

# 温度不敏感的少模光纤应变传感

张 珊<sup>1</sup>, 黄战华<sup>1</sup>, 李桂芳<sup>2</sup>, 王崇禧<sup>1</sup>, 赵 健<sup>1</sup>, 赵宁波<sup>1</sup>, 蔡怀宇<sup>1</sup>, 张尹馨<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

<sup>2</sup>中佛罗里达大学光学与光电学院, 佛罗里达 奥兰多 32816-2700

**摘要** 为了解决光纤传感器中普遍存在的温度和应变交叉敏感问题, 基于少模光纤的模间干涉原理, 研究了 LP01 和 LP02 模式干涉的应变和温度传感特性, 详细分析了模间干涉传感的相位灵敏度理论。结合少模光纤的数值仿真结果, 设计了一种温度不敏感的应变传感少模光纤, 其纤芯直径为  $15.1 \mu\text{m}$ , 在  $1550 \text{ nm}$  下纤芯折射率为  $1.4512$ , 包层折射率为  $1.444$ 。搭建了实验系统来研究少模光纤温度和应变传感特性, 结果表明: 理论计算能够较好地预测实验结果; 少模光纤在  $0 \sim 600 \mu\text{m}$  范围内, 应变的相位灵敏度为  $0.0196 \text{ rad}/\mu\text{m}$ , 在  $30 \sim 330 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 对温度不敏感, 可有效改善温度和应变的交叉敏感问题。

**关键词** 传感器; 少模光纤传感; 温度不敏感的应变传感; 模间干涉; 相位灵敏度

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0210002

## Temperature-Insensitive Strain Sensing Based on Few Mode Fiber

Zhang Shan<sup>1</sup>, Huang Zhanhua<sup>1</sup>, Li Guifang<sup>2</sup>, Wang Chongxi<sup>1</sup>, Zhao Jian<sup>1</sup>,  
Zhao Ningbo<sup>1</sup>, Cai Huaiyu<sup>1</sup>, Zhang Yinxi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ministry of Education Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Tianjin University,  
Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>The College of Optics & Photonics, University of Central Florida, Orlando, Florida 32816-2700, USA

**Abstract** In order to solve the problem of cross sensitivity of temperature and strain that generally exists in fiber-optic sensor, the strain and temperature sensing characteristics of LP01 and LP02 mode interference based on the inter-modal interference principle of the few mode fiber are studied, and phase sensitivity theory of inter-modal interference sensing is analyzed in detail. A temperature-insensitive strain-sensing few mode fiber with core diameter of  $15.1 \mu\text{m}$ , core refractive index of  $1.4512$  at  $1550 \text{ nm}$  and cladding refractive index of  $1.444$  is designed based on the numerical simulation results of the few mode fiber. The experimental system is built to research the strain and temperature sensing characteristics of few mode fiber. The results show that the theoretical calculation can predict the experimental result well. The phase sensitivity of the strain in the few mode fiber is  $0.0196 \text{ rad}/\mu\text{m}$  in the range of  $0 \sim 600 \mu\text{m}$ , which is insensitive to the temperature in the range of  $30 \sim 330 \text{ }^\circ\text{C}$ . It can effectively improve the problem of cross-sensitive of temperature and strain.

**Key words** sensors; few mode fiber sensing; temperature-insensitive strain sensing; inter-modal interference; phase sensitivity

**OCIS codes** 040.1880; 060.2310; 060.2370

## 1 引 言

传统光纤传感器因其分辨率高、检测精度高、抗电磁干扰能力强而被广泛应用在各个领域<sup>[1]</sup>,但在实际

收稿日期: 2016-09-05; 收到修改稿日期: 2016-11-09

基金项目: 天津市科学基金(14RCGFGX00844)

作者简介: 张 珊(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事少模光纤传感方面的研究。E-mail: xyzs10@163.com

导师简介: 黄战华(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电成像与检测技术方面的研究。

E-mail: zhanhua@tju.edu.cn(通信联系人)

测量中温度和应力总是同时存在的,传感器因对其难以区分而普遍存在着交叉敏感的问题。目前,单模光纤传感器中解决应变和温度交叉敏感问题的途径主要有两种:额外的温度补偿方案和温度应变双参数同时测量方案<sup>[2-4]</sup>。这两种方法都增加了传感器的实现难度和成本。少模光纤(FMF)指的是可以同时传输基模和少数几个高阶模的光纤<sup>[5]</sup>,因其独特的光学特性,近年来在通信和传感领域受到了广泛关注和研究。少模传感是利用单根少模光纤中传输的两个模式之间的干涉来实现光纤传感测量,而单模光纤干涉是利用不同光纤内的两束相干光实现的。因此少模干涉摒弃了传统干涉仪的双臂结构,结构更为简单稳定,而且消除了因两臂受到不等干扰时引起的误差<sup>[6]</sup>。

早期人们对各种保偏光纤中基于 LP01 和 LP11 模间干涉原理的传感器进行了大量研究<sup>[7-9]</sup>,但其发展受到偏振敏感以及模式激发困难问题的限制。因此针对目前存在的温度应变交叉敏感问题以及保偏光纤干涉传感的偏振敏感问题,本文主要研究了圆芯阶跃型少模光纤中基于 LP01 和 LP02 模式的模间干涉理论,通过改变光纤结构以及模式选择有效地消除了 LP01-LP11 干涉的偏振敏感问题<sup>[10-11]</sup>。进一步通过理论与仿真研究少模光纤的应变和温度传感特性,设计制作了一种能够有效改善温度应变交叉敏感问题的少模光纤,并通过实验对其特性进行验证。

## 2 少模光纤模间干涉传感原理

### 2.1 模间干涉传感原理

少模光纤传感的本质是模间干涉,它是指不同模式在受到外界传感时产生干涉,导致输出干涉场在不同位置的光强会随模间相位差变化呈周期性分布的现象<sup>[7]</sup>。当激光正入射到阶跃型圆芯少模光纤端面时,光斑沿着纤芯光轴对称,因而在少模光纤中只激发出圆对称模式,通过选择合适的截止波长,使光纤中只存在最低阶的两个圆对称模式 LP01 和 LP02,这两个模式的干涉输出光强  $I$  与模间干涉相位差  $\Delta\varphi$  的关系可以表示为<sup>[8]</sup>

$$I = |E(x, y)|^2 = |E_1(x, y) + E_2(x, y)\exp(j\Delta\varphi)|^2, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = \Delta\beta \cdot L = (\beta_1 - \beta_2) \cdot L, \quad (2)$$

式中  $E_1(x, y)$ 、 $E_2(x, y)$  分别表示 LP01、LP02 模式的电场强度,  $\Delta\beta$  表示两个模式的传播常数差,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别表示 LP01、LP02 模式在少模光纤内的传播常数,  $L$  表示传感光纤的长度。少模光纤出射光场的总强度基本保持不变,一般通过对少模光纤输出光场中心位置的出射光强变化进行探测,来实现应变、温度等外界物理量的测量。

### 2.2 模间干涉的应变、温度传感特性

为了定量分析外界物理量  $\xi$  对模间干涉相位差的影响,对(2)式作微分得到

$$\frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial\xi} = \Delta\beta \frac{\partial L}{\partial\xi} + \frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial\xi} L, \quad (3)$$

从(3)式可以看出,模间干涉相位差的变化是由光纤两个方面的变化引起的。(3)式中的第一项表示光纤光学尺寸的变化,主要考虑的是轴向伸长;第二项表示纤芯内模式传播常数差的变化,这一改变本质上是因为外界物理量改变了光纤材料的折射率,对于应变和温度分别称为弹光效应和热光效应。而外界物理量对光纤尺寸及折射率的影响,最终会转化为纤芯内模间干涉相位差的变化,进而产生模间干涉效应。

为了计算(3)式中的第二项,考虑传播常数  $\beta$  与归一化相位常数  $b$  的关系,即

$$\beta_i^2 = k_0^2 [n_2^2 + b_i(n_1^2 - n_2^2)], \quad (i = 1, 2), \quad (4)$$

式中  $i$  取 1, 2 分别代表 LP01 和 LP02 模式,  $n_1$  和  $n_2$  分别代表纤芯和包层的折射率。用  $\beta$  对外界物理量  $\xi$  进行微分得到

$$\frac{\partial\beta_i}{\partial\xi} = \frac{k_0^2}{2\beta_i} \left[ 2n_2 \frac{\partial n_2}{\partial\xi} + b_i \left( 2n_1 \frac{\partial n_1}{\partial\xi} - 2n_2 \frac{\partial n_2}{\partial\xi} \right) + \frac{\partial b_i}{\partial\xi} (n_1^2 - n_2^2) \right], \quad (5)$$

式中  $k_0$  为波数。弹光效应、热膨胀效应以及热光效应对光纤的影响<sup>[12]</sup> 分别为

$$\frac{\partial n_i}{\partial L} = -\frac{n_i^3}{2L} [p_{12} - \sigma(p_{11} + p_{12})], \quad (6)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} = \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial T} \\ \tau = \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial T} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $p_{11}$ 、 $p_{12}$  为材料的弹光系数,  $\sigma$  为泊松比,  $\alpha$ 、 $\tau$  分别为材料的热膨胀系数和热光系数,  $a$  为纤芯半径。将(5)、(6)和(7)式代入(3)式化简, 最终可以得到应变和温度的相位灵敏度分别为  $S_1$ 、 $S_t$ :

$$S_1 = \frac{\delta(\Delta\varphi)}{\delta l} = \Delta\beta + \frac{k_0^2}{2\beta_1\beta_2} \cdot \quad (8)$$

$$\left\{ p_e \cdot [n_2^4(\beta_1 - \beta_2) + (n_1^4 - n_2^4) \cdot (\beta_1 b_2 - \beta_2 b_1)] + V\delta \left( \beta_1 \frac{\partial b_2}{\partial V} - \beta_2 \frac{\partial b_1}{\partial V} \right) \right\},$$

$$S_t = \frac{\delta(\Delta\varphi)}{L\delta T} = L(\alpha + \tau) \cdot \left[ (\beta_1 - \beta_2) + \frac{k_0^2(n_1^2 - n_2^2)}{2} V \cdot \left( \frac{1}{\beta_1} \frac{\partial b_1}{\partial V} - \frac{1}{\beta_2} \frac{\partial b_2}{\partial V} \right) \right], \quad (9)$$

$$\begin{cases} \delta = (n_1^4 - n_2^4) \frac{p_e}{2} + \sigma(n_1^2 - n_2^2) \\ p_e = p_{12} - (p_{11} + p_{12})\sigma \end{cases}, \quad (10)$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot NA, \quad (11)$$

式中  $\lambda$  为工作波长,  $NA$  为数值孔径,  $V$  为归一化工作频率, 是光纤的基础参数之一, 它表征光纤可以容纳的模式数量,  $V$  值越大说明纤芯能容纳的模式就越多, 而少模光纤中传输的模式数目一般在  $2 \sim 10$  之间。

(8)式中  $\Delta\beta$  以及  $(\beta_1 b_2 - \beta_2 b_1)$  都是大于零的数值, 仿真计算得到的  $\beta_1 \frac{\partial b_2}{\partial V} - \beta_2 \frac{\partial b_1}{\partial V}$  也是正值, 因此应变

灵敏度  $S_1$  总是大于零。同样地, 经过仿真得到(9)式中的第二项  $\frac{1}{\beta_1} \frac{\partial b_1}{\partial V} - \frac{1}{\beta_2} \frac{\partial b_2}{\partial V}$  会随着  $V$  值的增大由正值变成负值, 并且数值上与第一部分大小接近, 因此温度灵敏度  $S_t$  也会随着  $V$  值增大由正到负, 也就是说必然会出现  $S_t$  等于零的情况。因此, 通过设计恰当的少模光纤参数、选择合适的工作波长, 使少模光纤工作在  $S_t = 0$  的位置, 就能得到温度不敏感的应变传感少模光纤。

### 2.3 数值仿真结果

根据相位灵敏度表达式(8)和(9), 在  $V$  值已知的情况下, 通过求解线偏振模的特征方程<sup>[12]</sup>得到归一化相位常数  $b_i$  和  $\partial b_i / \partial V$  的值, 就可以计算出双模干涉的相位灵敏度。当  $V < 2.4$  时, 只有 LP01 模式可以在光纤中传导, 即光纤工作在单模状态下。当  $V > 3.83$  时, LP02 模才被激发。因此选择  $V$  工作在  $4 \sim 10$  的范围以保证 LP01 和 LP02 都可以被激发。

武汉邮科院生产的圆芯阶跃型四模光纤参数为: 纤芯直径  $2a = 15.1 \mu\text{m}$ , 包层半径  $2b = 125 \mu\text{m}$ , 数值孔径  $NA = 0.144$ , 传感长度  $L = 200 \text{ mm}$ 。对这一参数的光纤进行仿真, 得到 LP01 和 LP02 模间干涉应变、温度的相位灵敏度与  $V$  值的关系如图 1 所示。从图中可以明显看出, 应变灵敏度在所取  $V$  值范围内都是正

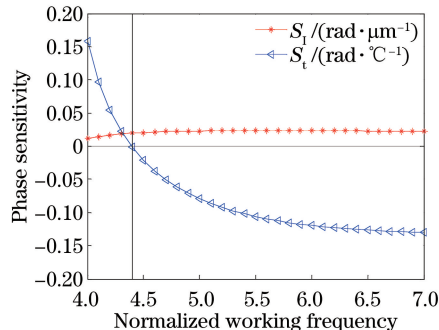


图 1 应变、温度的相位灵敏度与归一化工作频率的关系

Fig. 1 Relationship between phase sensitivity of strain, temperature and normalized working frequency

值,与相位灵敏度公式(8)和(9)得到的结果一致。当光纤工作在  $V=4.4$  时,温度灵敏度接近于零,一定程度上消除了温度对轴向应变测量的干扰,即在一定测量范围内该光纤是对温度不敏感的应变传感光纤。

### 3 圆芯少模光纤内 LP01 和 LP02 模式的实现

高斯光正入射到少模光纤时<sup>[13-14]</sup>,可以在光纤内激发出两个圆对称模式 LP01 和 LP02,被激发的两个模式功率分布为

$$P_{0i} = \frac{\left( \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \Psi_{in} \Psi_{0i}^* r dr d\phi \right)^2}{\left( \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |\Psi_{in}|^2 r dr d\phi \right) \left( \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |\Psi_{0i}|^2 r dr d\phi \right)}, (i = 1, 2), \quad (12)$$

式中  $\Psi_{in}$  为入射的高斯光场,而  $\Psi_{0i}$  为少模光纤中激发出的 LP0*i* 模式的光场分布。将具体的光场表达式代入(12)式后,得到圆对称模式在少模光纤内的功率分布为

$$P_{0i} = 2 \left[ \frac{U_i K_0(W_i)}{VK_1(W_i)} \frac{2a}{\omega} \right]^2 \left\{ \int_0^1 \frac{J_0(U_i R)}{J_0(U_i)} \exp\left[-\frac{R^2}{(\omega/a)^2}\right] R dR + \int_1^{\infty} \frac{K_0(U_i R)}{K_0(U_i)} \exp\left[-\frac{R^2}{(\omega/a)^2}\right] R dR \right\}^2, \quad (13)$$

式中  $\omega$  为高斯光束入射到光纤端面上的光斑半径。由(13)式可知,当归一化工作频率  $V$  确定后,功率大小就只与  $a/\omega$  有关。取  $V=4.4$  对(13)式进行仿真,得到模式的归一化功率与  $a/\omega$  的关系如图 2 所示。从图中可知在  $a/\omega=4.97$  的位置,  $P_1=P_2$ , 因此通过调节光斑入射到光纤端面上的大小,就可以保证两个模式以相等的功率入射到少模光纤中。定义双模干涉的调制深度为<sup>[14]</sup>

$$D_M = 1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = 1 - \frac{(P_1 - P_2)^2}{(P_1 + P_2)^2}, \quad (14)$$

仿真得到调制深度与  $a/\omega$  的关系如图 3 所示。在图中  $P_1=P_2$  的位置,理论上调制深度能达到 100%,在  $a/\omega=[2.4, 4]$  范围内调制深度仍大于 90%,说明即使在实验中  $a/\omega$  偏离了  $P_1=P_2$  的位置,调制深度仍然会很高。可以根据调制深度来计算选择合适的准直耦合透镜组,在保证耦合效率的基础上尽可能激发两个相等功率的模式。

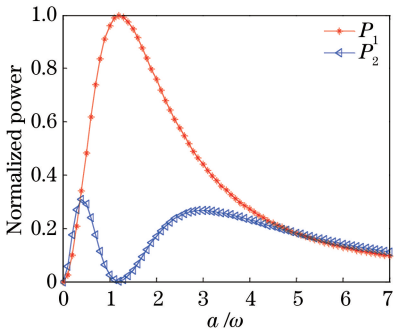


图 2 归一化功率与  $a/\omega$  的关系

Fig. 2 Relationship between normalized power and  $a/\omega$

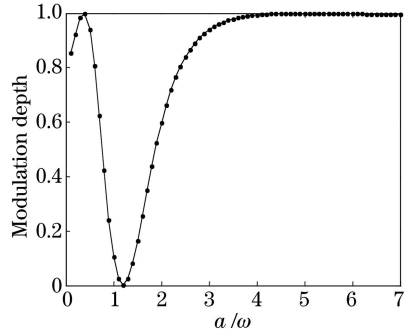


图 3 调制深度与  $a/\omega$  的关系

Fig. 3 Relationship between modulation depth and  $a/\omega$

### 4 实验结果

温度和应变的实验系统如图 4 所示。采用的分布反馈式(DFB)激光器线宽为 100 kHz,中心波长为 1550 nm。将少模光纤剥去涂覆层后,一端固定不动另一端固定在  $Z$  方向位移台上产生轴向应变。采用分体式 ET-200F 加热台产生温度。少模光纤输出端与单模光纤 SMF28 进行错位熔接使 LP01 和 LP02 产生干涉,利用数字式功率计 PM122D 探测输出功率。计算机以 0.5 s 的间隔在每个应变和温度下采集 100 个功率数值。

为了验证理论仿真计算方法的正确性,对 5 种不同参数的少模光纤分别进行了理论仿真和传感实验,得

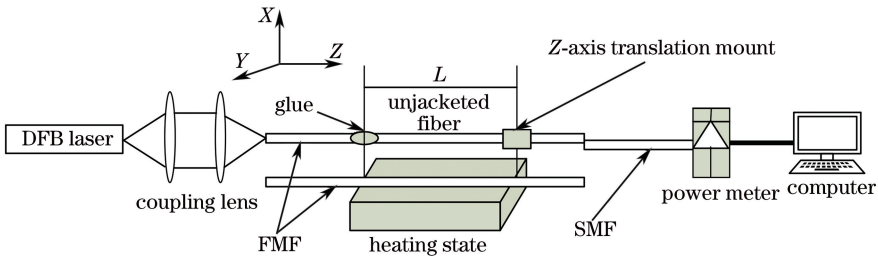


图 4 温度和应变实验系统

Fig. 4 Experiment system of temperature and strain

到理论计算周期与实验测量周期的结果如表 1 所示。所有光纤均是以  $10 \mu\text{m}$  为步进从  $0 \sim 600 \mu\text{m}$  对轴向伸长进行测量,  $16, 18.1, 17.56 \mu\text{m}$  芯径的光纤都是以  $5^\circ\text{C}$  为步进在  $30 \sim 230^\circ\text{C}$  范围内对温度变化进行测量, 而  $15.1 \mu\text{m}$  芯径的光纤是以  $10^\circ\text{C}$  为步进在  $30 \sim 330^\circ\text{C}$  范围内对温度变化进行测量。

表 1 5 种不同归一化工作频率的少模光纤理论计算与实验测量周期比较

Table 1 Period comparison between theoretical calculation and experimental measurement of five kinds FMFs with different normalized working frequencies

Fiber diameter	$V$	Theoretical period		Measured period	
		Temperature $T / ^\circ\text{C}$	Elongation $dL / \mu\text{m}$	Temperature $T / ^\circ\text{C}$	Elongation $dL / \mu\text{m}$
Single mode fiber in Refs.[11-12]	5.00	50.57	225.25	51 <sup>[12]</sup>	245.5 <sup>[11]</sup>
16 $\mu\text{m}$	5.46	63.36	242.71	60	280
18.1 $\mu\text{m}$	4.92	134.69	360.07	130	360
17.56 $\mu\text{m}$	4.77	183.90	354.91	165	380
15.1 $\mu\text{m}$	4.40	3820	325.12	$> 300$	320

从表中可以看出, 仿真结果的准确度相对于现有的研究成果有了一定提高, 相对于其他光纤,  $17.56 \mu\text{m}$  光纤的实验结果与理论结果之间有较大误差, 而其他 4 种光纤的理论结果与实验结果都比较符合。其中  $18.1 \mu\text{m}$  光纤的理论值与实际值非常接近, 此光纤仿真所用的参数都是经过测量得到的,  $17.56 \mu\text{m}$  光纤的仿真参数并未经过测量, 与真实值之间存在误差。因而分析理论与实验之间的误差可能是由于少模光纤的实际参数与仿真采用的参数不完全一致造成的, 考虑到这一点, 可以说明本研究的理论仿真值能够较好地预测实验结果。  $15.1 \mu\text{m}$  芯径的光纤在  $30 \sim 330^\circ\text{C}$  温度变化范围内的探测功率不具有周期性, 应变传感的周期为  $320 \mu\text{m}$ 。

将  $17.56 \mu\text{m}$  芯径的少模光纤处于  $30^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}, 90^\circ\text{C}, 110^\circ\text{C}$  的恒温状态下, 测量轴向伸长在  $0 \sim 500 \mu\text{m}$  范围内的功率变化, 得到归一化探测功率及其相对变化量与轴向伸长关系如图 5 所示。从归一化探测功率随轴向伸长的变化来看, 不同温度下的初始相位相差很大, 相对变化的最大数值会达到 0.8, 在测量应

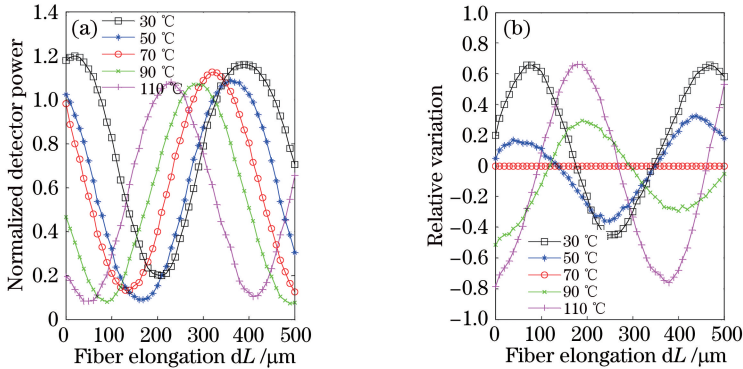


图 5  $17.56 \mu\text{m}$  少模光纤在 5 个温度值下的 (a) 归一化探测功率、(b) 相对变化量与轴向伸长关系

Fig. 5 Relationship between (a) normalized detector power, (b) relative variation and axial elongation of  $17.56 \mu\text{m}$ -FMF at five different temperatures



变时温度的干扰会导致完全错误的结果。

进一步采用设计拉制的  $15.1\ \mu\text{m}$  芯径的少模光纤进行实验。取 3 段少模光纤分别对其温度和应变传感特性进行测试,得到归一化探测功率与温度、应变的关系如图 6 所示。从图中可以看出 3 段少模光纤的归一化探测功率在  $0\sim 600\ \mu\text{m}$  轴向伸长范围内,随应变都具有明显周期性,且周期均为  $320\ \mu\text{m}$ 。归一化探测功率在  $30\sim 330\ ^\circ\text{C}$  的温度范围内,随温度变化的最大值分别为  $1.81\%$ 、 $1.96\%$ 、 $1.03\%$ 。

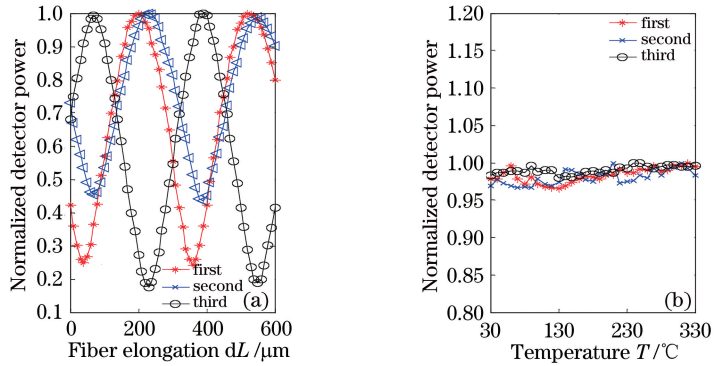


图 6 3 段少模光纤归一化探测功率与(a)轴向伸长、(b)温度的关系

Fig. 6 Relationship between normalized detector power and (a) axial elongation, (b) temperature of three FMFs

为了更好地说明  $15.1\ \mu\text{m}$  少模光纤的传感特性,将 3 段少模光纤分别处于  $30\ ^\circ\text{C}$ 、 $105\ ^\circ\text{C}$ 、 $180\ ^\circ\text{C}$ 、 $255\ ^\circ\text{C}$ 、 $330\ ^\circ\text{C}$  的恒温状态下测量轴向伸长,得到 3 组归一化探测功率及其相对变化量与轴向伸长的关系如图 7 所示。从归一化探测功率随轴向伸长变化的关系中可以看出,所用的少模光纤处于 5 个不同恒温状态时,轴向伸长的周期都能够稳定保持在  $320\ \mu\text{m}$ 。从相对变化与轴向伸长的关系可以看出,3 组相对变化数值在  $30\ ^\circ\text{C}$ 、 $105\ ^\circ\text{C}$ 、 $250\ ^\circ\text{C}$ 、 $330\ ^\circ\text{C}$  处最大均不会超过 0.07,在测量应变时温度的干扰基本可以忽略。3 组结果均在  $180\ ^\circ\text{C}$  时有较大的相对变化,最大的相对变化量会达到 0.17,但相对于普通少模光纤较小,分析其原因

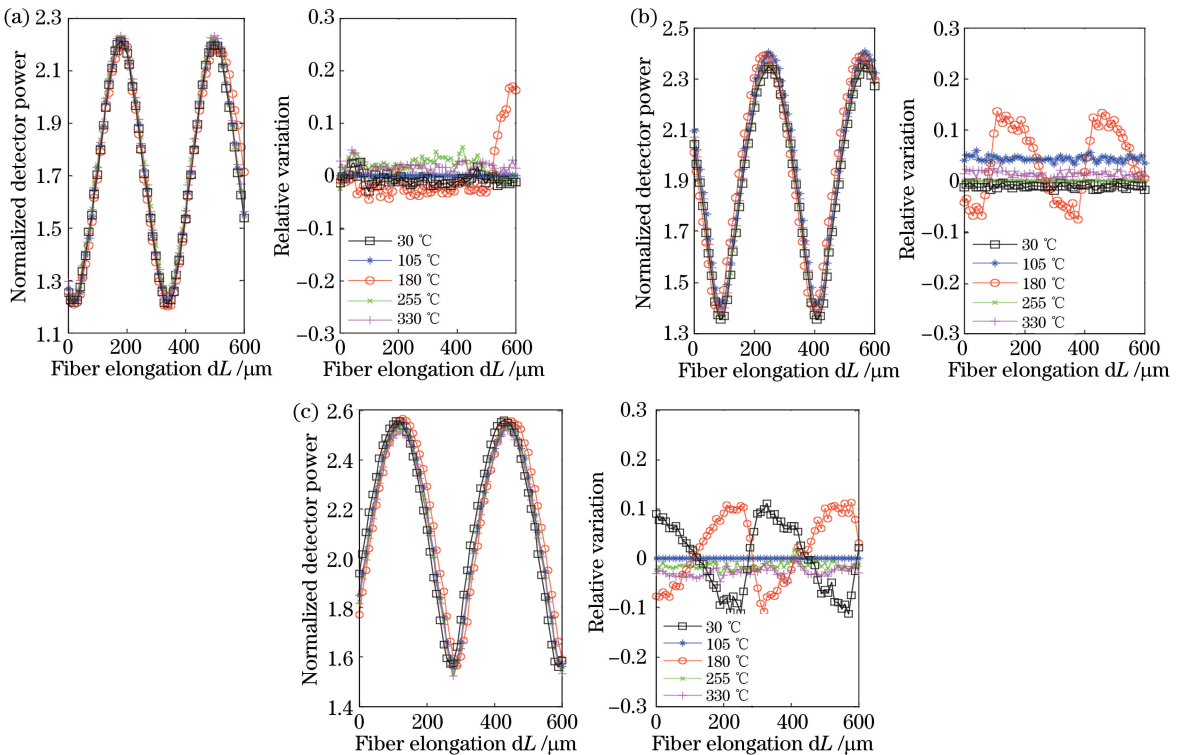


图 7 3 段少模光纤在 5 个温度值下的归一化探测功率、相对变化与轴向伸长关系。(a) 第一段; (b) 第二段; (c) 第三段

Fig. 7 Relationship between normalized detector power, relative variation and axial elongation of three FMFs at five different temperatures. (a) First; (b) second; (c) third

因可能是设计少模光纤的加工工艺造成的影响。

## 5 结 论

分析了 LP01-LP02 模间干涉的应变、温度传感特性,数值仿真了传感相位灵敏度,设计了一种温度不敏感的应变传感少模光纤。通过实验证明了所设计制作的少模光纤能够有效改善温度和应变的交叉敏感问题。研究成果能够为设计温度不敏感的应变传感少模光纤提供理论指导,对于推进模间干涉型少模光纤传感器的实用化进程具有一定意义。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Song, Yang Xiufeng, Tong Zhengrong, *et al.* Experimental research on sensor for simultaneous measurement of dual parameters based on interference of higher order modes[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2012, 28(3): 34-37.  
陈 松, 杨秀峰, 童峥嵘, 等. 基于高阶模干涉的双参量同时测量传感器的实验研究[J]. 天津理工大学学报, 2012, 28(3): 34-37.
- [2] Li An, Wang Yifei, Hu Qian, *et al.* Few-mode fiber based optical sensors[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1139.
- [3] Li An, Wang Yifei, Fang Jian, *et al.* Few-mode fiber multi-parameter sensor with distributed temperature and strain discrimination[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1488-1491.
- [4] Xu Yanping. Multi-parameter sensing based on in-line Mach-Zehnder interferometer [D]. Ottawa: University of Ottawa, 2013.
- [5] Li Jie. The speciality of D-type few-mode fiber Bragg grating and its applications in the refractive index measurement [D]. Xiamen: Xiamen University, 2006.  
李 杰. 新型 D 型少模光纤 Bragg 光栅的特性及其在折射率测量中的应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [6] Fukano H, Aiga T, Taue S. High-sensitivity fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference using small-core single-mode fiber for biosensing[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(4S): 853-871.
- [7] Liu Feng, Zhang Xiaofei, Lu Xin. Research on modular interference characteristics of elliptical-core polarization maintenance optic fiber[J]. Journal of Yanshan University, 2012, 36(2): 161-164.  
刘 丰, 张晓菲, 芦 鑫. 椭圆芯保偏光纤模间干涉特性的研究[J]. 燕山大学学报, 2012, 36(2): 161-164.
- [8] Safaai-Jazi A, Mckeeman J. Synthesis of intensity patterns in few-mode optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(9): 1047-1052.
- [9] Wang Helin, Bi Weihong, Yang Aijun, *et al.* Design of all-fiber voltage sensor based on intermode interference[J]. Power System Technology, 1900, 30(24): 50-55.  
王河林, 毕卫红, 杨爱军, 等. 基于模间干涉的全光纤电压传感器设计[J]. 电网技术, 1900, 30(24): 50-55.
- [10] Kumar A, Jindal R, Varshney R K, *et al.* A fiber-optic temperature sensor based on LP01-LP02 mode interference[J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6(1): 83-90.
- [11] Kumar A, Goel N K, Varshney R K. Fiber optic strain sensor based on LP01-LP02 mode interference in a few mode optical fiber[C]. SPIE, 2001, 4417: 500-505.
- [12] Wei Chunfen. Study of filter and temperature sensor based on the few mode fiber[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.  
魏春芬. 基于少模光纤的滤波器件和温度传感的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [13] Wei Peng. Research on fabrication method and sensing characteristics of few-mode fiber Bragg grating[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2009.  
魏 鹏. 少模光纤光栅的制作及其传感特性研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.
- [14] Xie Yiwei, Fu Songnian, Zhang Minming, *et al.* Mode selective excitation techniques for few-mode fibers[J]. Study of Optical Communication, 2013, 39(3): 1-3.  
谢意维, 付松年, 张敏明, 等. 少模光纤中模式选择性激励技术[J]. 光通信研究, 2013, 39(3): 1-3.