实现对上半环周期性的折射率调制,制成具有非对称光栅的空芯环状光纤,光栅周期 $\Lambda = 235\mu\text{m}$ ,光栅周期个数 $N = 45$ ;折射率调制值 $\Delta n = 2.9 \times 10^{-4}$ ,相应光栅长度 $L = 1.058\text{cm}$ ,温度为25℃,即 $n_1 = 1.444$ 时模式转换率高达99.44%,由于非对称光纤光栅打破了光纤结构的圆对称性,可实现环内角向非同阶模式之间的转换;

[0059] 步骤3:利用毛细作用或压差法在空芯环状光纤光栅的空芯内填充折射率匹配液;所述折射率匹配液的折射率值在温度为25℃时为 $n_1 = 1.444$ ,热光系数为 $-0.00039\text{RIU}/\text{℃}$ ,温度升高引起其折射率值降低,在温度为15℃~45℃时,其折射率 $n_1$ 为1.4362~1.4479;

[0060] 步骤4:连接温度传感系统;宽谱光源通过输入单模光纤连接到保偏光纤,空芯环状光纤光栅一端连接到保偏光纤,另一端通过输出单模光纤与光谱分析仪相连;

[0061] 步骤5:改变空芯环状光纤光栅所处环境的温度并通过光谱分析仪监测谐振波长位置的改变;环境温度变化引起折射率匹配液的折射率值改变,折射率改变引起光栅相位匹配条件变化,从而引起光栅谐振波长的移动;通过检测光栅谐振波长的移动实现对温度的测量。

[0062] 图14为基于液体填充的空芯环状光纤光栅不同温度下的输出光谱图,光栅参数为折射率调制值  $\Delta n = 2.9 \times 10^{-4}$ ,光栅周期  $\Lambda = 235 \mu\text{m}$ ,光栅周期个数  $N = 45$ ,光栅长度  $L = 1.058 \text{cm}$ 。由图14可看出,随着温度的变化,谐振波长随之增大,且半峰宽增加。

[0063] 图15为基于液体填充的空芯环状光纤光栅的谐振波长及半峰宽与温度变化的拟合关系,在  $15^\circ\text{C}$  到  $45^\circ\text{C}$  内,波长随温度的增加线性增加,波长与温度变化线性拟合关系为  $7.91 \text{nm}/^\circ\text{C}$ ,拟合度为  $0.9999$ ,等效折射率灵敏度为  $20282 \text{nm}/\text{RIU}$ 。



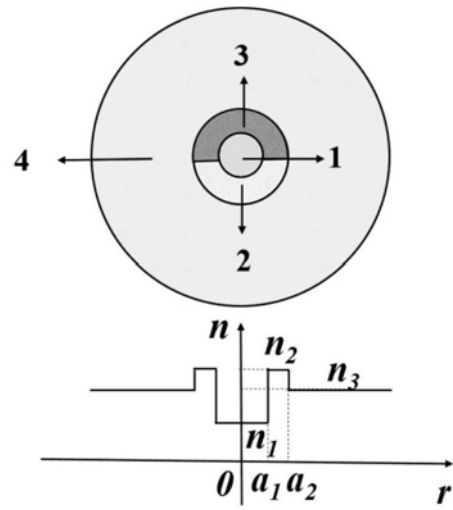


图1

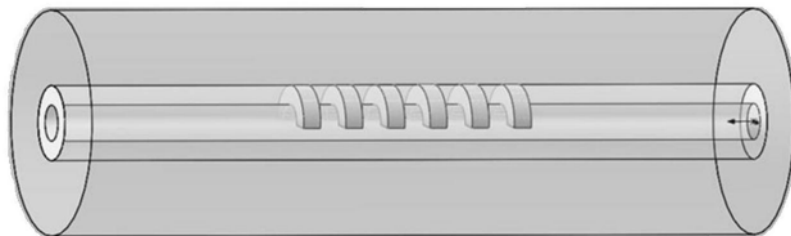


图2

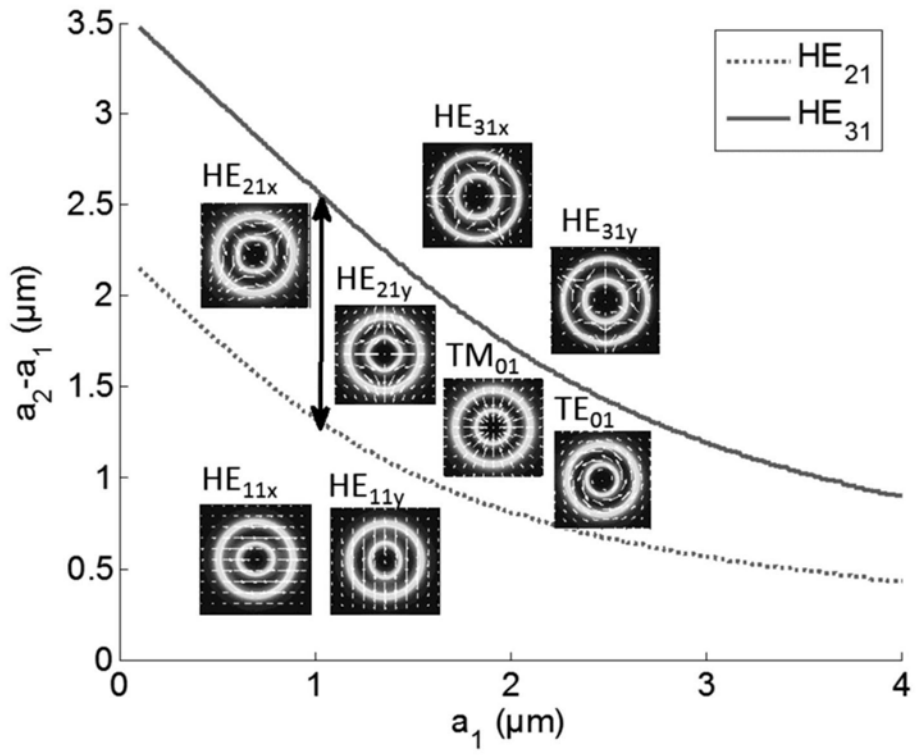


图3

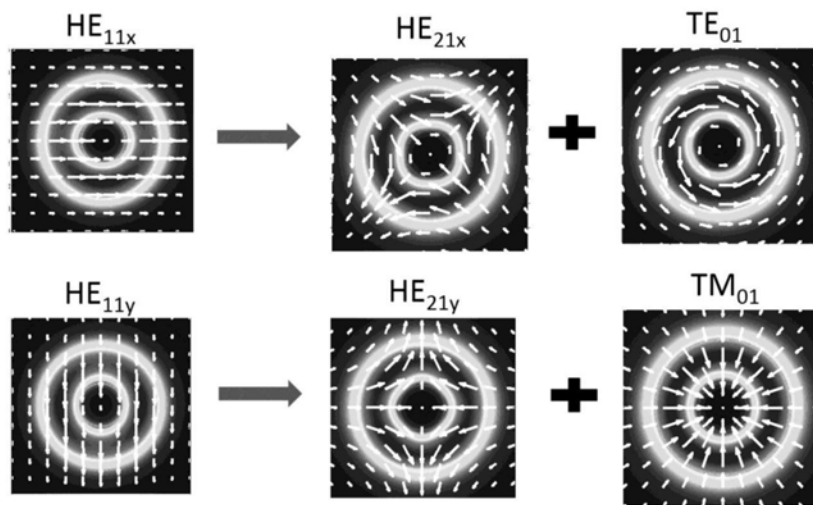


图4

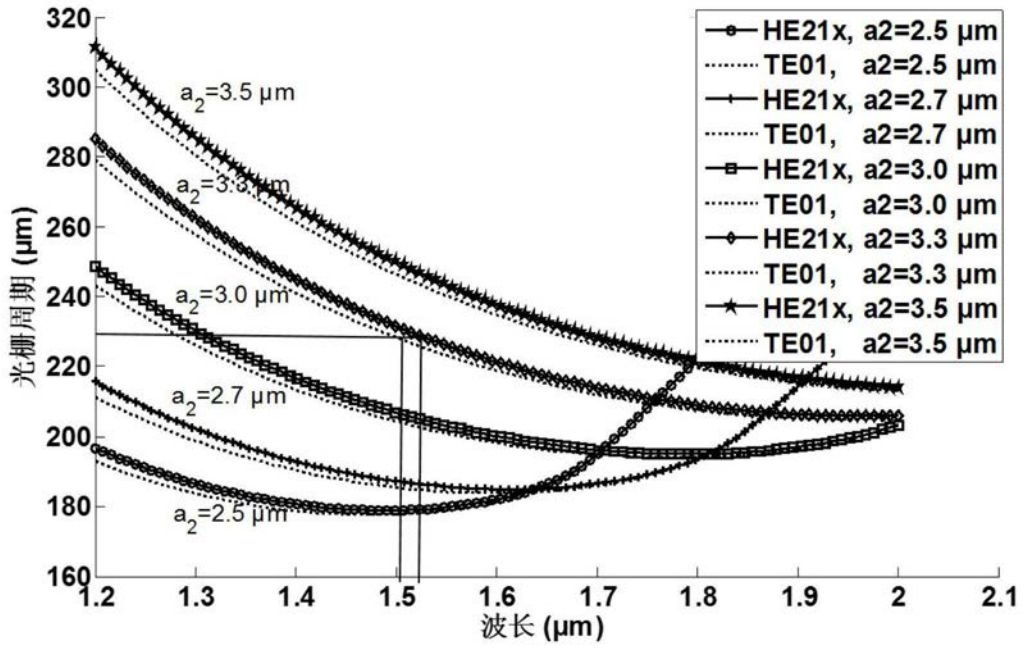


图5

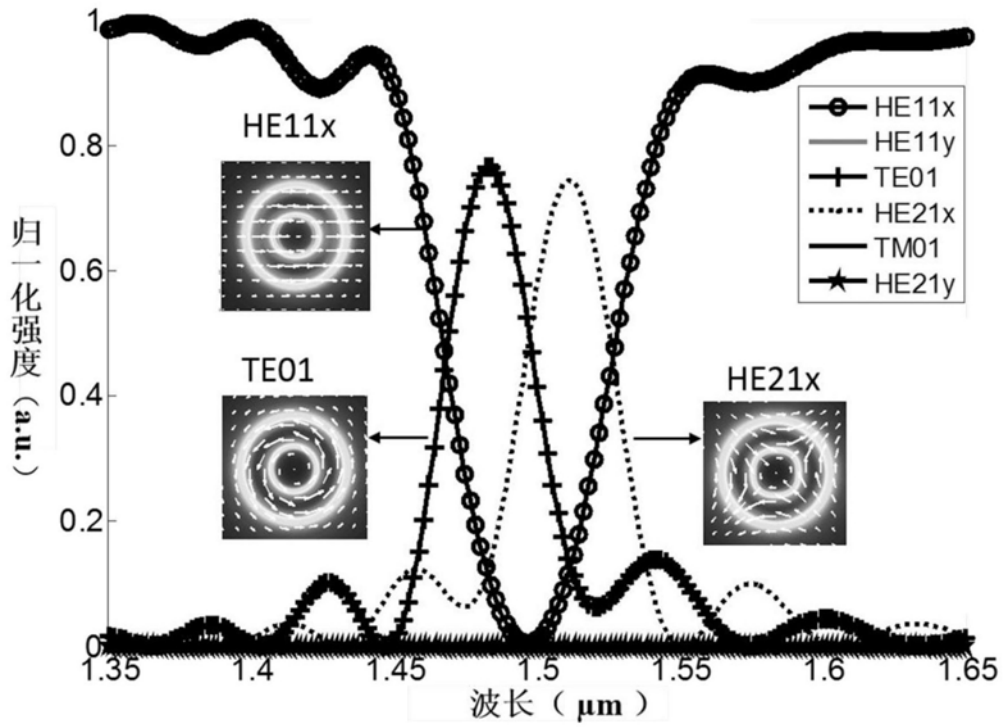


图6

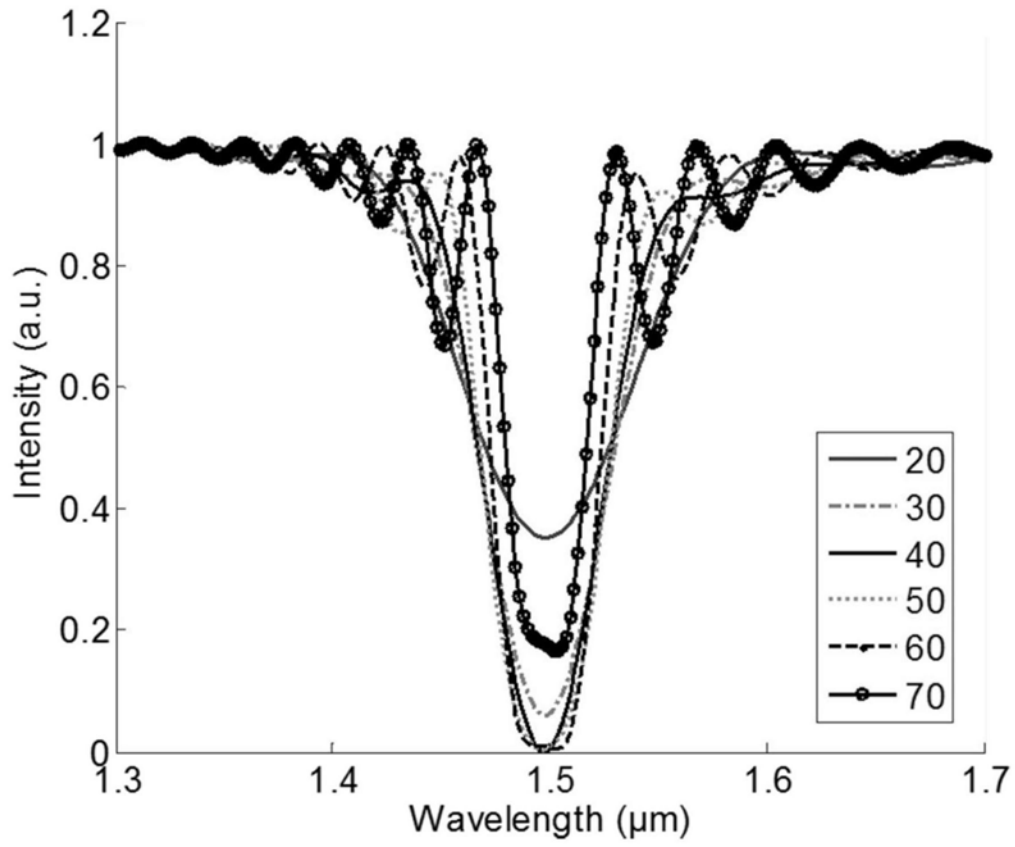


图7

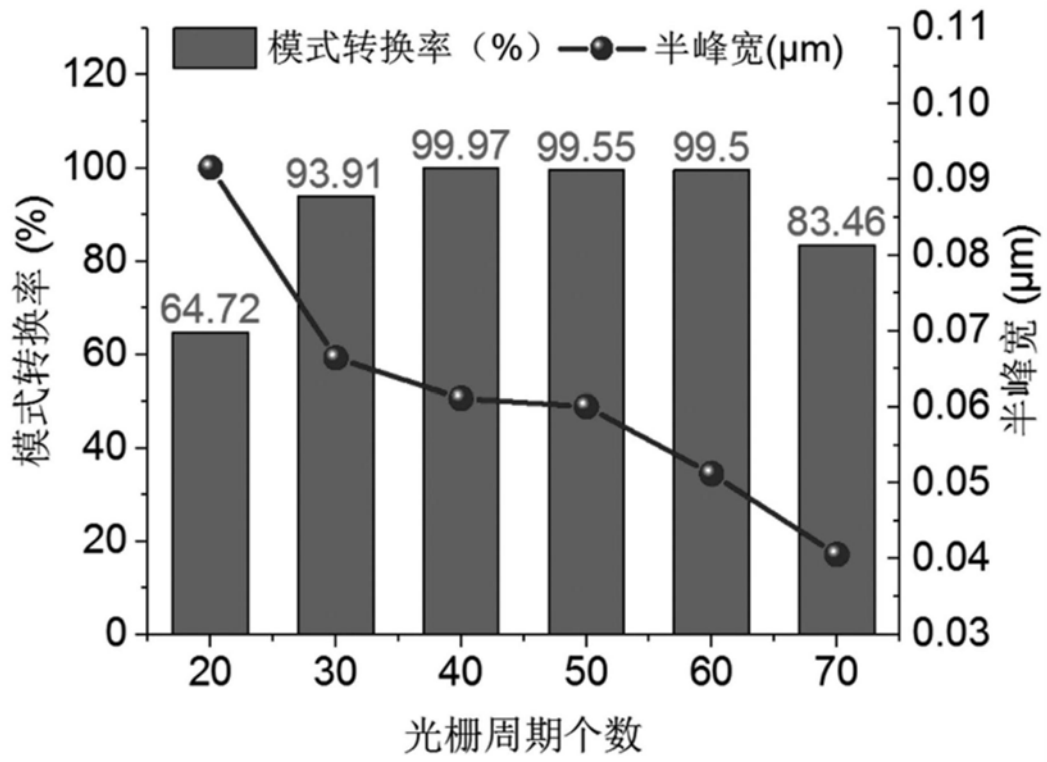


图8

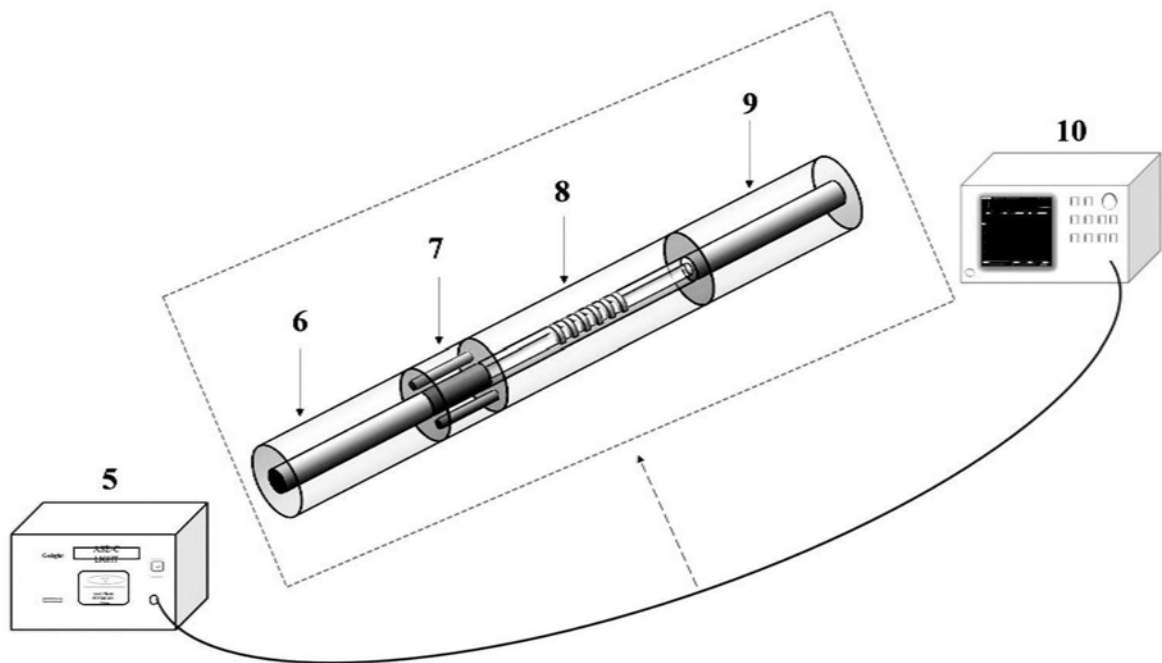


图9

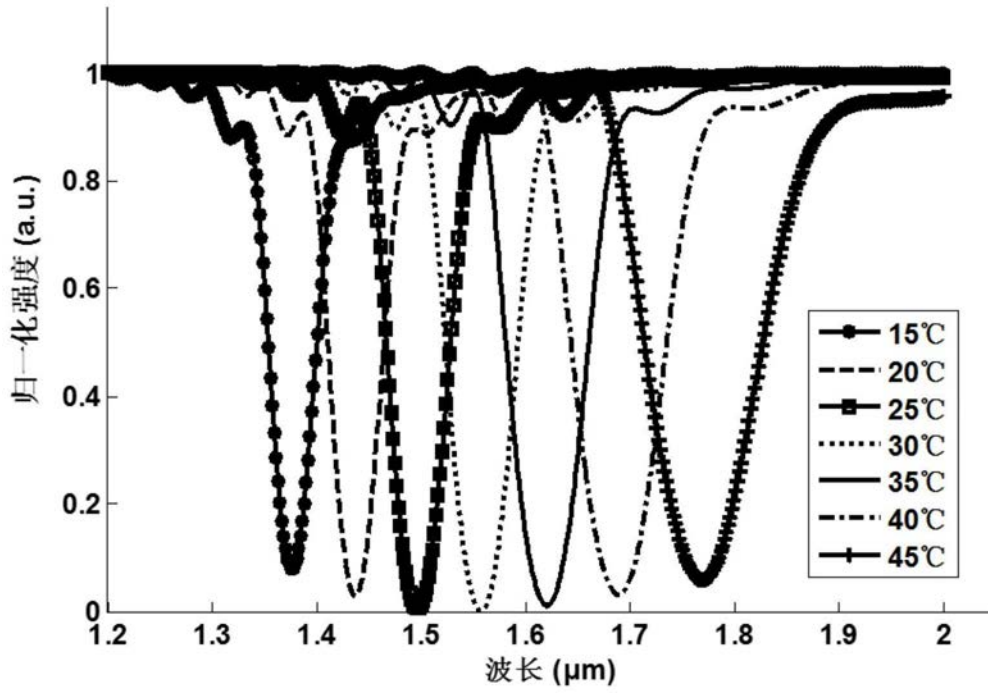


图10

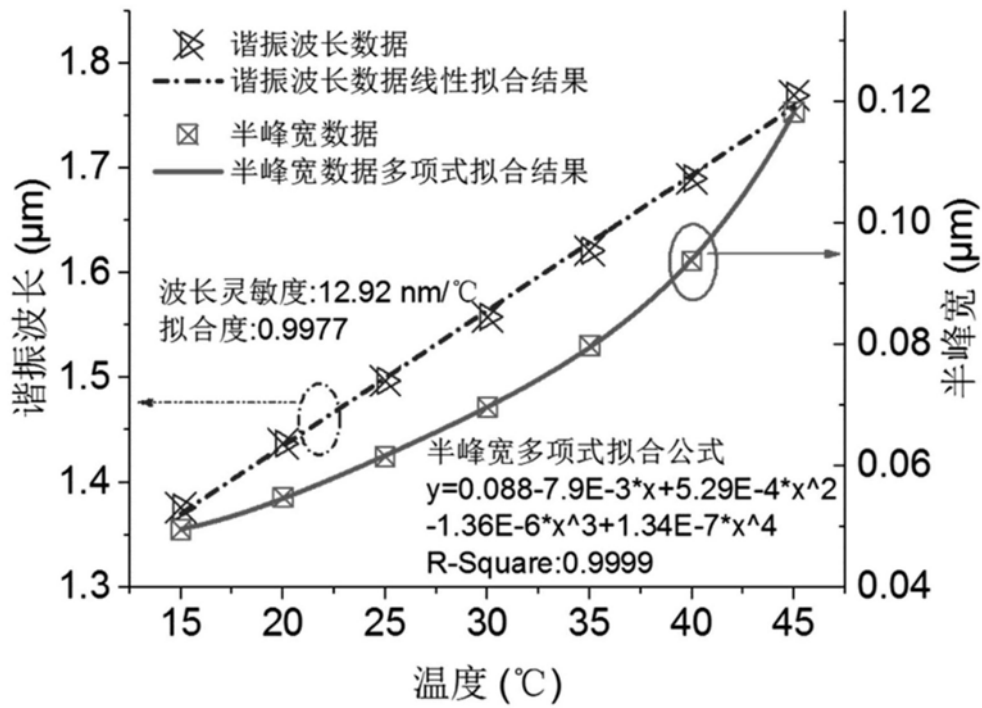


图11

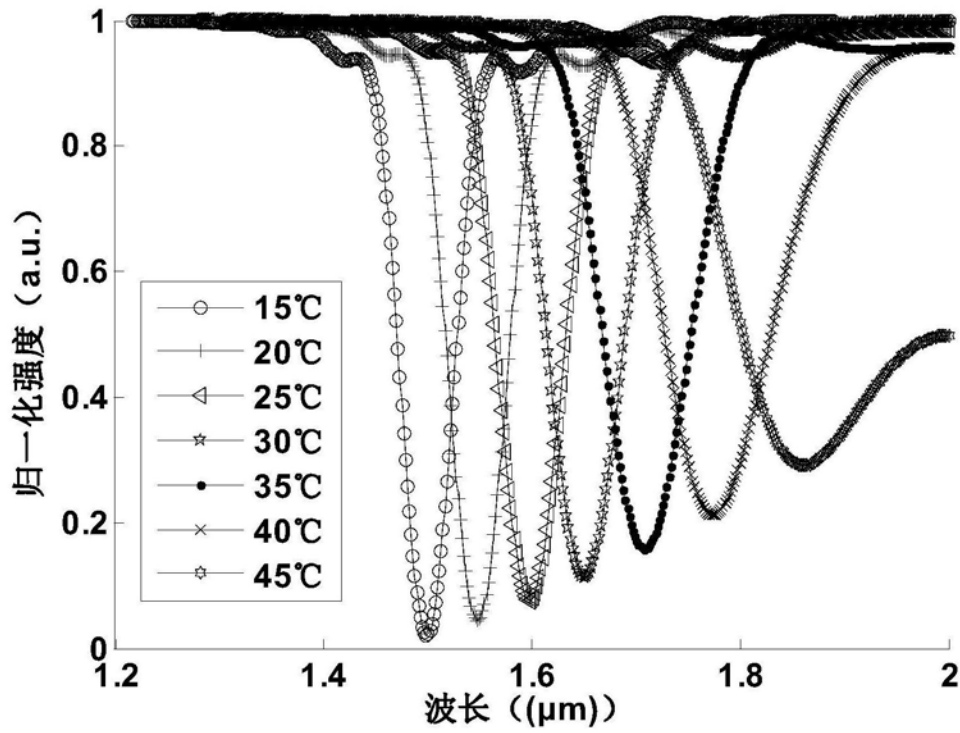


图12

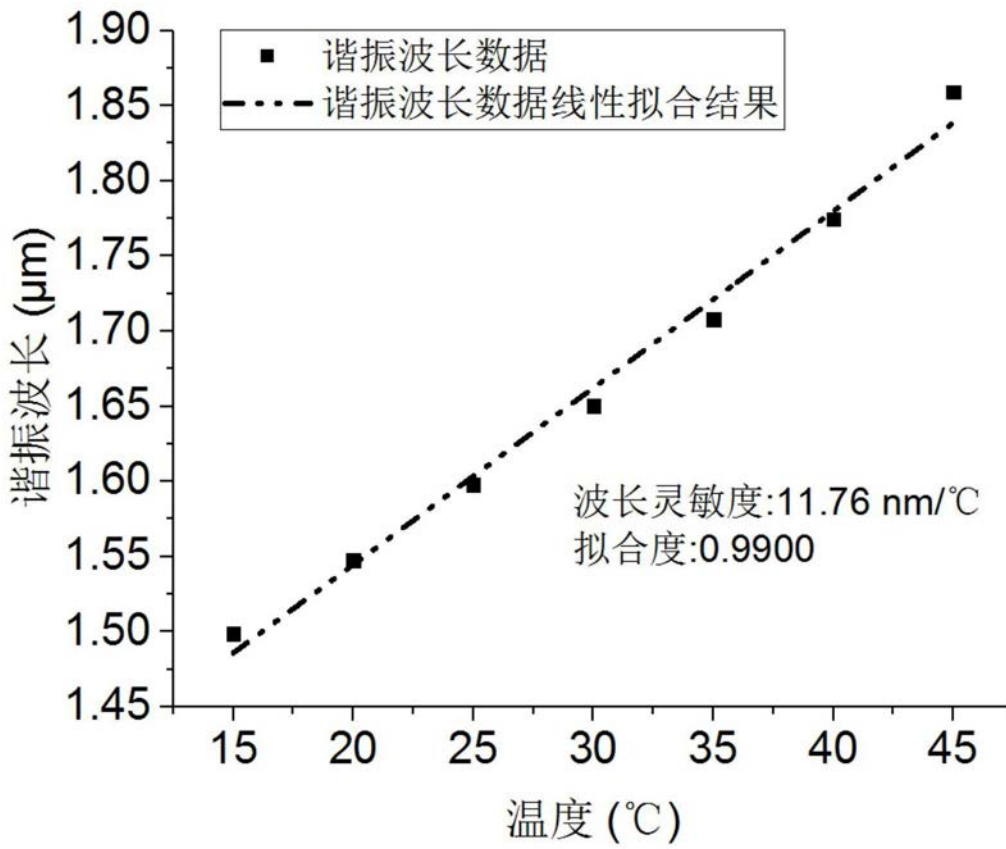


图13

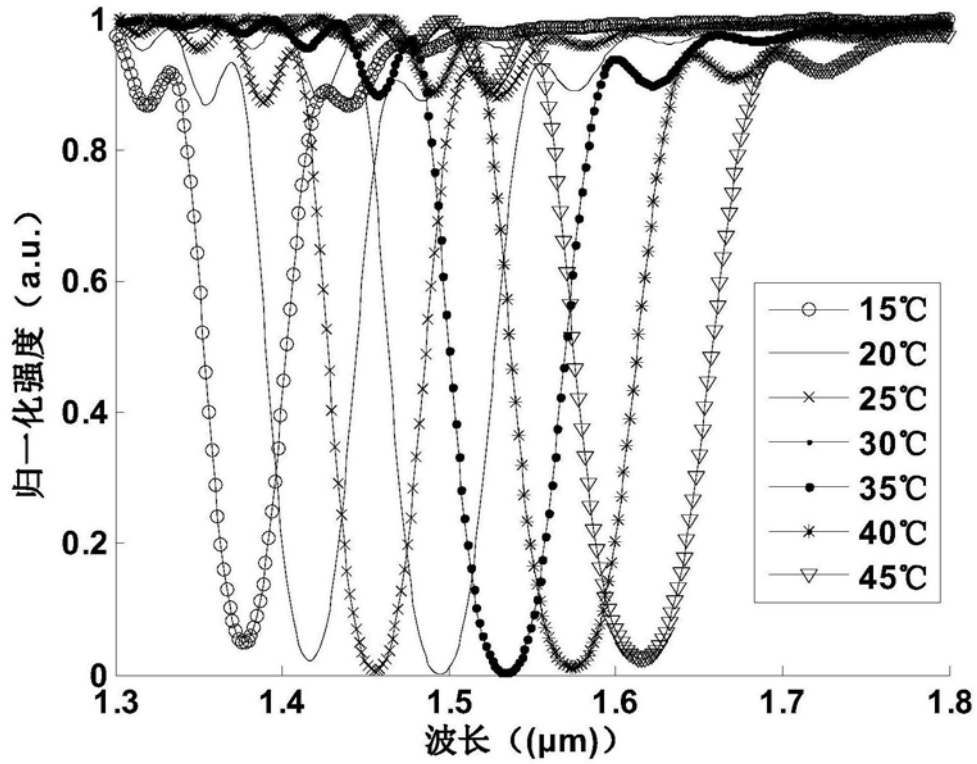


图14

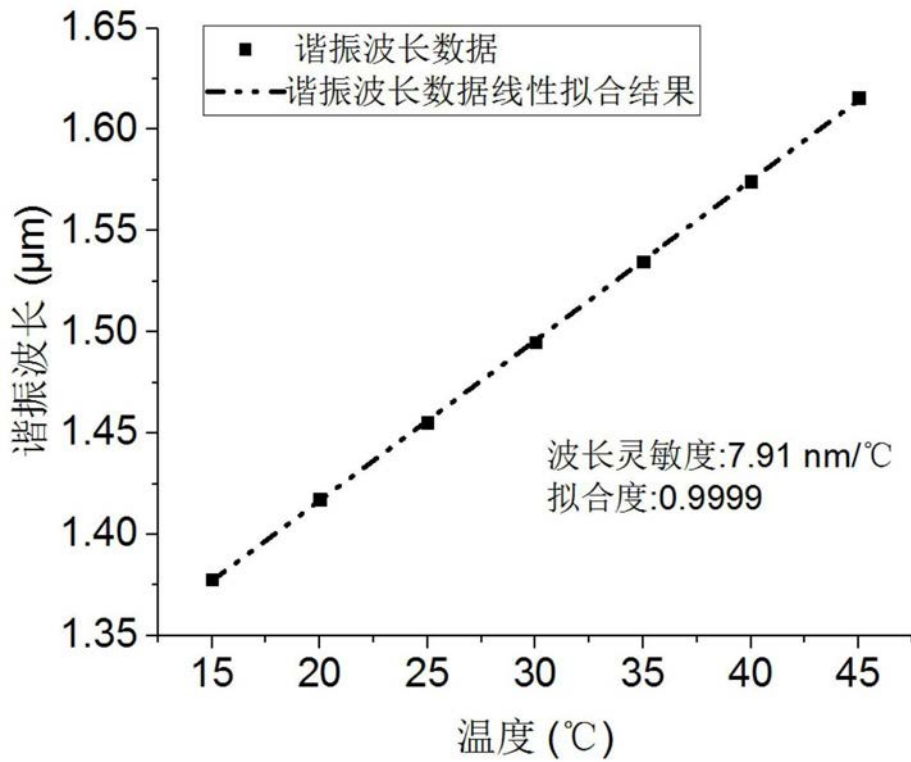


图15