

一种单模-多模-单模结构的干涉型光纤温度传感器

王迎勋, 王彩峰, 王香, 胡倩, 王妍力, 刘太伟

齐鲁理工学院, 山东济南 250200

收稿日期: 2019-10-12; 接收日期: 2019-11-02

【摘要】 SMS 光纤结构是一种近年来新兴的光纤器件, 该结构光纤具有结构简单、易于实现、成本低廉、灵敏度高和无温度应力交叉敏感等特性. 在光纤传感技术领域是一种继光纤光栅之后的具有广泛发展前景的光纤器件. 从理论上分析了 SMS 结构和 SMS 级联结构的光纤传感原理, 并从实验上研究了 SMS 结构和级联 SMS 结构的温度传感特性. 实验表明: 对于 SMS 结构光纤传感器, 随着温度的增加, 特征波长移动量逐渐增加, 向长波方向漂移了 4.05 nm, 其传感器的温度灵敏度为 15.76 pm/°C; 对于级联 SMS 结构的光纤传感器, 级联后不改变原来 SMS 结构的中心波长的位置, 两个 SMS 结构仍然是独立的, 不相互影响. 所以说将两个 SMS 结构串联是可行的, 可以用于温度和应力的同时测量, 也可以用于分布式光纤传感器.

关键词: SMS 光纤结构, 温度传感, 级联 SMS 结构, 独立

PACS: TN274

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.04.007

Interferometric Fiber Optic Temperature Sensor with Singlemode Fiber-Multimode Fiber- Singlemode Fiber Structure

WANG Yingxun, WANG Caifeng, WANG Xiang, HU Qian, WANG Yanli, LIU Taiwei

Qilu Institute of Technology, Shandong Jinan, 250200, China

Received date: 2019-10-12; accepted date: 2019-11-02

【Abstract】 SMS fiber structure is a kind of optical fiber devices emerging in recent years, this optical fiber structure has the advantages of simple structure, easy to implement, low cost, high sensitivity and temperature stress of cross sensitive features. In the field of optical fiber sensing technology, this structure has broad prospects for development following fiber grating. Theoretically, this paper analyzes the sensing principle of the SMS structure and the SMS cascade structure, and studies the corresponding structure of optical fiber, such as temperature characteristic. Through experiment, this paper studies the temperature sensing properties of the SMS structure and the SMS cascade structure. The experiment results show that with the increase of temperature, the characteristic wavelength shift increases gradually and drifts in the direction of long wave 4.05 nm; For fiber optic sensors with cascade SMS structure, the position of the central wavelength of the original SMS structure is not changed after cascade, and the two SMS structures are still independent and do not affect each other. So it is possible to connect two SMS structures in series for simultaneous temperature and stress measurements as well as for distributed fiber optic sensors.

Keywords: SMS Optical Fiber Structure, Temperature Sensing, SMS Cascade Structure, Independent

PACS: TN274

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.04.007

Reference method: WANG Yingxun, WANG Caifeng, WANG Xiang, HU Qian, WANG Yanli, LIU Taiwei, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0290 (2019)

1 引言

对于光纤传感器的研究,已经从传统的光纤光栅传感器和分布式光纤传感器发展到了基于多模干涉的光纤传感器,而且已经开发出了许多基于多模干涉的新型光波导器件,对于研究这种新型的光纤传感器奠定了扎实的前期基础。

其中光纤温度传感器是利用部分物质吸收的光谱随温度变化而变化的原理,分析光纤传输的光谱从而了解实时温度. 其物理本质是利用光纤中传输的光波的特征参量,如振幅、相位、偏振态、波长和模式等,对外界温度具有敏感特性,属于非接触式测温. 光纤温度传感器自问世以来,主要应用于电力系统、建筑^[1]、化工、航空航天^[2]、医疗^[3]以至海洋开发等领域,并已取得了大量可靠的应用实绩. 它的应用是一个方兴未艾的领域,有着非常广阔的发展前景,迄今为止,国内外已经有不少相关研究,虽然在灵敏度、测量范围、分辨率等方面均有了很大的发展,但是相信随着研究的深入,根据具体的应用目的,会有越来越多的精度更高、结构更简单、成本更低、更实用的方案提出,更进一步促进温度传感器的发展. 所以亟需研究出一种集制备简单、成本低廉、性能良好于一身的新型的光纤温度传感器。

本文提出了一种 SMS 结构的干涉型光纤温度传感器. 该温度传感器仅需将一段多模光纤 (Multimode fiber, MMF) 夹熔在两段较短的单模光纤 (Single Mode fiber, SMF) 之间便可制成,制作简单、成本低廉. 该传感器利用多模光纤 (Multimode fiber, MMF) 中包层模与纤芯模之间的干涉,使得外界环境能够更加直接地作用于光纤内部的光场,从而能获得较高的灵敏度^[4].

2 SMS 结构光纤温度传感原理

2.1 温度传感原理

首先看 SMS 光纤结构的传感原理,如图 1 所示. 在两段单模光纤 (SMF) 中间熔接一段多模光纤 (MMF)^[5],由于单模光纤和多模光纤的纤芯半径相差较大,所以在熔接之前要先设置好熔接机的参数,必须在 MM-MM 的模式下熔接,这样可以最大限度地减小熔接损耗. 光源的光进入第一段单模光纤,作为多模光纤的入射场,在接近多模光纤前表面时光场分布接近高斯分布. 由单模光纤传来的基模光进

入多模光纤后,多模光纤中的高阶本征模 (LP_{0m}) 被激励,在传输过程中不同的模式在多模光纤中相互耦合,由于不同阶数的导模模场分布的差异,因而导致它们在向单模光纤基模耦合时耦合系数间的不同,其结果是只有少数的导模才有可能被有效地耦合到单模光纤中去^[6],其他模式将耦合到单模光纤的包层中,最终被损耗掉,所以第二段单模光纤具有选择模式的作用。

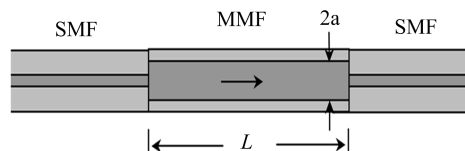


图 1 SMS 型光纤传感器结构模型

Fig. 1 Structure model of SMS optical fiber sensor

多模光纤中的模式被激励后,假设其中存在两种不同的模式 LP_{0m} 和 LP_{0n} ,由于这两种模式在多模光纤中的传输路径不同,所以存在相位差 $\beta_m - \beta_n$,可以表示为^[7]

$$\beta_m - \beta_n = \frac{u_m^2 - u_n^2}{2ka^2n_o} \quad (1)$$

其中, $u_m = \pi\left(m - \frac{1}{4}\right)$, $u_n = \pi\left(n - \frac{1}{4}\right)$, 是零阶贝塞尔 (Bessel) 方程的根; a 为多模光纤的纤芯半径; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数; n_o 是多模光纤纤芯折射率. 在 L 处发生干涉时满足

$$(\beta_m - \beta_n)L = 2\pi N \quad (2)$$

其中 N 为整数.

从上面两式,可以得出,干涉极大发生时,波

$$\lambda = \frac{16a^2n_oN}{(m-n)[2(m+n)-1]L} (m > n) \quad (3)$$

所以,两个临近极大(或极小)之间的波长差为:

$$\lambda = \frac{16a^2n_o}{(m-n)[2(m+n)-1]L} \quad (4)$$

其中 $m > n$.

由(3)式可以看出,干涉极值波长和多模光纤折射率、纤芯半径以及多模光纤的长度 L 有关. 例如,当温度升高时,由于热胀冷缩原理,多模光纤的半径增加,长度减小,由式(3)可以看出,发生干涉的波长将向长波方向移动,通过观察光谱仪可以得到极值波长移动量,再反过来界定温度升高量. 这就是 SMS 型光纤温度传感器的工作原理。

接下来是级联式 SMS 光纤温度传感器的传感原理如图 2 所示,将 A 的出射单模光纤和 B 的入射单模光纤熔接起来,就构成了串联式的 SMS 结构光纤传感器,在光传输过程中,AB 中的多模光纤都会激励起一系列的模式,在传输过程中不同的模式在多模光纤中相互耦合。

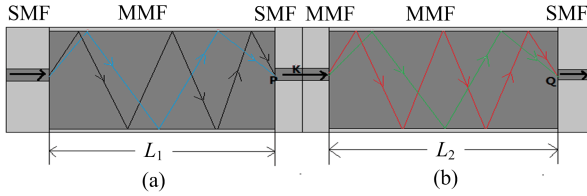


图 2 级联式 SMS 光纤温度传感器模型

Fig. 2 The cascading SMS optical fiber temperature sensor model

设在 A 中存在两种模式 LP_{0m} 和 LP_{0n} ,从图 1.2 中可以看出,两种模式的传输路径不同,所以产生了相位差 $\beta_m - \beta_n$,在 L_1 处发生干涉时满足^[8]

$$(\beta_m - \beta_n) L_1 = 2\pi N_1 \quad (5)$$

从图 2 可以看出,A 在多模光纤末端 P 点处发生了干涉,此时可以由单个 SMS 的原理推导出干涉极值波长满足

$$\lambda = \frac{16a^2 n_o N_1}{(m - n) [2(m + n) - 1] L_1} \quad (m > n) \quad (6)$$

光波 K 经 A 的出射单模光纤传输到 B 的入射单模光纤,由于单模光纤和多模光纤的纤芯半径相差较大,所以光波 K 几乎是垂直入射到 B 的多模光纤中,由光纤中光线的传播理论可知,垂直入射的光会沿光纤轴线直线传播,所以光波 K 沿 B 的多模光纤的光纤轴线传播到 B 的出射单模光纤,这是 A 中多模光纤发生干涉时的传光原理.同时,光波 K 到达 B 的多模光纤时,也会激励起一系列的模式,假设其中存在两种不同的模式 $LP_{0m'}$ 和 $LP_{0n'}$,从图 2 中可以看出,在 Q 点处发生了干涉,同理,可以推导出干涉波长满足

$$\lambda_B = \frac{16a^2 n_o N_2}{(m' - n') [2(m' + n') - 1] L_2} \quad (7)$$

其中 $(m' > n')$ 。

由上面分析可以看出,由于发生干涉后光几乎是沿着光纤轴线传播的,所以 AB 串联后会保持各自独立的光谱,而且交换 AB 的位置也不会影响光谱,例如只对其中一个 SMS 结构加温或者降温,另外一个 SMS 结构的光谱几乎没有变化.但是必须要

有两个很重要的前提,第一,SMF 和 MMF 在熔接时芯径要完全对接,如果发生错位,就很有可能观察不到准确的干涉谱;第二,传感部分一定要水平放置,如果发生形变,会改变 MMF 的参数。

2.2 理论模型

当外界温度发生变化时,光纤纤芯材料的折射率、纤芯半径和光纤长度都是温度的函数,所以由于温度变化而引起的相对波长变化可以表示为^[9]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} &= \frac{\partial n_o}{n_o \partial T} \Delta T + 2 \frac{\partial a}{a \partial T} \Delta T - \frac{\partial L}{L \partial T} \Delta T \\ &= (\alpha + \zeta) \Delta T \end{aligned} \quad (8)$$

其中, α 和 ζ 分别表示多模光纤材料的热膨胀系数^[10]和热光系数^[10]。

从式(8)中可以看出当中心波长一定的时候,温度的变化与波长差是成线性关系的。

接下来就分别分析光纤折射率、半径和长度随温度的变化情况.首先分析光纤折射率随温度变化的情况,光的色散现象是指当不同波长的光入射到介质表面时,介质中的折射率随着光波波长变化的现象,色散也是对折射率和波长的关系的描述.折射率随着波长增加而减小的色散叫做正常色散;在固有频率附近的区域,介质对光有强烈的吸收,这段光的吸收区就是反常色散区.一般地,可以使用经验公式柯西公式,来计算正常色散中不同波长所对应的折射率,如下:

$$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3^2} \quad (9)$$

众所周知,光纤的纤芯和包层都是由石英-以纯净的二氧化硅材料为主-制成的,对于石英材料,在波长范围内为可用 $0.2 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 时,式(9)中的 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ 近似取值^[11] 为 $A_1 = 0.6961663$, $A_2 = 0.4079426$,

$A_3 = 0.8974794, B_1 = 0.068403, B_2 = 0.1162414, B_3 = 9.896161$. 材料的热光系数 ζ ,又叫折射率的温度系数,是指光学材料的折射率随温度的变化率,定义为:

$$\xi = (\Delta n / \Delta T) / n \quad (10)$$

其中, n 为折射率; Δn 为折射率的变化量; ΔT 为温度的变化量.对于熔融石英, $\zeta \approx 6.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,所以, T 摄氏度时石英的折射率为:

$$n_T = n_0 + 6.7 \times 10^{-6} \times (T - T_0) \times n_0 \quad (11)$$

其中, n_0 是室温状态下石英的折射率。

当温度发生变化时,由于热胀冷缩原理,光纤的长度和半径也会发生变化,对于熔融石英, $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,所以 T 摄氏度时光线的长度和半径分别定义为:

$$L_T = L_0 + 0.5 \times 10^{-6} \times (T - T_0) \times L_0 \quad (12)$$

$$R_T = R_0 + 0.5 \times 10^{-6} \times (T - T_0) \times R_0 \quad (13)$$

其中, L 是室温状态下光纤长度; R 是室温状态下光纤半径.

在 Rsoft 软件内建立仿真模型,并对初始输入的光场能量进行归一化,模拟得到的 SMS 光纤结构的内部光场分布如图 3 所示.从图中可以发现,光在单模光纤中传输时,光场的能量分布没有发生变化,保持为 1.0,当光从单模光纤进入多模光纤时,激发出了多个模式,各个模式之间产生耦合,导致能量变弱或叠加.从多模光纤输出至单模光纤后,由于在传播过程中的损耗和色散,归一化光强降为 0.85.

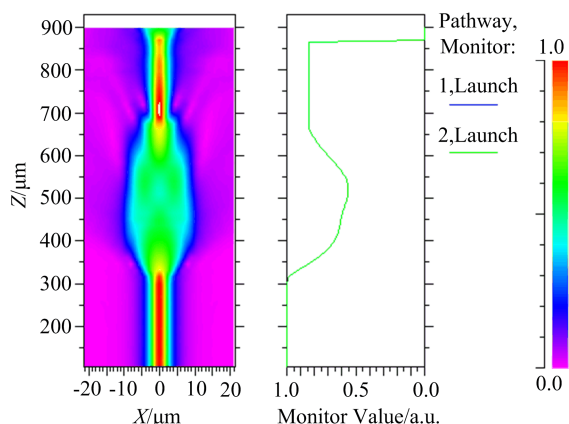


图 3 SMS 光纤结构的光场传输示意图

Fig. 3 Beam propagation in the SMS fiber structure

3 SMS 光纤结构的温度传感特性实验研究

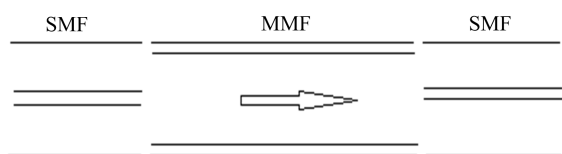


图 4 SMS 型光纤温度传感器的结构

Fig. 4 Structure of the SMS optical fiber temperature sensor

3.1 实验装置

SMF 采用 G652,其纤芯直径为 $8.2 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.14. 首先将其保护层除去,然后使用光纤切刀将其端面切成与轴线垂

直. 多模光纤使用 Nufern MM-S105/125-15A 折射率阶跃光纤,其纤芯直径为 $105 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.14,先将其一端保护层除去,然后使用光纤切刀将其端面切成与其轴线垂直,与端面处理后的单模光纤熔接,然后在多模光纤上量出 25 mm 的长度用光纤切刀切断,之后,再与令一段处理后的单模光纤熔接,就制成了如图 5 所示的 SMS 结构的光纤传感器. 由前面的理论研究可知,当外界温度发生变化时,多模光纤的相应参数就会发生相应变化,其变化又反应在干涉波长的变化上,而干涉波长的变化又可以通过光谱仪直接看到,所以温度的变化可以间接反应在干涉波长的变化上,这就是光纤温度传感器的基本原理.

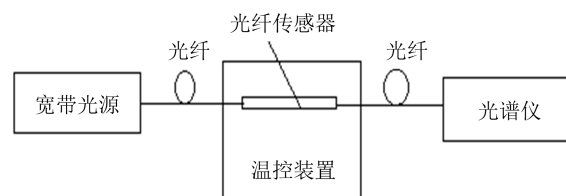


图 5 SMS 型光纤温度传感器测试装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the SMS optical fiber temperature sensor testing device

在将制作好的光纤传感器放入温控装置之前,先将宽带光源和光谱仪打开,因为两者启动需要一定的时间,并且刚启动的时候光波不稳定,会影响实验的精确度,然后将光纤传感器水平的放入温控装置,如果有弯曲就会难以分辨出是温度造成的还是弯曲造成的,因为光纤弯曲也会造成多模光纤的相应参数发生变化,所以多模光纤的位置一定要水平,单模光纤只作为传光光纤就可以弯曲了,放入的时候要把两段单模光纤的一部分露在温控装置的外面,一段和宽带光源熔接,一段和光谱仪熔接,通过改变温控装置的温度,就可以观察出光谱仪中波长的变化量.

3.2 实验结果与讨论

首先先观察常温下这种传感器的干涉波长情况,其透射光谱如图 2.3 所示,实验中选取 $\text{span} = 50$. 由图 2.3 看出,其偏振波长位置为 1548.1667 nm,透射光谱非常稳定,没有任何的噪声影响,说明前面的实验过程是正确的,多模光纤放置的也比较水平,外界温度比较稳定.

接下来,就要对光纤传感器进行加温操作,温度

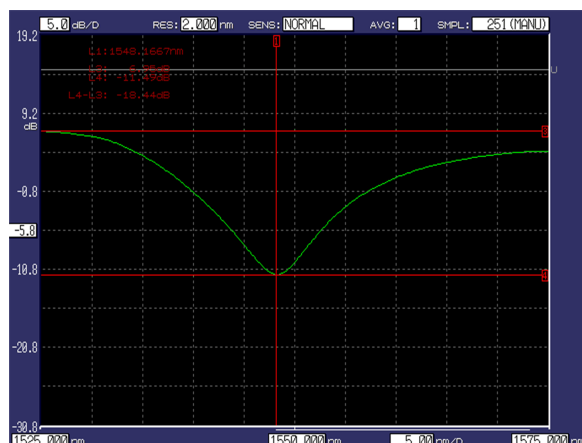


图 6 常温下 SMS 光纤传感器透射光谱

Fig. 6 Transmission spectra of the SMS optical fiber sensor in room temperature

的变化范围为 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 320\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每增加 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 就记录下光谱仪上特征波长的位置, 在该温度范围内, 温度 and 对应波长的变化数据如表 2.1 所示, 特征波长移动量与温度的拟合曲线如图 2.4 所示.

表 1 中心波长随温度变化的数据表

Tab. 1 The data table of the change of center wavelength with temperature

温度值/ $^{\circ}\text{C}$	极值对应波长/nm	波长差/nm
20	1 546.200 0	0.000 0
40	1 546.333 3	0.133 3
60	1 547.066 7	0.866 7
80	1 547.333 3	1.133 3
100	1 547.650 0	1.450 0
120	1 546.550 0	0.350 0
140	1 547.400 0	1.200 0
160	1 548.700 0	2.500 0
180	1 549.000 0	2.800 0
200	1 549.350 0	3.150 0
220	1 549.450 0	3.250 0
240	1 549.700 0	3.500 0
260	1 550.500 0	4.300 0
280	1 550.850 0	4.650 0
300	1 550.450 0	4.250 0
320	1 550.250 0	4.050 0

由上图可以看出, 随着温度的增加, 特征波长移动量逐渐增加, 向长波方向漂移了 4.05 nm , 两者成

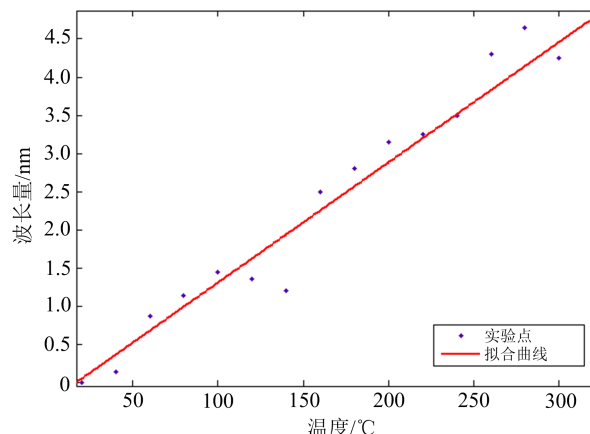


图 7 $L=25\text{ mm}$ 时的温度拟合曲线

Fig. 7 Temperature fitting curve of $L=25\text{ mm}$

线性关系, 且斜率为 $0.01576\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 即传感器的温度灵敏度为 $15.76\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. 由此可以看出, SMS 型的光纤温度传感器的灵敏度比传统的光纤温度传感器高.

4 级联 SMS 光纤温度传感器结构

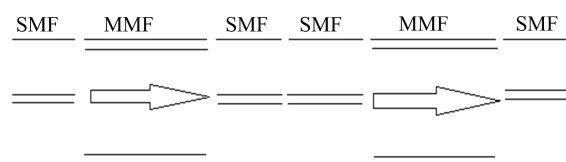


图 8 级联型温度传感器结构

Fig. 8 Cascade temperature sensor structure

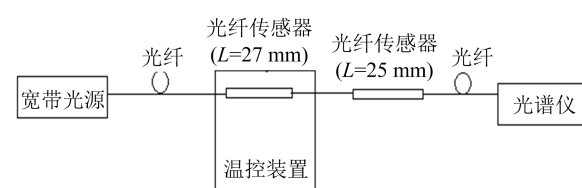


图 9 级联型 SMS 型光纤温度传感器测试装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the cascade SMS optical fiber temperature sensor testing device

4.1 实验装置

将两个 SMS 光纤结构熔接起来就得到了本实验的串联式光纤传感器, 其传播形式和单个 SMS 结构是一样的. 单模光纤也是采用 G652, 两段多模光纤均采用 Nufern MM-S105/125-15A 折射率阶跃光纤, 但是长度不一样, 分别是 $L=25\text{ mm}$ 和 $L=27\text{ mm}$. 常温下, $L=25\text{ mm}$ 和 $L=27\text{ mm}$ 以及它

们串联后的透射光谱图如下所示:

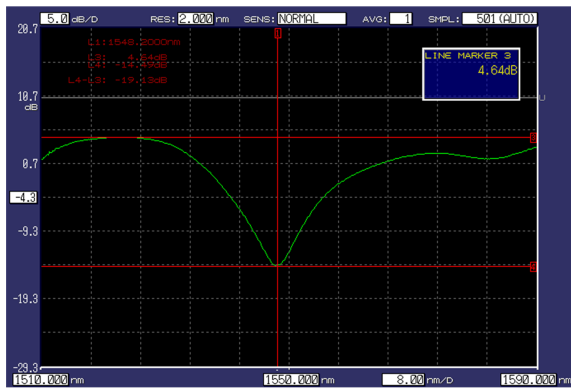


图 10 常温下 $L=25$ mm 时透射光谱

Fig. 10 Transmission spectra when $L=25$ mm in room temperature

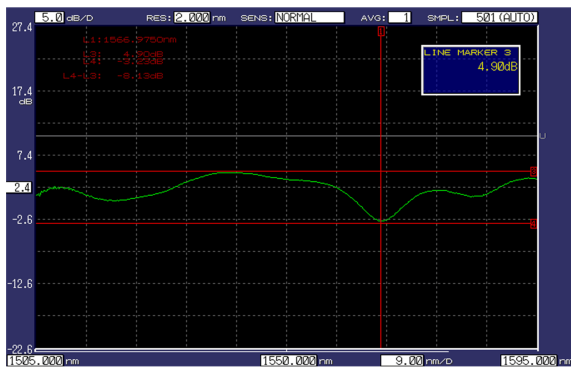


图 11 常温下 $L=27$ mm 时的透射光谱

Fig. 11 Transmission spectra when $L=27$ mm in room temperature

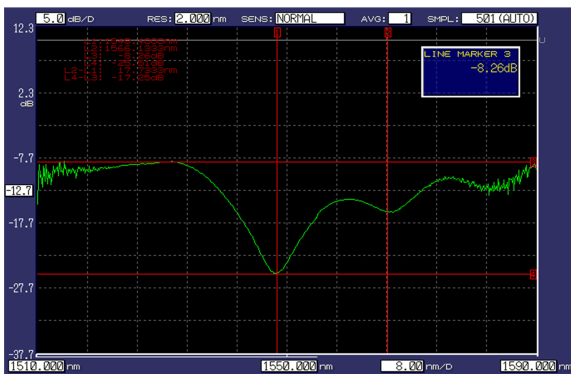


图 12 常温下 $L=25$ mm 和 $L=27$ mm 串联后的透射

Fig. 12 Transmission spectra after seriesing $L=25$ mm and $L=27$ mm in room temperature

从以上三幅图中可以看出串联后的 SMS 结构其特征波长的位置没有明显改变,这验证了前面的结论:SMS 结构的串联并未影响各自的模式传播,只是串联之后噪声多了,这可能是因为在两个 SMS

光纤结构熔接的时候有误差,没有实现无偏心对接,也有可能是外界温度发生了变化。

4.2 实验结果与讨论

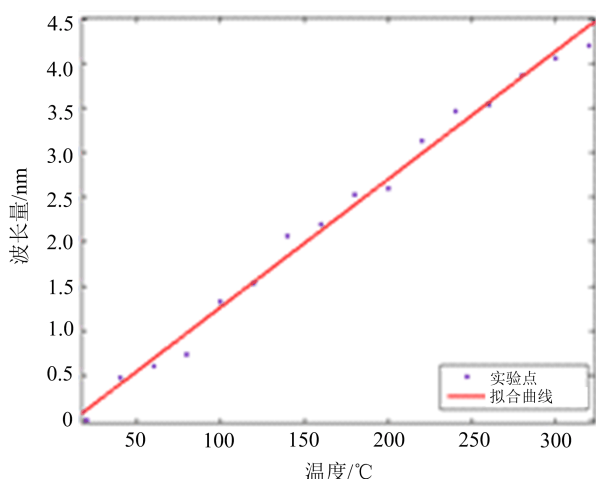
为了验证两个 SMS 结构的关系是相互独立还是相互影响,实验中,只将 $L=27$ mm 的 SMS 结构水平放入温控装置中,而 $L=25$ mm 的 SMS 结构则水平放在室温下,来观察两个特征波长位置是如何变化的,如果只有 $L=27$ mm 的特征波长变化,而 $L=25$ mm 的特征波长没有发生明显的变化,则说明它们之间是相互独立的;如果两个特征波长都发生了变化,则说明它们之间是相互影响的。实验也是从常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)~ $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间隔 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行加温,实验结果如表 2 所示。从表中可以看出,随着温度的增加,放在常温中的 $L=25$ mm 的 SMS 结构其干涉极小对应波长几乎没有变化,而放在温控装置中的 $L=27$ mm 的 SMS 结构干涉极小波长向长波方向漂移了 4.2 nm 。将 $L=27$ mm 加温后所得独立点进行曲线拟合如图 13 所示,所得温度灵敏度为 $14.41\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 串联后中心波长随温度变化的数据表

Tab. 2 The data table of the change of center wavelength with temperature after cascading

温度 值/ $^{\circ}\text{C}$	$L=2.5$ cm 极值 对应波长/nm	波长 差/nm	$L=2.7$ cm 极值 对应波长/nm	波长 差/nm
20	1 548.333 3	0.0000	1 567.466 7	0.000 0
40	1 548.466 7	0.133 4	1 567.933 3	0.466 6
60	1 548.333 3	0.000 0	1 568.066 7	0.600 0
80	1 548.333 3	0.000 0	1 568.200 0	0.733 3
100	1 548.333 3	0.000 0	1 568.800 0	1.333 3
120	1 548.466 7	0.133 4	1 569.000 0	1.533 3
140	1 548.333 3	0.000 0	1 569.533 3	2.066 6
160	1 548.333 3	0.000 0	1 569.666 7	2.200 0
180	1 548.333 3	0.000 0	1 570.000 0	2.533 3
200	1 548.333 3	0.000 0	1 570.066 7	2.600 0
220	1 548.333 3	0.000 0	1 570.600 0	3.133 3
240	1 548.333 3	0.000 0	1 570.933 3	3.466 6
260	1 548.333 3	0.000 0	1 571.000 0	3.533 3
280	1 548.333 3	0.000 0	1 571.333 3	3.866 6
300	1 548.333 3	0.000 0	1 571.533 3	4.066 6
320	1 548.333 3	0.000 0	1 571.666	4.200 0

实验结论:没有加温的 SMS 结构其中心波长位置没有变化,放在温控装置中的 SMS 结构其中心波长随温度的增加向长波方向漂移,说明了串联后不改变原来 SMS 结构的中心波长的位置,两个 SMS

图 13 $L=25\text{ mm}$ 和 $L=27\text{ mm}$ 串联后的温度拟合曲线Fig13 Temperature fitting curve after seriesing
 $L=25\text{ mm}$ and $L=27\text{ mm}$

结构仍然是独立的,不相互影响.所以说将两个 SMS 结构串联是可行的.虽然这种两个 SMS 结构串联的光纤温度传感器的灵敏度较 SMS 结构的有所降低,这是由于在光纤熔接过程中损耗所引起的,串联的越多损耗就越大,但是这种级联结构的光纤传感器可以用于温度和

应力的同时测量,也可以用于分布式光纤传感

器,其应用范围扩展到了很多领域,假设在一个空间里埋入多个 SMS 串联结构,就可以测量任何一点的应力.目前,温度和应力的同时测量更多的还是用 FBG 传感器,但是 FBG 对温度和应力有交叉敏感性,在实际应用中需要采用特殊技术将应变与温度分离,而本文提到的串联结构就可以很方便的同时测量,可以替代 FBG 传感器.

5 结束语

本文主要研究对象是基于 SMS 结构的光纤温度传感器,从理论分析、模拟到实验主要做了如下工作:

(1)研究了 SMS 结构的传感原理,并从温度方面研究了 SMS 光纤传感器的传感原理和理论模型.

(2)从实验上对基于 SMS 结构的光纤温度传感器进行了研究,创建了实验的装置,并分析了实验结果,重点对级联后的 SMS 结构光纤温度传感器进行了实验研究,研究了在不同的温度下光纤传感器的透射光谱,验证了级联后 SMS 结构仍是相互独立的.

(3)级联型的光纤传感器可以应用到比较常见的有温度、压力、弯曲、折射率、位移、角度等的测量,也可以同时对多个参数进行测量.

参 考 文 献

- [1] M. R. Mokhtar, K. Owens, J. Kwasny, et al, *IEEE Sens. J.*, **12** (2012), 1470
- [2] D. Gaizka, Marlenek, Michael, et al, *IEEE Sens. J.*, **9** (2009), 1219
- [3] M. Chavko, W. A. Koller, K. W. Prusaczyk, et al, *Journal of Neuroscience Methods*, **159**(2007), 277
- [4] F. X. Hu, H. X. Yang, W. L. Liu, *Acta Photonica Sinica*, 2015, Vol144NO4
- [5] A. M. Hatta, G. Farrell, P. F. Wang, et al, *Journal of Nightmare Tech*, **27**(2009), 2482
- [6] L. B. Li, Q. H. Lou, J. Zhou, *Chinese Journal of Lasers*, Vol1 (2007), 34
- [7] Y. Liu, L. Wei, *Appl. Phys. A*, **46**(2007), 2516
- [8] L. B. Soldano, *Light wave Tech*, 1995, 615
- [9] C. G. P. Herben, C. G. M. Vreeburg, X. J. M. Leijtens, H. Blok, F. H. Groen, E. Moerman, J. W. Peder, M. K. Smit, *IEEE Photonics Tech. Lett*, 1997, 1116
- [10] M. R. Paiam, R. I. MacDonald, *IEEE Photonics Tech. Letts*, 1998, 241
- [11] H. J. Patrick, A. D. Kersey, F. Bucholtz, J. Light, *Technol*, **16** (1998), 1606