

基于侧漏型光子晶体光纤高灵敏度宽线性范围 弯曲传感器的研究*

娄淑琴[†] 王鑫 尹国路 韩博琳

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

(2013年5月2日收到; 2013年5月20日收到修改稿)

基于所研制的侧漏型光子晶体光纤, 提出并研制出一种 Sagnac 干涉仪型高灵敏度宽线性测量范围的弯曲传感器. 实验研究结果表明, 当侧漏型光子晶体光纤中的线性缺陷与弯曲方向一致时, 采用群双折射和波谷波长偏移量测量弯曲曲率均可获得高的弯曲灵敏度, 但线性测量范围小, 且不能进行小弯曲曲率的测量. 当线性缺陷与弯曲方向垂直时, 以波谷波长偏移量进行弯曲曲率检测, 可获得 10.798 nm/m^{-1} 高灵敏度的同时且可实现 $0\text{--}5.03 \text{ m}^{-1}$ 的宽线性测量范围, 结合测量矩阵的引入可实现温度和弯曲曲率的同时测量, 进而剔除环境温度变化对弯曲曲率检测的干扰, 实现了高灵敏度宽线性范围的弯曲传感; 而以群双折射进行弯曲曲率检测, 虽然检测灵敏度较低, 但可实现对环境温度不敏感的弯曲传感.

关键词: 弯曲传感器, 侧漏型光子晶体光纤, 高灵敏度, 宽线性范围

PACS: 42.81.Pa, 42.81.Bm, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.62.194209

1 引言

弯曲曲率是一个非常重要的物理参数, 常用于工程结构的弯曲测量及健康监测. 光纤弯曲传感器体积小、易集成、物理强度高, 且易于埋入监测结构及进行多传感器组网, 从大型工程到智能假肢等结构的弯曲形变检测, 均具有广泛的应用. 已报道的光纤弯曲传感器, 主要有强度调制和波长调制两种类型. 强度调制型弯曲传感器通过检测反射或透射功率进行弯曲量测量^[1-4], 因此, 测量精度极大地依赖光源的稳定性. 波长调制型弯曲传感器, 主要有长周期光纤光栅型^[5-7]、MZI 干涉仪型^[8-11]、Sagnac 干涉仪型^[12-14]等类型. 其中, 长周期光纤光栅型最高灵敏度可达 $14 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$, 弯曲曲率的测量范围为 $0\text{--}5 \text{ m}^{-1}$ ^[7], 但透射谐振峰宽测量误差较大. 多模光纤 MZI 干涉仪型检测灵敏度可达 $-10.38 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$, 但测量范围仅为 $0.25\text{--}0.5 \text{ m}^{-1}$ ^[10]; 双芯光纤 MZI 干涉仪型

可实现 $1\text{--}13 \text{ m}^{-1}$ 宽范围检测, 但灵敏度只有 $-1.518 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[9]; 且以上两种 MZI 干涉仪型弯曲传感器均不能对微小曲率进行检测. Sagnac 干涉仪制作简单, 结构灵活性和稳定性高, 受新型特种光纤发展的推动, 现已成为光纤弯曲传感器的一个新的发展方向. 已有报道的基于低双折射光子晶体光纤、保偏光子晶体光纤和普通保偏光纤 Sagnac 干涉仪型弯曲传感器, 检测灵敏度分别为 $-0.337 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[12], $-1.87 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[13] 和 $0.029 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[14], 其弯曲传感性能仍处于相对较低的水平, 高性能的新型 Sagnac 干涉仪型弯曲传感器还有待开发.

面向光纤传感的应用需求, 我们设计并研制出一种新型侧漏型 PCF (Side Leakage PCF, SLPCF)^[15], 通过在光纤结构中引入线缺陷, 增强了光纤对外界影响的敏感性. 本文基于所研制的 SLPCF, 提出并研制了一种 Sagnac 干涉仪型弯曲传感器, 并对不同放置方式下的响应特性进行了深

* 国家自然科学基金(批准号: 61177082, 61205074)和北京市自然科学基金(批准号: 4122063)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

入的实验研究. 实验结果表明, SLPCF 的线缺陷方向与弯曲方向垂直时, 弯曲曲率线性测量范围可达 $0\text{--}5.03\text{ m}^{-1}$, 灵敏度达 $10.798\text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$, 高于先前报道的基于低双折射 PCF Sagnac 干涉仪型^[12]、多芯光纤布拉格光栅^[16]、多孔光纤长周期光纤光栅^[17]和单模光纤的长周期光栅^[18] 光纤弯曲传感器. 高灵敏度和宽线性测量范围的弯曲曲率传感, 使我们所提出的基于侧漏型光子晶体光纤的弯曲传感器具有很好的应用前景.

2 实验装置及测量原理

基于所研制 SLPCF 的 Sagnac 干涉仪型弯曲

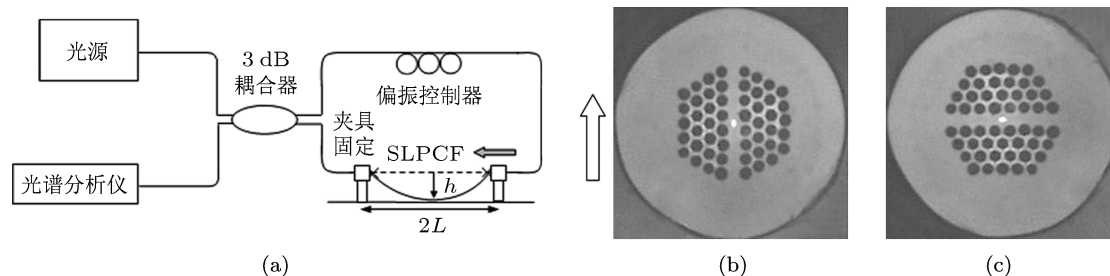


图 1 基于 SLPCF 的 Sagnac 干涉仪型弯曲传感器结构示意图及 SLPCF 横截面图 (a) 弯曲传感器结构图; (b) 线性缺陷与弯曲方向一致的 SLPCF 横截面图; (c) 线性缺陷与弯曲方向垂直的 SLPCF 横截面图, 左侧空心箭头方向表示光纤弯曲方向

自制 SLPCF 的横截面结构, 如图 1(b), (c) 所示, 其传输特性在文献 [15] 有详细报道. 纤芯为直径 $4\text{ }\mu\text{m} \times 2.88\text{ }\mu\text{m}$ 的椭圆形掺锗芯, 在椭圆长轴方向两侧的空气孔被石英棒替代形成线缺陷. 光纤外径为 $125\text{ }\mu\text{m}$, 空气孔直径为 $5.48\text{ }\mu\text{m}$, 空气孔间距为 $8.06\text{ }\mu\text{m}$, 掺锗芯与基底石英材料的折射率差为 0.3% . 在 1550 nm 波长处自制 SLPCF 基模模场面积为 $69.5\text{ }\mu\text{m}^2$, 模式双折射为 0.837×10^{-4} , 群双折射为 1.5077×10^{-4} .

传感头中 SLPCF 的长度为 21.4 cm , 两端由两个光纤夹具固定, 两夹具夹点在同一水平面上且轴线对齐, 一端光纤夹具置于固定平台, 另一端光纤夹具固定在可移动平台上. 平移可移动平台, 可使 SLPCF 弯曲, 相应的弯曲曲率为

$$C = 2h/(h^2 + L^2), \quad (1)$$

其中, h 为 SLPCF 弯曲中心处相对于其夹点平面的位移量, $2L$ 为两夹点间距^[12].

来自宽谱光源的光从 3 dB 耦合器的一端注入, 在 Sagnac 环中被分成顺时针传输和逆时针传输的两束非互易光. 两束光经过 SLPCF 时, 由于其双

传感器的组成结构, 如图 1(a) 所示. 宽谱光源 (superkTM white light laser, NKT Photonics 公司) 为 Sagnac 干涉仪提供输入光, 输出端由光谱分析仪 (AQ6370C, YOKOGAWA 公司) 进行监测. Sagnac 干涉仪由 2×2 的 3 dB 耦合器、偏振控制器 (polarization controller, PC) 和传感头组成. 传感头由一段自制的 SLPCF 和单模光纤接续而成. 当 SLPCF 和单模光纤进行熔接时, 由于不可避免的 SLPCF 部分空气孔塌陷的影响, 传感头的总插入损耗约为 4 dB , 包括 3 dB 耦合器的插入损耗、两个 SLPCF 与普通单模光纤熔接点的损耗、PC 插入损耗及侧漏光子晶体光纤本身的损耗.

折射的作用, 会累积相位差 $\Psi = 2\pi lB/\lambda$. 其中 l 为 SLPCF 的长度, B 为 SLPCF 的双折射, λ 为工作波长. Sagnac 环中的两束光在输出端口发生干涉, 产生的 Sagnac 干涉仪传输谱 T 可以近似表示为周期函数^[19]

$$T = \frac{1 - \cos \Psi}{2}, \quad (2)$$

可见, Sagnac 干涉仪传输谱具有波长依赖性, 随波长变化出现极小值 (波谷) 和极大值 (波峰). 相应的自由光谱区为

$$S = \frac{\lambda_0^2}{lB}, \quad (3)$$

式中 λ_0 为 Sagnac 干涉仪的中心波长.

SLPCF 中对应的群双折射^[15]

$$G(\lambda) = \frac{\lambda_0^2}{lS}. \quad (4)$$

SLPCF 弯曲时, 弹光效应将使 SLPCF 横截面折射率分布发生改变, 引起双折射变化. 若双折射改变量为 ΔB , 则相位差改变量

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi l\Delta B}{\lambda}. \quad (5)$$

波谷 (或波峰) 对应波长的偏移量为

$$\Delta\lambda = S \frac{\Delta\Psi}{2\pi}. \quad (6)$$

可见, 当 SLPCF 弯曲时, 随着弯曲曲率的变化, 波谷 (或波峰) 波长将产生偏移; 检测波长偏移量, 可进行弯曲测量. 另外, 也可通过检测两波谷间的波长间隔获得群双折射, 来进行弯曲曲率测量.

3 实验结果与讨论

弯曲曲率的测量范围和灵敏度, 是弯曲传感器的两个重要技术参数. SLPCF 中线性缺陷的存在, 使其不同放置方向也会影响传感器的响应. 另外, 环境温度变化的影响, 也是弯曲传感器推广应用所必须考虑的一个重要影响因素.

3.1 SLPCF 放置方式的影响

实验上, 针对 SLPCF 弯曲方向和其线性缺陷方向一致及垂直两种情形分别进行了深入研究.

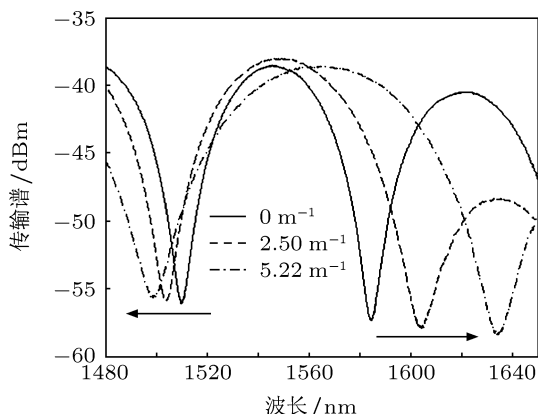


图 2 当光纤弯曲方向与线性缺陷一致时, 不同弯曲曲率时传感器的传输谱

如图 2 所示, 为 SLPCF 光纤弯曲方向和线性缺陷方向一致时, 即椭圆掺锗芯的长轴与光纤弯曲方向一致时, 基于 SLPCF 的 Sagnac 干涉仪型的传输谱; 因其波峰宽而波谷窄, 为提高弯曲曲率的测量精度, 选择波谷的波长偏移量作为检测测量. 光纤未弯曲 (对应弯曲曲率为 0 m^{-1}) 时, 在 $1480\text{--}1645 \text{ nm}$ 波长范围内, 存在着波长分别位于 1509.81 nm 和 1584.62 nm 的两个波谷, 相距 74.81 nm . 按图 1 中的箭头方向移动可移动平台, 改变弯曲曲率, 两波谷向相反方向偏移. 通过改变 SLPCF 的弯曲曲率, 测量波谷的相应波长偏移量及两波谷间距, 可得到两波谷的波长偏移量及 SLPCF

中群双折射随弯曲曲率的变化关系曲线, 如图 3 和图 4 所示.

从图 3 可以看出, 弯曲曲率在 $1\text{--}3.5 \text{ m}^{-1}$ 范围内, 短波长波谷处的波长偏移量随着弯曲曲率线性增加, 超出该范围时呈现出非线性关系; 该线性段适宜于作弯曲曲率检测, 对应的检测灵敏度为 $-3.886 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$. 长波长波谷处的波长偏移量则在 $1.5\text{--}4 \text{ m}^{-1}$ 范围内呈线性关系, 对应的检测灵敏度高达 $19.206 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$.

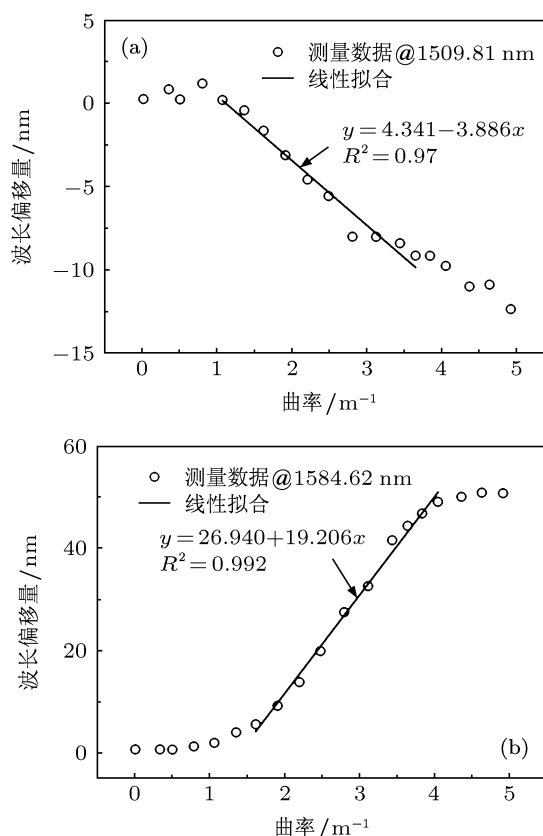


图 3 SLPCF 弯曲方向与线性缺陷方向一致时, 在波长 1509.81 nm 处 (a) 和 1584.62 nm 处 (b) 的波谷处波长偏移量与弯曲曲率的关系图

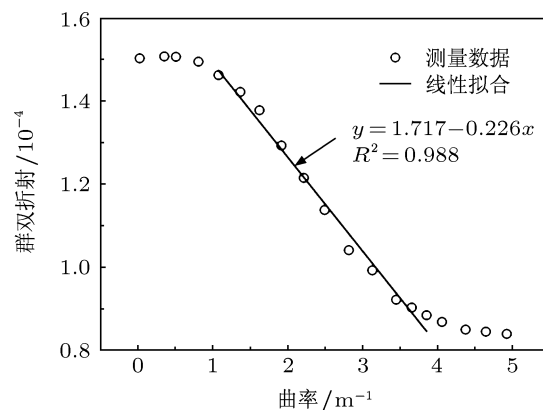


图 4 SLPCF 弯曲方向与线性缺陷一致时, 群双折射随弯曲曲率的变化

由图 4 可以看出, 随着 SLPCF 弯曲曲率的增加, 其群双折射下降; 弯曲曲率在 $1\text{--}4\text{ m}^{-1}$ 范围内时两者为线性关系, 可用作弯曲曲率的检测, 对应的检测灵敏度为 $-2.26 \times 10^{-5}\text{ m}^{-1}$.

SLPCF 弯曲方向和线性缺陷方向垂直时, 传感器的传输谱如图 5 所示. SLPCF 未弯曲时在波长 1509.81 nm 和 1584.62 nm 处分别出现两个波谷; 随着弯曲曲率的增加, 两个波谷均向长波长方向移动.

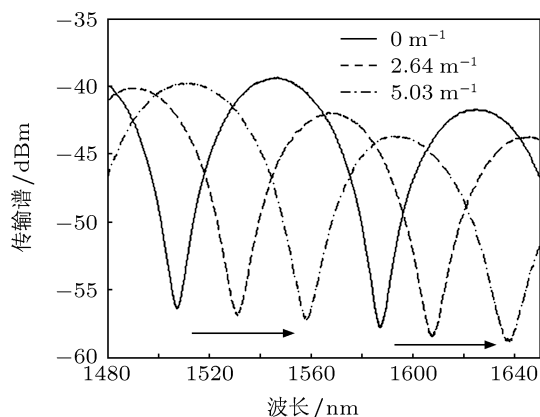


图 5 SLPCF 弯曲方向与线性缺陷垂直时, 不同弯曲曲率时传感器的传输谱

图 6 所示, 为弯曲曲率在 $0\text{--}5.03\text{ m}^{-1}$ 范围内两波谷波长偏移量变化关系曲线. 可见, 两波谷的波长偏移量与弯曲曲率均呈良好的线性关系, 线性相关系数分别为 0.995 和 0.997, 对应的检测灵敏度分别为 $10.798\text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $10.368\text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$, 可实现高灵敏度宽线性测量范围的弯曲传感.

群双折射随弯曲曲率变化的关系曲线, 如图 7 所示. SLPCF 双折射随弯曲曲率呈现出先增后减的趋势. 弯曲曲率在 $0\text{--}3.65\text{ m}^{-1}$ 范围时, 群双折射与弯曲曲率呈线性关系, 相关系数为 0.996, 对应检测灵敏度为 $5.3 \times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$; 弯曲曲率大于 3.65 m^{-1} 时, 群双折射呈现非线性下降趋势. 产生这一转折的原因, 是由于弯曲方向和线性缺陷方向垂直时, SLPCF 椭圆掺锗芯的短轴与弯曲方向一致, 弯曲应力对纤芯短轴方向的模场分布起压缩作用, 增大群双折射; 随着弯曲曲率的进一步增加, 弯曲变形加剧, 光纤长轴方向两侧的线性缺陷受到空气孔挤压应力急剧增加从而一定程度上对长轴方向模场起到抑制作用, 使群双折射下降.

分析上述实验结果可见, 基于 SLPCF 的 Sagnac 干涉仪型弯曲传感器的测量范围和检测灵敏度与光纤弯曲方向以及所采用的测量量相关. 当以群双折射进行弯曲曲率检测时, 弯曲方向和线性缺陷一

致时具有较高的弯曲灵敏度, 但不能测量微小弯曲曲率; 当弯曲方向和线性缺陷垂直时, 虽然检测灵敏度不高, 但测量范围较大, 并可用于微小弯曲曲率的测量. 当以波谷的波长偏移量作为测量参数时, 弯曲方向和线性缺陷一致时, 长波长波谷呈现出

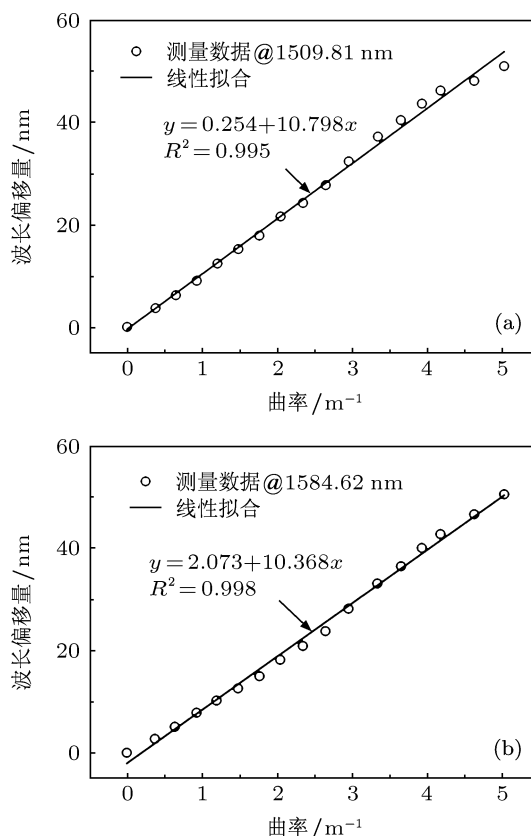


图 6 SLPCF 弯曲方向与线性缺陷垂直时, 在波长 1509.81 nm 处 (a) 和 1584.62 nm 处 (b) 的波谷波长偏移量与弯曲曲率的关系

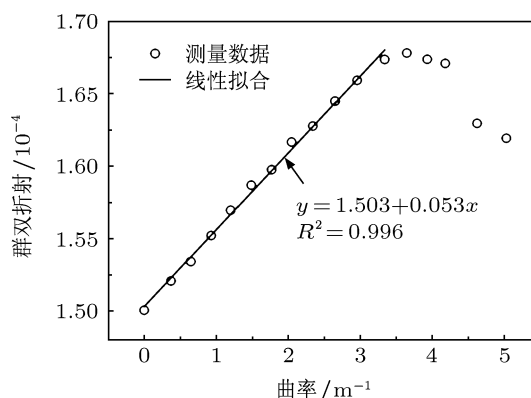


图 7 SLPCF 弯曲方向与线性缺陷垂直时, 群双折射与弯曲曲率的关系图

$19.206\text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ 的高灵敏度, 短波长波谷的线性测量范围和灵敏度均偏小, 且不适于小弯曲曲率的测量. 当弯曲方向和线性缺陷垂直时, 两个波谷均呈

现出高的灵敏度, 线性测量范围可达 0—5.03 m⁻¹, 可以实现高灵敏度宽线性测量范围的弯曲传感.

3.2 温度的影响

SLPCF 的椭圆型掺锗芯和纯硅包层, 两种材料都具有不容忽略的正的热膨胀系数. 研究温度变化对基于 SLPCF 的 Sagnac 干涉仪型弯曲传感器特性的影响, 对推动实际应用具有非常重要的意义.

温度实验所用温控装置的控制精度为 0.1 °C. 在实验中仅将传感头放入温控装置中, 温度变化范围设置为 10—45 °C. 如图 8 和图 9 所示, 分别为群双折射和波谷波长偏移量随温度的变化情况.

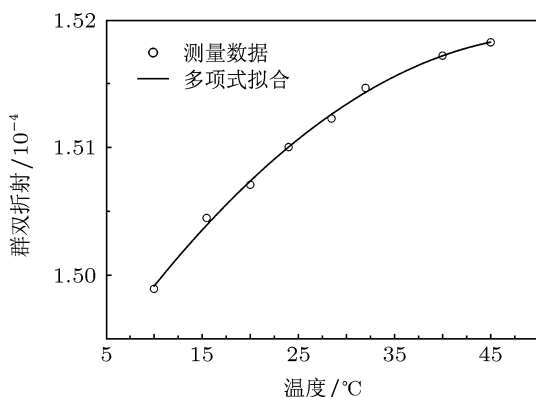


图 8 群双折射随温度的变化关系

如图 8 所示, SLPCF 群双折射与温度呈二次曲线关系, 平均温度敏感系数为 $6.3 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$. 对比无弯曲的情况下 SLPCF 的群双折射为 1.5077×10^{-4} , 可见, 温度变化对 SLPCF 群双折射的影响很小. 产生这一情况的原因, 是温度改变对 SLPCF 横截面结构的影响几乎可以忽略, 导致对其群双折射影响很小. 因此, 采用群双折射作为弯曲传感的检测量, 基于 SLPCF 的 Sagnac 干涉仪型弯曲传感器可视为不受环境温度影响的弯曲传感器.

随着温度的增加, 如图 9 所示, 两波谷均向长波长方向偏移, 波长偏移量均与温度呈良好的线性关系, 长短波长两波谷的波长偏移量所对应的温度敏感系数分别为 73.39 pm/°C 和 47.81 pm/°C. 尽管温度敏感系数不大, 但对于高精度弯曲曲率传感来说还是不能忽略. 因此, 在实际应用中如选用波谷的波长偏移量作为检测量, 需排除温度干扰的影响.

目前, 减小温度对传感器的交叉影响, 主要有增加测温元件和引入测量矩阵这两种方法. 在自由度足够的情况下, 引入测量矩阵可不增加成本地实

现温度和被测量物理量的同时测量, 进而剔除温度的影响 [10].

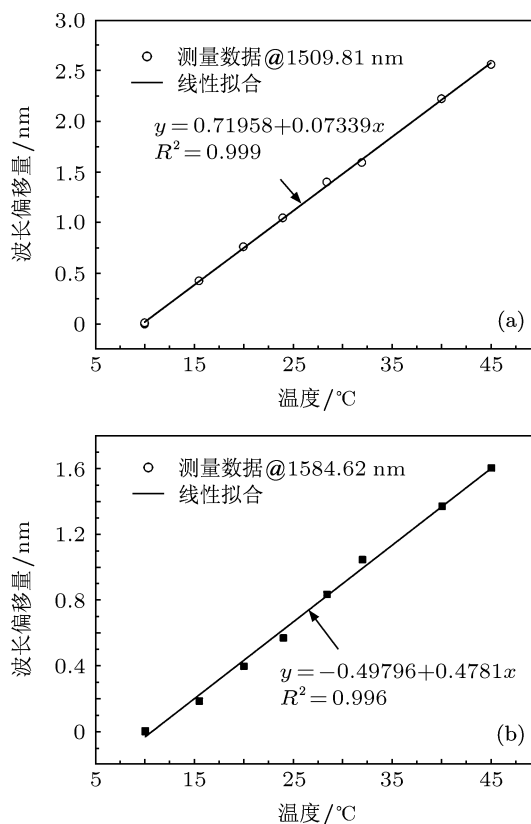


图 9 波谷波长偏移量随温度的变化关系

弯曲方向和线性缺陷方向垂直时, 长短波长两波谷的波长偏移量与弯曲曲率及温度变化均为线性关系. 因此, 可以下述矩阵描述两波谷的波长偏移量与弯曲曲率及温度变化的关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.768 & 0.073 \\ 10.368 & 0.048 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中, $\Delta\lambda_2$ 和 $\Delta\lambda_1$ 分别为长短波长波谷处的波长偏移量, ΔC , ΔT 为光纤弯曲曲率和温度的变化量, 单位分别是 m⁻¹ 和 °C. 由此可得测量矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.199 & 0.306 \\ 42.905 & -44.944 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

可见, 当光纤弯曲时, 监测波谷的波长偏移, 可实现温度和弯曲曲率的同时测量, 进而剔除温度对

弯曲曲率测量的干扰. 温度和弯曲曲率的测量精度分别可达 $\pm 2.2^\circ\text{C}$, $\pm 0.0125\text{ m}^{-1}$.

4 结论

基于研制的 SLPCF, 提出了一种 Sagnac 干涉仪型高灵敏度宽测量范围的弯曲传感器. 当光纤的弯曲方向和线性缺陷一致时, 以波谷波长偏移量进行弯曲曲率检测, 检测灵敏度高但测量范围小, 且

不能进行微小弯曲曲率的测量. 当光纤的弯曲方向和线性缺陷垂直时, 以群双折射为检测量进行弯曲曲率检测, 虽然检测灵敏度低, 但其线性范围为 $0\text{--}3.65\text{ m}^{-1}$, 且可排除环境温度变化的干扰; 以波谷波长偏移量为检测量进行弯曲曲率检测, 可获得 $10.798\text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ 高灵敏度的同时实现 $0\text{--}5.03\text{ m}^{-1}$ 的宽线性测量范围, 通过引入二维测量矩阵可实现温度和弯曲曲率的同时测量, 剔除环境温度变化对检测的干扰.

-
- [1] Guo T, Ivanov A, Chen C, Albert J 2008 *Opt. Lett.* **33** 1004
- [2] Jin Y, Chan C, Dong X, Zhang Y 2009 *Opt. Commun.* **282** 3905
- [3] Shao L Y, Albert J 2010 *Opt. Lett.* **35** 1034
- [4] Shao L Y, Laronche A, Smietana M, Mikulic P, Bock W J, Albert J 2010 *Opt. Commun.* **283** 2690
- [5] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平, 饶云江, 冉曾令, 朱涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [6] Liu Y, Zhang L, Williams J, Bennion I 2001 *Opt. Commun.* **193** 69
- [7] Liu Y, Williams J, Bennion I 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 531
- [8] Frazao O, Silva S, Viegas J, Baptista J M, Santos J L, Kobelke J, Schuster K 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1300
- [9] Harhira A, Lapointe J, Kashyap R 2010 *Optical Society of America*
- [10] Gong Y, Zhao T, Rao Y J, Wu Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 679
- [11] Zhou Y, Zhou W, Chan C C, Wong W C, Shao L Y, Cheng J, Dong X 2011 *Opt. Commun.* **284** 5669
- [12] Gong H, Chan C, Zu P, Chen L, Dong X 2010 *Opt. Commun.* **283** 3142
- [13] Hwang K J, Kim G H, Lim S D, Lee K, Park J W, Lee S B 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 032202
- [14] Zhao Y, Jin Y, Liang H, Wang J, Dong X 2011 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 2066
- [15] Lou S Q, Wang X, Lu W L 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 084216 (in Chinese) [娄淑琴, 王鑫, 鹿文亮 2013 物理学报 **62** 084216]
- [16] Gander M, MacPherson W, McBride R, Jones J, Zhang L, Bennion I, Blanchard P, Burnett J, Greenaway A 2000 *Electron. Lett.* **36** 120
- [17] Han Y G, Kim G, Lee K, Lee S B, Jeong C H, Oh C H, Kang H J 2007 *Opt. Express* **15** 12866
- [18] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, Zhu T 2003 *J. Lightw. Technol.* **21** 1320
- [19] Dong X, Tam H Y, Shum P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 151113
- [20] Frazão O, Silva S, Baptista J, Santos J, Statkiewicz-Barabach G, Urbanczyk W, Wojcik J 2008 *App. Opt.* **47** 4841

Curvature sensor based on side-leakage photonic crystal fiber with high sensitivity and broad linear measurement range*

Lou Shu-Qin[†] Wang Xin Yin Guo-Lu Han Bo-Lin

(School of electronic and information engineer, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 2 May 2013; revised manuscript received 20 May 2013)

Abstract

Based on Sagnac interferometer by incorporating a segment of side-leakage photonic crystal fiber (SLPCF), a curvature sensor with high sensitivity and broad linear measurement range was proposed and demonstrated experimentally. Experimental results show that high sensitivity to curvature can be achieved by measuring group modal birefringence and wavelength shift of transmission dip when the linear side-leakage defect is in the same direction as the bending, but the linear measuring range is not large enough to cover the small curvature. When the linear side-leakage defect is in the vertical direction to the bending, the sensitivity can be as high as $10.798 \text{ nm}\cdot\text{m}^{-1}$ and the linear measurement range as wide as $0\text{--}5.03 \text{ m}^{-1}$ by measuring wavelength shift of transmission. Combined with the introduction of the measurement matrix, the measurement of temperature and curvature can be realized simultaneously, which would offer a way to eliminate the perturbation of the environment temperature to the measurement values of the curvature. Under the same conditions, though the sensitivity obtained by measuring group modal birefringence is low, it can be regarded as a curvature sensor which is insensitive to temperature.

Keywords: curvature sensor, side-leakage photonic crystal fiber, high sensitivity, broad linear measurement range

PACS: 42.81.Pa, 42.81.Bm, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.62.194209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61177082, 61205074), and the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 4122063).

[†] Corresponding author. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn