

分布式本征型法布里-珀罗传感器的研究

桂鑫 胡陈晨 谢莹 李政颖

Research on distributed intrinsic Fabry-Perot sensors

Gui Xin Hu Chen-Chen Xie Ying Li Zheng-Ying

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 050704 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.050704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器

A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber

物理学报.2014, 63(11): 110706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110706>

基于辅助电介质层的棱镜表面等离子体共振效应研究

Study of prism surface plasmon resonance effect based on dielectric-aided layer

物理学报.2014, 63(3): 034207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034207>

仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量

Simultaneous measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured longperiod fiber grating

物理学报.2014, 63(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024206>

镀膜长周期光纤光栅的单峰宽带滤波特性

Broadband single-peak filtering characteristics of coated long-period fiber gratings

物理学报.2012, 61(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200702>

飞秒激光刻蚀非平行壁光纤微腔 Mach-Zehnder 干涉仪特性及其流体传感研究

Study on characteristics and fluid sensing of unparallel wall fiber micro-cavity Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining

物理学报.2012, 61(17): 170701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.170701>

## 分布式本征型法布里-珀罗传感器的研究\*

桂鑫<sup>1)</sup> 胡陈晨<sup>1)†</sup> 谢莹<sup>2)</sup> 李政颖<sup>1)2)</sup>

1) (武汉理工大学, 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

2) (武汉理工大学, 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 武汉 430070)

(2014年8月29日收到; 2014年9月26日收到修改稿)

本文介绍了一种单模-多模-单模结构的本征型法布里-珀罗传感器, 通过对传感器中渐变型多模光纤的光场分布进行分析和仿真, 实现了传感器腔长的优化设计, 大大降低了插入损耗, 增强了传感器复用能力. 实验证明串联复用中的单个传感器的优化后的插入损耗从 4 dB 减少至 0.83 dB, 多个级联复用时损耗变化平缓, 温度测试结果表明级联的 12 个传感器均具有较好的灵敏度和线性度.

**关键词:** 光纤传感器, 本征型法布里-珀罗传感器, 分布式传感

**PACS:** 07.60.Vg, 42.81.Pa

**DOI:** 10.7498/aps.64.050704

## 1 引言

光纤干涉型传感器是当前应用最多的光纤传感器之一, 光纤干涉型传感器按结构可以分为马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, M-Z) 型、萨尼亚克 (Sagnac) 型、法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 型、迈克尔孙干涉仪 (Michelson) 型, 其中光纤 F-P 传感器具有灵敏度高、传感区域集中、结构简单、体积小和抗电磁干扰能力强等优点<sup>[1-7]</sup>, 被广泛应用于测量温度、应变、压力、位移、折射率以及超声波等领域<sup>[8-10]</sup>.

由于光纤 F-P 传感器在各个领域的广泛应用, 以及市场环境要求的日益严苛, 人们对光纤 F-P 传感器的性能和应用范围的要求不断提高. 因此, 优化制作工艺, 降低成本, 制作出复用能力强, 结构新颖的光纤 F-P 传感器, 已经成为今后各国研究者的共同努力方向. 常见的法布里-珀罗干涉传感器可分为非本征型 (extrinsic Fabry-Perot interferometer, EFPI) 和本征型 (intrinsic Fabry-Perot interferometer, IFPI) 两种, 其中 EFPI 的腔体一般是空气隙, IFPI 的腔体一般为光纤. 由于光在波导

中传播是有界的, IFPI 损耗相对较低且 EFPI 的空气腔易受环境影响, 因此本文主要对 IFPI 进行研究. 文献<sup>[11]</sup>通过磁控溅射的方法在一段敏感光纤的两个端面镀上厚度约为 140 nm 的 TiO 薄膜作为反射镜, 然后将其两端分别与单模光纤进行熔接, 形成光纤本征型法布里-珀罗干涉传感器 (intrinsic Fabry-Perot interferometer, IFPI), 实现对温度的测量, 但由于镀膜法需要精准控制薄膜厚度和平坦度且薄膜在熔接过程中容易被破坏, 因此成本较高, 而由镀膜引起的高反射损耗也限制了其级联复用的能力. 文献<sup>[12]</sup>采用熔接法将一段空芯光子晶体与两根普通单模熔接在一起, 熔接的两个端面为 FP 干涉腔的两个反射面, 该传感器在 0—1200  $\mu\epsilon$  范围内应力分辨率为 5  $\mu\epsilon$ , 文献<sup>[13]</sup>提出将多模光纤的两端分别与单模光纤熔接在一起构成单模-多模-单模结构的光纤 F-P 传感器, 通过多模光纤与单模光纤折射率的差异形成反射, 从而构成 F-P 腔, 其制作工艺比较简单, 大大降低了成本, 与此同时, 由于熔接面上的菲涅耳反射强度较低, 可以级联复用多个传感器, 文中共复用了 8 个光纤 F-P 传感器, 各个传感器反射的光强从 20—50 dB 不等, 总损耗大于 20 dB, 这大大限制了复用的数量, 为了更好

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61290311, 61205072) 和湖北省自然科学基金 (批准号: ZRZ019) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chchhu@whut.edu.cn

的实现分布式传感, 本文对文献 [13] 中的结构进行了进一步的研究.

本文通过将两段单模光纤 (single mode fiber, SMF) 与一段渐变型多模光纤 (graded-index multimode fiber, GI-MMF) 直接熔接, 形成单模-多模-单模结构的本征型法布里-珀罗传感器 (singlemode-multimode-singlemode intrinsic Fabry-Perot interferometer, SMS-IFPI), 并根据渐变型多模光纤光场分布的理论分析和模拟仿真结果, 进行传感器腔长的优化设计, 以降低光插入损耗, 增强传感器的复用能力. 实验结果表明, 腔长优化后可复用 12 个 SMS-IFPI 且单个 SMS-IFPI 插入损耗仅为 0.83 dB, 大大低于随机腔长 SMS-IFPI 的 4 dB 光损耗. 为了测试其温度特性, 对整个 SMS-IFPI 级联串进行温度实验测试, 发现 SMS-IFPI 均具有较好的灵敏度和线性度. 从而说明这种 SMS-IFPI 具有损耗低、精度高、结构紧凑、能实现精确的点测量的优点, 在分布式传感网络中有很大的应用潜力.

## 2 理论分析

### 2.1 基本原理

本论文设计的 SMS 干涉型光纤温度传感器其原理图如图 1 所示.

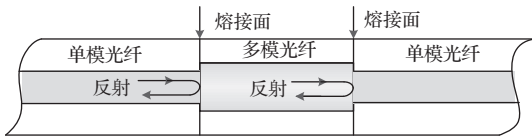


图 1 SMS 干涉型光纤温度传感器结构图

该传感器是将一段多模光纤的两端与两段单模光纤熔接制成, 其中多模光纤的长度即为传感器腔长. 由于多模光纤与单模光纤之间的折射率不同, 在熔接处会形成反射面, 该反射面的反射率最大值为

$$R = \left( \frac{n_{\text{MMF}} - n_{\text{SMF}}}{n_{\text{MMF}} + n_{\text{SMF}}} \right)^2, \quad (1)$$

其中  $n_{\text{MMF}}$  为多模光纤纤芯折射率,  $n_{\text{SMF}}$  为单模光纤纤芯折射率. 根据双光束干涉的原理可知, SMS 干涉型传感器产生的干涉光的光强为

$$I = 2RI_0[1 + \cos(kL + \theta)], \quad (2)$$

其中  $I_0$  为入射光光强,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\theta$  为原始相位差,  $L = 2n_{\text{MMF}}d$  为光程差 (optical path different, OPD). 当传感单元受到外界的温度变化作用时, 由于多模光纤的热膨胀以及热光效应会导致干涉腔光程差变化, 其中多模光纤的折射率随温度的变化为

$$\Delta n_{\text{MMF}} = \frac{\partial n_{\text{MMF}}}{\partial T} \Delta T, \quad (3)$$

而由热膨胀产生的光程差变化为

$$\Delta L = L \frac{\Delta d}{d} = L\alpha_T \Delta T, \quad (4)$$

式中  $\partial n_{\text{MMF}}/\partial T$  为光纤的热光系数, 值约为  $6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_T$  为纤芯的热膨胀系数, 约为  $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ . 因此, 该 IFPI 的光程差总变化为 [14]

$$\begin{aligned} \Delta L &= L \left( \frac{\partial n_{\text{MMF}}}{\partial T} / n_{\text{MMF}} + \alpha_T \right) \Delta T \\ &= L(\delta_T + \alpha_T) \Delta T, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\delta_T$  为光纤的有效热光系数, 由于  $\delta_T$  比  $\alpha_T$  大很多, 热光效应影响光程差变化的主要原因. 由此可知, 光程差的变化与温度的变化成线性关系, 可以通过测量光程差的变化来测量温度.

### 2.2 多模光纤光学模型

为了有效增加 SMS-IFPI 的复用能力, 本文通过光线矩阵对多模光纤进行分析, 根据仿真结果对 SMS-IFPI 进行优化. 计算模型的建立由高斯光束的  $q$  参数开始, 它由高斯光束的曲率半径  $R_c(z)$  和光束半径  $\omega(z)$  决定

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R_c(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z) n_1}, \quad (6)$$

其中,  $n_1$  为多模光纤纤芯的折射率. 在 SMF-MMF 熔接面上的  $q$  定义为  $q_1$ , 且入射场是 SMF 的  $\text{LP}_{01}$  模式. 令在  $z = 0$  的熔接界面处的平面波前的  $R_c(0) \rightarrow \infty$ , 对于 MMF 在  $z = l$  处的  $q$  参数  $q_2$ , 其转换关系如下:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (7)$$

式中, 参数  $A, B, C, D$ , 由 GI-MMF 决定, 为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(gl) & (1/g) \sin(gl) \\ -g \sin(gl) & \cos(gl) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

参数  $g$  为

$$g = \frac{\sqrt{\delta}}{a_{\text{MMF}}}, \quad (9)$$

式中  $\delta = 1 - (n_1/n_2)^2$ ,  $n_1$  和  $n_2$  分别表示MMF纤芯和包层的最大折射率;  $a_{\text{MMF}}$  表示GI-MMF纤芯的半径. 将(6)式代入(7)式并令  $q_1$  的  $R_c(0) \rightarrow \infty$ , 可得

$$\frac{1}{q_2(l)} = M - iN, \quad (10)$$

$$M = \frac{g(\lambda^2 - \pi\omega_0^4 n_1^2 g)^2 \sin(gl) \cos(gl)}{\lambda^2 \sin^2(gl) + \pi^2 \omega_0^4 n_1^2 g^2 \cos^2(gl)}, \quad (11)$$

$$N = \frac{\lambda\pi\omega_0^2 n_1 g}{\lambda^2 \sin^2(gl) + \pi^2 \omega_0^4 n_1^2 g^2 \cos^2(gl)}, \quad (12)$$

式中,  $\omega_0$  是SMF的LP<sub>01</sub>模式的高斯光束半径. 为了找到沿着MMF的平面波前沿位置, 令  $M = 0$ , 得到  $l$  的两个解

$$l_1 = \frac{\pi}{g}N, \quad N = 1, 2, \quad (13)$$

$$l_2 = \frac{\pi}{g}\left(\frac{1}{2} + N\right), \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

将  $l_1$  代入(12)式得到一个与SMF基模  $\omega_0$  相同的光斑半径, 将  $l_2$  代入(12)式得

$$\omega(l) = \frac{1}{\pi\omega_0 n_1 g}. \quad (15)$$

由于

$$\omega(l) \approx (\text{NA}_{\text{SMF}}/\text{NA}_{\text{MMF}})a_{\text{MMF}},$$

其中  $\text{NA}_{\text{SMF}}$ ,  $\text{NA}_{\text{MMF}}$  分别为SMF和MMF的数值孔径. 对于一般的GI-MMF来说(15)的值一般是  $\omega_0$  的2到3倍.

(13)和(14)式说明光在光纤中传播时一系列周期性的聚焦和散焦. 对于一个SMS-IFPI来说, 当腔长削减至  $l_1$  附近时, FP腔中的光重新聚焦到SMF的纤芯上输出, 从而使插入损耗最小. 相对的, 当FP腔的腔长接近  $l_2$  时, 由于模场半径的显著的不匹配, 腔的模式耦合非常低. 即其周期为<sup>[15]</sup>

$$\Lambda = \frac{\pi}{g} = \frac{\pi a_{\text{MMF}}}{\sqrt{\delta}}. \quad (16)$$

因此, 当GI-MMF长度为峰值  $l_1$  时损耗最小, 为波谷  $l_2$  时损耗最大, 在制作过程中可以通过选择优化的干涉腔长度来减少SMS-IFPI的插入损耗.

### 3 实验测试

#### 3.1 插入损耗测试

为了验证2.2中的理论, 我们制作了多组腔长不同的SMS传感器, 并对其插入损耗进行测量. 利

用光学电子显微镜观察已完成的SMS传感器, 如图2所示.

我们从已制作好各种不同腔长的SMS-IFPI中随机选取进行连接, 将SMS-IFPI级联串置于平板上, 测量其反射谱, 然后对反射谱进行快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT), 由于不同腔长的SMS-IFPI对应的反射谱的频率不同, 经过FFT可以将其分离, 其频谱如图3所示.

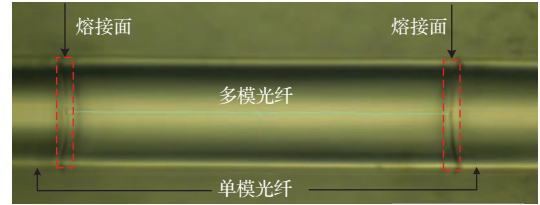


图2 光学电子显微镜下的SMS传感器

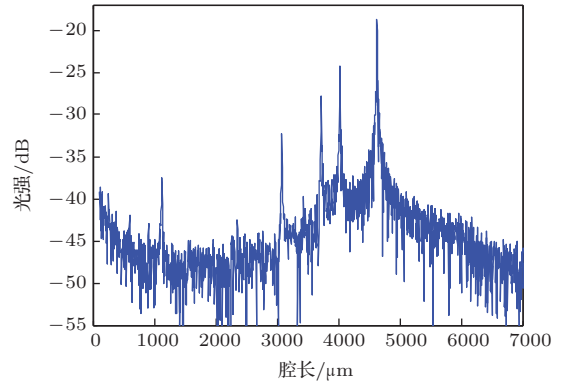


图3 随机长度SMS-IFPI级联频谱

实验中选择的多模光纤纤芯半径  $a_{\text{MMF}}$  为  $31.25 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_1$  为1.476, 包层折射率  $n_2$  为1.450, 根据(16)式可以得到, 光线传输周期  $\Lambda = 525.37 \mu\text{m}$ , 因此GI-MMF的最佳长度为  $525.37 \mu\text{m}$  的整数倍. 由于光在光纤中传播时一系列周期性的散焦和聚焦, SMS-IFPI的插入损耗将随着腔长即GI-MMF的长度周期性的变化, 对单个SMS-IFPI的插入损耗进行测量, 测试的结果如图4所示. 图中, 黑色实线表示周期为  $\Lambda = 525.37 \mu\text{m}$  的插入损耗随GI-MMF长度周期性变化仿真曲线, 红色三角形表示实际制作的多个不同腔长的SMS-IFPI的插入损耗测量结果. 将其进行对比发现, 实际的损耗值和理论分析基本相符, 多模光纤长度为优化的长度时, 能有效的减小插入损耗.

为了进一步研究GI-MMF长度对SMS-IFPI插入损耗的影响, 我们将GI-MMF长度分别为578

$\mu\text{m}$ , 1037  $\mu\text{m}$ , 1579  $\mu\text{m}$ , 2142  $\mu\text{m}$ , 2567  $\mu\text{m}$ , 3170  $\mu\text{m}$ , 3695  $\mu\text{m}$ , 4223  $\mu\text{m}$ , 4749  $\mu\text{m}$ , 5239  $\mu\text{m}$ , 5784  $\mu\text{m}$  以及 6318  $\mu\text{m}$  即腔长为 525.37  $\mu\text{m}$  整数倍制作的 SMS-IFPI 依次连接, 将 SMS-IFPI 级联串置于平板上, 测量其反射谱, 然后对反射谱进行 FFT, 并以每增加三个为一组进行展示, 其频谱图如图 4 所示.

由图 3 与图 5(d) 可知, 随机长度的 SMS-IFPI 级联串总损耗接近 20 dB, 随着串联 SMS-IFPI 个数的增加 SMS-IFPI 的损耗急剧增大, 单个 SMS-IFPI 插入损耗约为 4 dB 的. 而优化长度后的 SMS-IFPI 级联串总损耗约为 10 dB, 且随着串联 SMS-IFPI 个数的增加损耗变化平缓, 单个 SMS-IFPI 的插入损耗约为 0.83 dB. 结果证明, 优化长度后能很好的

降低 SMS-IFPI 的插入损耗, 增加其复用能力, 有利于分布式传感网络的搭建.

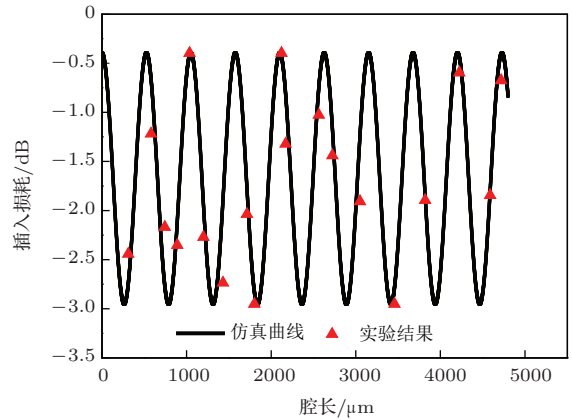


图 4 单个 SMS-IFPI 插入损耗

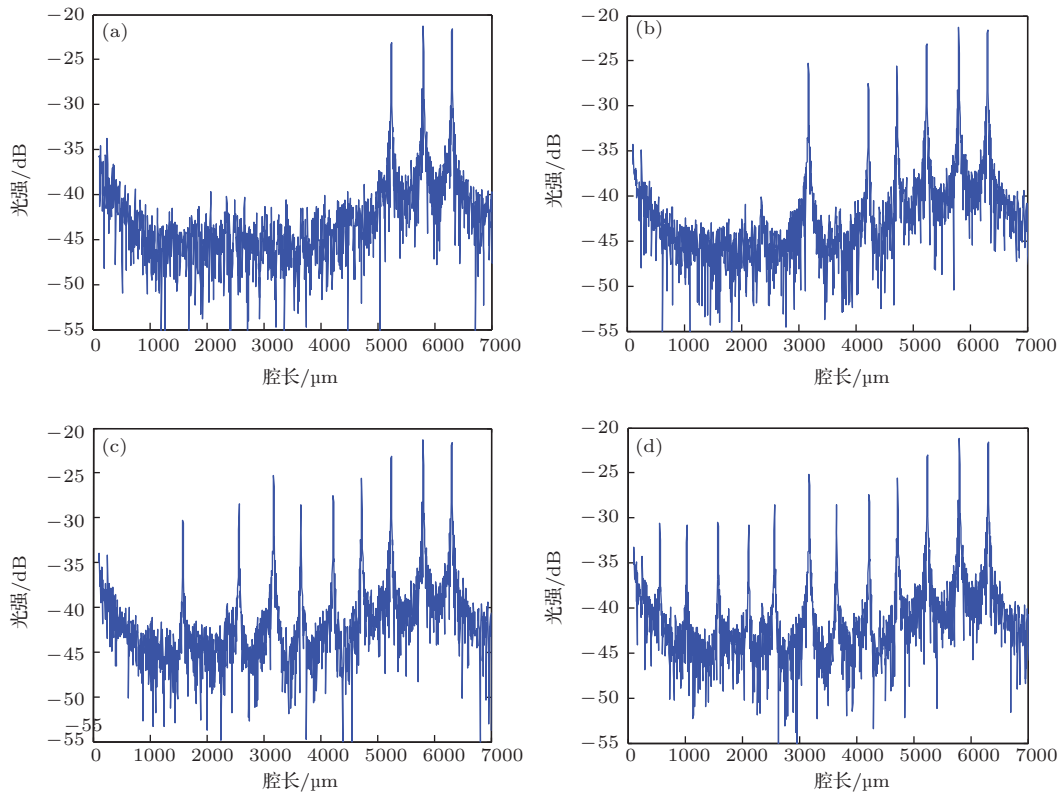


图 5 优化长度 SMS-IFPI 级联频谱

### 3.2 分布式温度实验

为研究制作的分布式网络对温度的测量准确度, 实验测试了传感网络中各个 SMS-IFPI 对温度的响应, 实验装置如图 6 所示. 扫描光谱仪为 SM125, 该光谱仪的波长范围为 1510—1590 nm, 采样间隔为 5 pm. 将级联串固定在平板上, 全部置于恒温箱中. 控制室温为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 将温控箱温度从

30  $^{\circ}\text{C}$  平稳上升至 100  $^{\circ}\text{C}$ , 每隔 5  $^{\circ}\text{C}$  采集一次反射光谱, 并在每个温度点保持 30 min.

SMS-IFPI 级联串的反射谱包含的频率成分较多, 从中任意挑选一个腔长的 SMS-IFPI 反射谱进行观察 (如 578  $\mu\text{m}$ , 2567  $\mu\text{m}$ , 4223  $\mu\text{m}$ , 6318  $\mu\text{m}$ ), 对反射谱进行 FFT, 根据频率分离不同腔长的 SMS-IFPI, 对其进行解调得到单个 SMS-IFPI 传感器腔长随温度变化的曲线, 如图 7 所示.

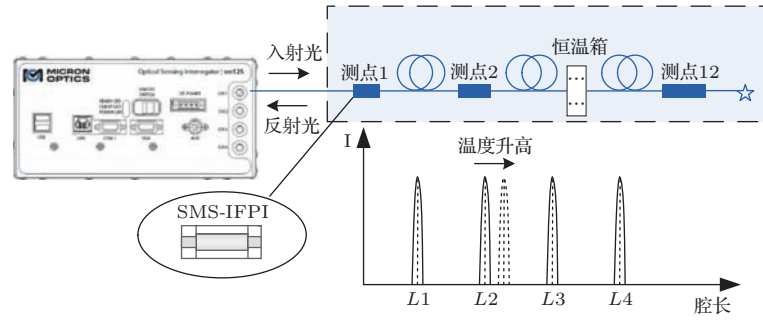


图6 分布式实验系统图

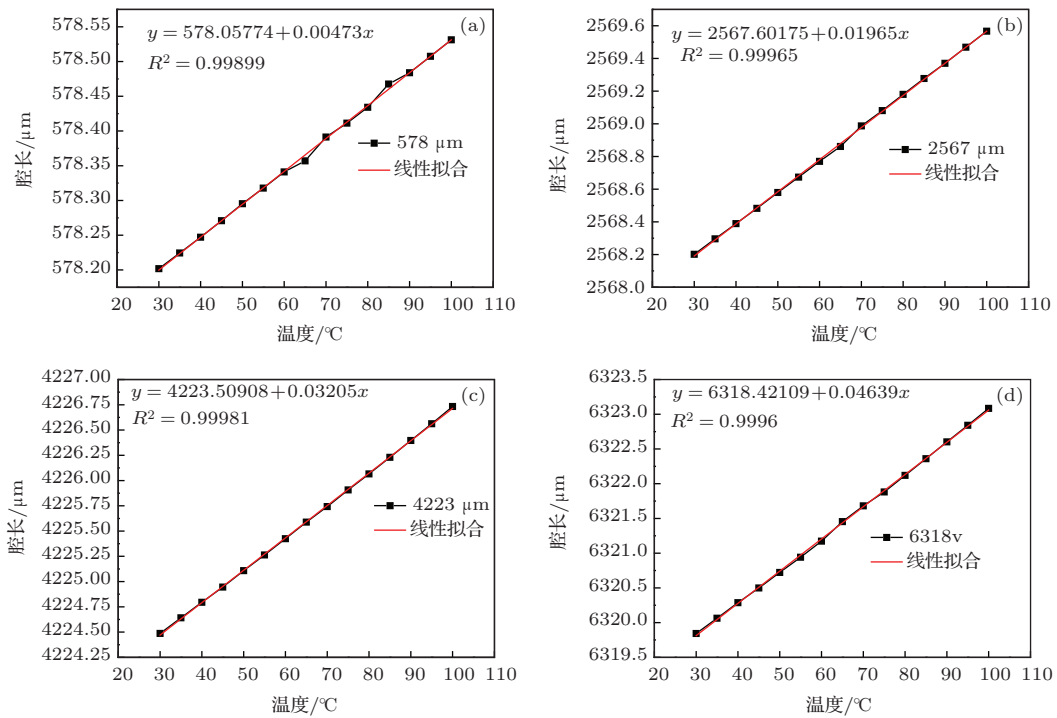


图7 腔长随温度变化拟合曲线 (a) 578  $\mu\text{m}$ ; (b) 2567  $\mu\text{m}$ ; (c) 4223  $\mu\text{m}$ ; (d) 6318  $\mu\text{m}$

表1 各腔长 SMS-IFPI 灵敏度及线性拟合度

腔长/ $\mu\text{m}$	灵敏度/ $(\mu\text{m}/^\circ\text{C})$	线性拟合度
578	0.00473	0.99899
1037	0.00759	0.99987
1579	0.01173	0.95537
2142	0.01556	0.93353
2567	0.01965	0.99965
3170	0.02293	0.99890
3695	0.02711	0.99937
4223	0.03205	0.99981
4749	0.03565	0.99944
5239	0.03978	0.99867
5784	0.04369	0.99910
6318	0.04639	0.99960

表1分别列举了不同腔长的SMS-IFPI传感器的温度灵敏度和其温度曲线的线性拟合度. 由表1可以看出, SMS-IFPI级联传感器在30—100  $^\circ\text{C}$ 温度范围内, 灵敏度高且线性度较好, 可以满足分布式温度测量.

## 4 结 论

本文通过对渐变型多模光纤(GI-MMF)中的光场分布进行分析和仿真, 优化了GI-MMF的传感长度, 降低了插入损耗, 提高了SMS-IFPI传感器的复用能力, 实验测试表明, 这种SMS-IFPI传感器损耗低、精度高、结构紧凑、能实现精确的点测量, 在分布式传感网络中有很大的应用潜力.

参考文献

- [1] Chen W, Meng Z, Zhou H J, Luo H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184210 (in Chinese) [陈伟, 孟州, 周会娟, 罗洪 2012 物理学报 **61** 184210]
- [2] Rao Y J, Xu B, Ran Z L, Gong Y 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 024208
- [3] Zhu J L, Wang M, Cai D Y, Jia S 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0428002 (in Chinese) [朱佳利, 王鸣, 蔡东艳, 贾晟 2014 光学学报 **34** 0428002]
- [4] Liang S, Zhang C X, Lin B, Lin W T, Li Q, Zhang X, Li L J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124217
- [5] Ma H Q, Zhao J L, Wu L A 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1674
- [6] Deng M, Rao Y J, Zhu T, Duan D W 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 1790 (in Chinese) [邓明, 饶云江, 朱涛, 段德稳 2009 光学学报 **29** 1790]
- [7] Manuel R M, Shlyagin M G, Miridonov S V, Meyer J 2012 *IEEE Sens. J.* **12** 124
- [8] Rao Y J, Li H, Zhu T, Deng M 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1484 (in Chinese) [饶云江, 黎宏, 朱涛, 邓明 2009 中国激光 **36** 1484]
- [9] Wang W Y, Wen J X, Pang F F, Chen N, Wang T Y 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 1005001 (in Chinese) [王文轶, 王建湘, 庞拂飞, 陈娜, 王廷云 2012 中国激光 **39** 1005001]
- [10] Gong Y, Zhou Y, Rao Y J, Zhao T, Wu Y, Ran Z L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064202 (in Chinese) [龚元, 郭宇, 饶云江, 赵天, 吴宇, 冉曾令 2011 物理学报 **60** 064202]
- [11] Lee C E, Taylor H F 1988 *Electron. Lett.* **2** 48
- [12] Rao Y J, Zhu T, Yang X C, Duan D W 2007 *Opt. Lett.* **32** 2662
- [13] Huang Z Y, Zhu Y Z, Chen Y P, Wang A B 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2403
- [14] Shen F B, Wang A B 2005 *Appl. Opt.* **44** 5206
- [15] Ma C, Dong B, Lally E M, Wang A B 2012 *Lightwave Technol.* **30** 2281

## Research on distributed intrinsic Fabry-Perot sensors\*

Gui Xin<sup>1)</sup> Hu Chen-Chen<sup>1)†</sup> Xie Ying<sup>2)</sup> Li Zheng-Ying<sup>1)2)</sup>

1) (National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

2) (Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

( Received 29 August 2014; revised manuscript received 26 September 2014 )

### Abstract

This paper introduces a kind of single mode-multimode-single mode intrinsic Fabry-Perot interferometer (SMS-IFPI). We optimize the sensing length of the graded-index multimode fiber (GI-MMF), insertion loss, and multiplexing capability through the analysis and simulation of the optical field distribution in the GI-MMF. Experiment proves that the insertion loss of a single sensing unit from the optimized cascade SMS-IFPI may be decreased from 4 dB to 0.83 dB. Testing the response characteristics of SMS-IFPI temperature sensors in the distribution under the condition of different temperature, the experimental results show that each SMS-IFPI can have better sensitivity and linearity.

**Keywords:** fiber opticsensors, intrinsic Fabry-Perot interferometer, distributed sensing

**PACS:** 07.60.Vg, 42.81.Pa

**DOI:** 10.7498/aps.64.050704

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61290311, 61205072), and the Natural Science Foundation of Hubei Province of China (Grant No. ZRZ019).

† Corresponding author. E-mail: [chchhu@whut.edu.cn](mailto:chchhu@whut.edu.cn)