

DOI:10.16136/j.joel.2023.12.0868

# 基于柱矢量模式的光纤迈克尔逊传感特性研究

杨俊锋<sup>\*</sup>, 庞拂飞<sup>2</sup>, 刘奂奂<sup>3</sup>, 赵欣<sup>1</sup>, 崔乃忠<sup>1</sup>

(1. 唐山师范学院 物理科学与技术学院 唐山市新型智能传感技术重点实验室, 河北 唐山 063000; 2. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444; 3. 南方科技大学 电子与电气工程系, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 基于涡旋光纤(vortex fiber, VF)激发的柱矢量模式(cylindrical vector modes, CVMs)设计了迈克尔逊干涉仪传感器,并对轴向应变、温度和折射率传感特性进行了理论研究和实验验证。通过对VF施加一个微弯长周期光栅(microbend long period gratings, MLPG),激发一阶CVMs( $TE_{01}$ 、 $HE_{21}$ 和 $TM_{01}$ );在VF尾端加反射镜,反射后纤芯中的基本模式 $HE_{11}$ 与环芯中的CVMs产生干涉,构成了迈克尔逊干涉仪。实验测得对应于柱矢量模式 $TM_{01}$ 、 $HE_{21}$ 和 $TE_{01}$ 的应变灵敏度分别为 $-1.01 \text{ nm}/\text{m}\epsilon$ 、 $-1.61 \text{ nm}/\text{m}\epsilon$ 和 $-2.31 \text{ nm}/\text{m}\epsilon$ ,温度灵敏度分别为 $9.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $3.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $-2.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,而折射率不敏感。该传感器结构简单,且 $TE_{01}$ 模式具有最高应变灵敏度和最低温度灵敏度,可作为折射率不敏感的、温度交叉灵敏度低的理想无补偿应变传感器,是智能型工程结构中下一代传感器的理想选择。

**关键词:** 柱矢量模式(CVMs); 迈克尔逊干涉仪; 涡旋光纤(VF); 光纤传感

**中图分类号:** TP212.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)12-1241-08

## Cylindrical vector modes based Michelson interferometer with vortex fiber for sensing applications

YANG Junfeng<sup>1\*</sup>, PANG Fufei<sup>2</sup>, LIU Huanhuan<sup>3</sup>, ZHAO Xin<sup>1</sup>, CUI Naizhong<sup>1</sup>

(1. Tangshan Key Laboratory of New Intelligent Sensing Technology, Department of Physical Science and Technology, Tangshan Normal University, Tangshan, Hebei 063000, China; 2. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

**Abstract:** Michelson interferometer sensor based on cylindrical vector modes (CVMs) in a vortex fiber (VF) has been proposed and demonstrated. The sensing characteristics of axial strain, temperature, and refractive index have been studied using theoretical and experimental methods. By applying a microbend long period grating (MLPG) to the VF, the first-order CVMs of  $TE_{01}$ ,  $HE_{21}$  and  $TM_{01}$  modes are excited. The end of the VF is equipped with a mirror, which interferes with the fundamental mode  $HE_{11}$  in the fiber core and the CVMs in the ring core after reflection, constructing an in-fiber Michelson interferometer sensor. The sensor exhibits the strain sensitivity of  $-1.01 \text{ nm}/\text{m}\epsilon$ ,  $-1.61 \text{ nm}/\text{m}\epsilon$ ,  $-2.31 \text{ nm}/\text{m}\epsilon$  and the temperature sensitivity of  $9.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,  $3.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,  $-2.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  for the CVMs of  $TM_{01}$ ,  $HE_{21}$  and  $TE_{01}$  respectively. But it is insensitive to refractive index. The sensor has a simple structure. The  $TE_{01}$  mode has the highest strain sensitivity and the lowest temperature sensitivity. It can be used as an ideal uncompensated strain sensor with insensitive refractive index and low temperature cross sensitivity. It has potential application of the next-generation sensors in smart engineering structures.

**Key words:** cylindrical vector modes (CVMs); Michelson interferometer; vortex fiber (VF); fiber sensing

\* E-mail: yangjf60@tstc.edu.cn

收稿日期: 2023-04-25 修订日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(61975108)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZC2021031)、唐山市科技计划项目(20130219b, 2022TS004b)和唐山师范学院博士基金项目(2021A01)资助项目

## 0 引 言

柱矢量光束(cylindrical vector beam, CVB)因为具有偏振旋转对称性和奇异的光学特性,而受到越来越多的关注,它可用于光学操控<sup>[1]</sup>、激光加工<sup>[2]</sup>、高分辨率显微镜<sup>[3]</sup>等许多领域。与空间 CVB 相比,光纤中的柱矢量模式(cylindrical vector modes, CVMs)在光子质量、粒子操纵、长距离传输和多路复用方面都具有很大优势。支持矢量本征模的 CVB 的光纤主要有环形芯光纤<sup>[4]</sup>、特殊设计的光子晶体光纤<sup>[5]</sup>等特种少模光纤,这类光纤的特点是包层和纤芯之间存在较大的折射率差,避免了简并效应,能够稳定地传输 CVMs。因此, CVMs 已经在光纤通信的模式多路复用<sup>[6]</sup>、光纤双光子荧光内窥镜<sup>[7]</sup>和光纤激光器<sup>[8]</sup>等方面进行了大量的研究。

由于 CVB 的巨大应用潜力,最近在光纤传感和测量方面也引起了巨大的兴趣。SHI 等<sup>[9]</sup>提出基于 CVB 测量 Rb 原子蒸气的磁场传感,为磁场传感提出了一种新的测试方法。YU 等<sup>[10]</sup>成功地使用 CVB 和磁光晶体  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  来实现磁场传感,在磁场传感领域有潜在的应用价值。PANG 等<sup>[11]</sup>利用微弯长周期光栅(microbend long period grating, MLPG)产生的 CVB 进行磁场传感的检测,利用法拉第效应对左右涡流束产生的相位差实现对磁场的感应,磁场灵敏度可达  $3.31\%/T$ 。DEMAS 等<sup>[12]</sup>在光子晶体光纤中通过长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPG)产生 CVBs 并应用到温度传感中,实验研究了径向偏振模式(radially polarized mode,  $\text{TM}_{01}$ )表现出对高温传感的偏振不敏感性。YANG 等<sup>[13]</sup>在涡旋光纤(vortex fiber, VF)中生成 CVBs,并通过光纤马赫-曾德尔干涉仪应用于应变传感中,基于 CVB 的这一特殊特性,可以显著提高光纤应变传感器的性能。DATTA 等使用 CVBs 设计了一种高灵敏度折射率的传感器,由于其高灵敏度使该研究在化学和生物传感领域都具有潜在的应用前景<sup>[14]</sup>。

在本文中,构造了基于 CVMs 的在光纤迈克尔逊传感器。用到的特种光纤环芯与包层具有高折射率差,其环形芯可以支持一阶 CVMs,包括角向偏振模式(azimuthally polarized mode,  $\text{TE}_{01}$ )、混合简并模式(degenerate mixed mode,  $\text{HE}_{21}$ )和径向偏振模式  $\text{TE}_{01}$ ,并且避免了一阶 CVMs 之间的简并效应,称作 VF。当在 VF 上施加一 LPG,并在 VF 尾端加反射镜时,在相位匹配条件下纤芯中的基本模式(fundamental mode,  $\text{HE}_{11}$ )与环芯中激发的 CVMs 构成迈克尔逊干涉仪。 $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$

和  $\text{TE}_{01}$  这 3 个 CVMs 分别对应产生 3 个分离的干涉光谱,研究其轴向应变、温度和折射率等传感特性,3 个干涉谱的应变和温度敏感性各不相同,而且对折射率不敏感。

## 1 CVMs 迈克尔逊传感原理

### 1.1 VF 的 CVMs

对于一般少模光纤,一阶 CVMs 的  $\text{TM}_{01}$ ,  $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  是简并的,不能有效分离。为了探索传感应用的分离的 CVMs,需要具有特殊折射率分布的光纤,以提高各个 CVMs 之间的有效折射率差(effective refractive index difference,  $\Delta n_{\text{eff}}$ )。本文中使用的波斯顿大学提供的 VF,通过折射率测试仪(S14, Photon Kinetics)测得的相对于二氧化硅的光纤折射率差分布如图 1(a)所示,显微镜测得的 VF 端面图像如图 1(b)所示,插图为由环形区域包围的光纤芯区域。由图 1 可知 VF 为三包层光纤,从内到外分别是纤芯、低折射率内包层、高折射率环形芯和外包层。其中,外包层折射率即为二氧化硅折射率,纤芯、内包层和环形芯折射率与外包层折射率差(refractive index difference,  $\Delta n$ )分别为 0.017、 $-0.006$  和 0.0276。由图 1 中得到三包层 VF 的尺寸和折射率差,利用商用软件 COMSOL Multiphysics 基于有限元方法对 VF 进行了数值仿真,仿真结果如图 2 所示,得到光纤环芯只支持基模  $\text{HE}_{11}$  和一阶 CVMs 模式( $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$ )。图 2(a)显示了 VF 在 1400—1650 nm 的波长范围内  $\text{HE}_{11}$  基模和 CVMs 的有效折射率,图 2(b)计算了  $\text{HE}_{11}$  基模和 CVMs 的有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$ 。由图 2 可以清晰地看到,在 1400—1650 nm 的波长范围内,基模  $\text{HE}_{21}$  和 CVMs

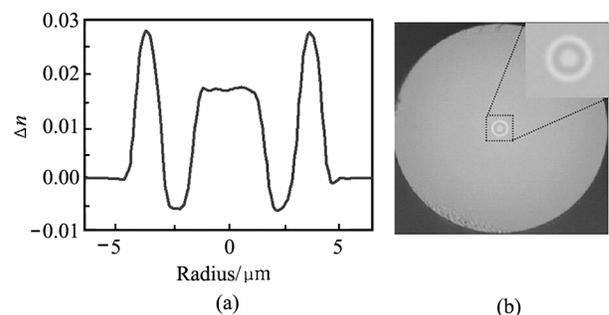


图 1 (a) 测量的涡旋光纤折射率差分布(相对于二氧化硅);  
(b) 涡旋光纤端面显微图

Fig. 1 (a) Measured refractive index difference of the vortex fiber (reference  $n_{\text{SiO}_2}$ );  
(b) An optical microscope image of the end facet of the vortex fiber

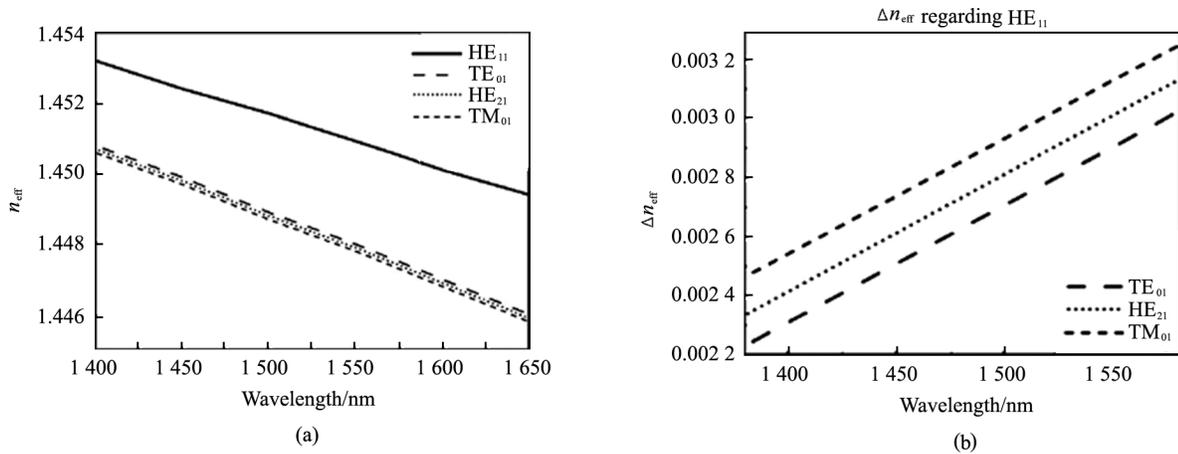


图 2 数值计算涡旋光纤特性:(a) 涡旋光纤的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ ; (b) 基模和一阶 CVMs 的有效折射率差  
Fig. 2 Numerically calculated properties of the vortex fiber:(a) Effective refractive index  $n_{\text{eff}}$  of the vortex fiber;  
(b) Effective refractive index difference between difference first-order-CVMs and  $\text{HE}_{11}$

有效折射率差在  $3 \times 10^{-3}$  左右,一阶 CVMs 模式之间的有效折射率差(即  $\text{HE}_{21}$  模式与  $\text{TM}_{01}$  模式以及  $\text{TE}_{01}$  模式与  $\text{HE}_{21}$  模式的有效折射率差)大于  $1.1 \times 10^{-4}$ ,消除了  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  模式之间的简并性。因此在 3 个 CVM 中实现了有效折射率的较大分离( $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ ),保证了传输的稳定性。

## 1.2 基于 CVMs 的迈克尔逊干涉原理

从图 1(a)、(b)可以看到,VF 除了环形纤芯外,还有一个中心纤芯,它与单模光纤(single mode fiber, SMF)的纤芯是匹配的。因此,通过直接熔接 SMF 和 VF,可以方便地激发 VF 的基模  $\text{HE}_{11}$ 。VF 支持一阶 CVMs,并且 CVMs 之间有相对较大的有效折射率差( $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ ),通过设置 LPG 可以在各自的谐振波长处同时激发  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  3 个 CVMs。在 VF 尾端设置一个反射镜,反射后可以实现光纤内迈克尔逊干涉仪,如图 3 所示。通过 LPG 后,一部分  $\text{HE}_{11}$  模式继续沿着光纤的纤芯向光纤末端的反射镜移动,一部分  $\text{HE}_{11}$  模式沿着光纤高折射率环转换为 3 个分离的 CVMs。经过反射镜反射, $\text{HE}_{11}$  基模和 CVMs 的波向 LPG 方向返回。在 LPG 处,部分  $\text{HE}_{11}$  模式从纤芯耦合到环形芯,同时部分 CVMs 耦合回到纤芯,而其余的继续在环形芯中传播。 $\text{HE}_{11}$  模式和 CVMs 作为两个干涉臂,产生干涉,通过监测干涉谱的相移变化来研究外部被测物理量(轴向应变、温度、液体折射率等)的传感特性。由于涉臂导致的相位差可表示为<sup>[15]</sup>:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (1)$$

式中, $\Delta n_{\text{eff}}$  为基模与 CVMs 的有效折射率差, $L$  为干涉臂长度,即 LPG 到反射镜的距离。两个极大值干

涉峰之间的波长宽度定义为自由光谱范围 FSR 为<sup>[15]</sup>:

$$\text{FSR} = \Delta\lambda = \frac{\lambda_m^2}{2\Delta n_{\text{eff}}L}. \quad (2)$$

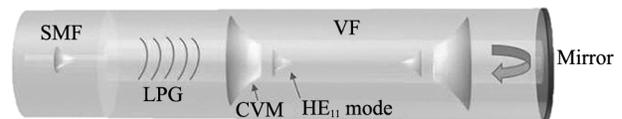


图 3 内光纤 CVMs 的迈克尔逊干涉结构原理图  
Fig. 3 Schematic diagram of the proposed in-fiber cylindrical vector modes Michelson's interferometer

## 2 基于 CVMs 的光纤传感特性

### 2.1 CVMs 的激发及特性

在 VF 的两端直接熔接两根 SMF,且在 VF 左端施加一 MLPG 以激发 CVMs,如图 4 所示。波长范围 1250—1650 nm 的宽带光源(ASLD-CWDM-5-B-FA, Amonics)和光谱分析仪(OSA, AQ6375, YOKOGAWA)分别连接前后两根 SMF,调整 MLPG 测试 CVM 的透射光谱。为了避免损坏 VF,使用 3D 打印技术来制备 MLPG。MLPG 由具有高强度和耐高温性的树脂材料制成,并且可以重复使用。图 4 中的插图显示了 3D 打印的 MLPG 的俯视图。

CVMs 的谐振波长可以由相位匹配条件定义为<sup>[16]</sup>

$$\lambda = \Lambda \times \Delta n_{\text{eff}}, \quad (3)$$

式中, $\Lambda$  是光栅周期。由于  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  的折射率不同,在同一个光栅周期下产生 3 个不同的谐振波长。根据图 2 中计算的有效折射率,当 3D 打印

MLPG周期固定 $\Lambda = 520 \mu\text{m}$ ,可以分别在谐振波长1438 nm,1529 nm和1610 nm处激发 $\text{TM}_{01}$ , $\text{HE}_{21}$ 和 $\text{TE}_{01}$ 模式。

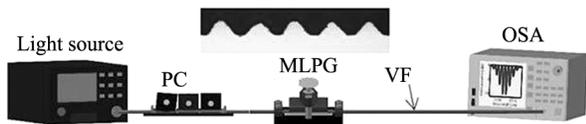


图 4 激发柱矢量模式的实验装置  
Fig. 4 Experimental setup for excitation cylindrical vector

通过对 MLPG 施加压力,一部分  $\text{HE}_{11}$  模式转换为 CVMs,控制施加在 MLPG 上压力的大小可以改变透射谱的深度。图 5(a)清楚地显示了 3 个分离的 CVM 透射光谱。在波长 1438 nm,1529 nm 和 1610 nm 处分别对应于  $\text{TM}_{01}$ , $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  3 个 CVMs 的谐振点。MLPG 对 CVMs 的激励效率取决于入射模式  $\text{HE}_{11}$  的偏振状态 (state of polarization, SOP)。  $\text{HE}_{21}$  可以在任意输入 SOP 处激发,而  $\text{TE}_{01}$  和  $\text{TM}_{01}$  仅在输入 SOP 分别为平行和垂直于微弯扰平面时被激发。因此在接入的 SMF 上施加偏振控制器 (polarization controller, PC) 来调节激励效率。

为了识别激发的 3 个一阶 CVMs,使用红外相机 (HAMAMATSU C10633) 观察 VF 输出的模场,可调谐激光器 (安捷伦 81600B) 代替宽带光源来查看近场 CVMs 的光强。通过调谐激光光源的波长,  $\text{TM}_{01}$ , $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  的 CVMs 在相应的谐振波长处被选择性地激发。如图 5(b) 所示,  $\text{TM}_{01}$ , $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  输出近场模式分别呈现环形强度分布,证明了 CVM 的有效激励。

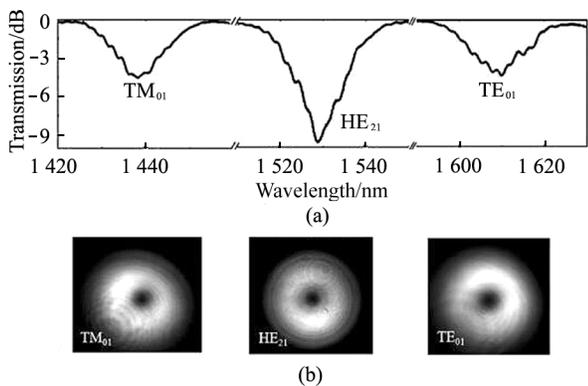


图 5 (a) MLPG 激发的 CVMs 的透射谐振光谱;  
(b) CVMs 的近场矢量模式的光强分布图  
Fig. 5 (a) The transmission resonant spectrum of the CVMs excited by MLPG; (b) The modal near field intensity of the CVMs

## 2.2 基于 CVMs 的迈克尔逊干涉仪传感器

基于光纤的 CVMs,制作了迈克尔逊干涉仪,并构建了用于表征其传感特性的实验装置,如图 6 所示。波长 1250—1650 nm 的宽带光源 (ASLD) 输出光经过 PC 后传输到环形器的  $P_1$  端口,它通过环形器到达  $P_2$  端口,  $P_2$  端口输出的 SMF 与 VF 熔接,并沿 VF 纤芯传播到周期为  $\Lambda = 520 \mu\text{m}$  的 MLPG。对 MLPG 施加压力,一部分  $\text{HE}_{11}$  模式继续沿着光纤的纤芯向光纤末端移动,一部分  $\text{HE}_{11}$  模式沿着光纤高折射率环形芯转换为 3 个分离的 CVMs。到达 VF 尾端后经反射镜反射,纤芯中的  $\text{HE}_{11}$  基模和环形芯中的 CVMs 向 MLPG 方向返回。在 MLPG 处,部分  $\text{HE}_{11}$  模式从纤芯耦合到环形芯,同时部分 CVMs 耦合回到纤芯,而其余的继续在环形芯中传播。  $\text{HE}_{11}$  模式和 CVMs 发生干涉并向环形器的  $P_3$  端口移动,干涉谱在环形器  $P_3$  端口输出。在  $P_3$  端口的光纤末端连接光谱仪,用于测试光纤内迈克尔逊干涉仪的反射光谱。

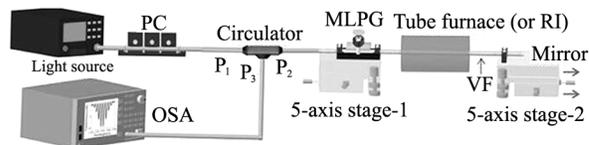


图 6 基于柱矢量模式的内光纤迈克尔逊干涉传感实验装置  
Fig. 6 Experimental setup of the in-fiber Michelson interference sensing based on CVMs

图 7 显示了光纤内迈克尔逊干涉仪的反射光谱,MLPG 到 VF 尾端的距离为 120 mm,对于  $\text{TM}_{01}$ , $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  模式,测得的干涉光谱的周期分别为 3.5 nm,3.8 nm 和 4.1 nm。

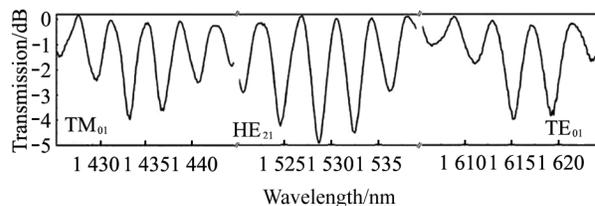


图 7 光纤内迈克尔逊干涉传输反射谱  
Fig. 7 Measured transmission reflection spectrum of the in-fiber Michelson interference

## 3 基于 CVMs 的光纤内迈克尔逊传感特性实验

基于 CVMs 的光纤内迈克尔逊干涉特性实验测量装置如图 6 所示。通过五维调整架在 VF 上施加

轴向应变,研究应变传感特性;在 VS 上加一温度测量器(折射率溶液试剂)研究其温度(折射率)传感特性。

### 3.1 轴向应变传感特性

从图 6 可以看出,通过调整五维调整架 2(5-axis stage-2)水平方向位移,将轴向应变施加到光纤内迈克尔逊干涉仪上,弹光效应引起  $HE_{11}$  模式和 CVMs 的传输光谱相位的变化。3 个柱矢量 CVMs 各自的相位差的变化可以表征它们的灵敏度。在轴向应变下,第  $m$  个衰减峰波长的偏移  $\delta\lambda_{m,\epsilon}$  可以表述为<sup>[17]</sup>:

$$\delta\lambda_{m,\epsilon} = \frac{2(\Delta n_{\text{eff},\epsilon} - \delta n_{\text{eff},\epsilon})(L + \delta L)}{2m + 1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff},\epsilon}L}{2m + 1} \approx \frac{2(\Delta n_{\text{eff},\epsilon}\delta L - L\delta n_{\text{eff},\epsilon})}{2m + 1}, \quad (4)$$

式中,  $L$  为 VF 的长度,即 MLPG 到反射镜的距离,

$\Delta n_{\text{eff},\epsilon}$  为光纤基模和 CVMs 的有效折射率差,由 VF 的结构确定,  $\delta n_{\text{eff},\epsilon}$  和  $\delta L$  是光纤有效折射率和光纤长度随轴向应变的变化量。由式(4)可知,轴向拉伸应变主要引起光纤长度  $\delta L$  和光纤有效折射率  $\delta n_{\text{eff},\epsilon}$  的变化。而应变引起的  $\delta L$  对于光纤芯和光纤环形芯几乎相同,所以光谱中的拉伸应变响应主要来自应变引起的光纤有效折射率  $\delta n_{\text{eff},\epsilon}$  变化。在拉伸应变下,由于弹性光学效应,光纤环形芯和光纤芯的有效折射率都降低,但是光纤环形芯的折射率降低的更大,所以有效折射率差变小,光谱将会呈现出蓝移。

轴向应变测试实验中,MLPG 和反射镜之间的 VF 沿着光纤轴向拉伸,MLPG 到反射镜的距离为  $L = 120 \text{ mm}$ 。固定实验装置左端的五维调整架 1,同

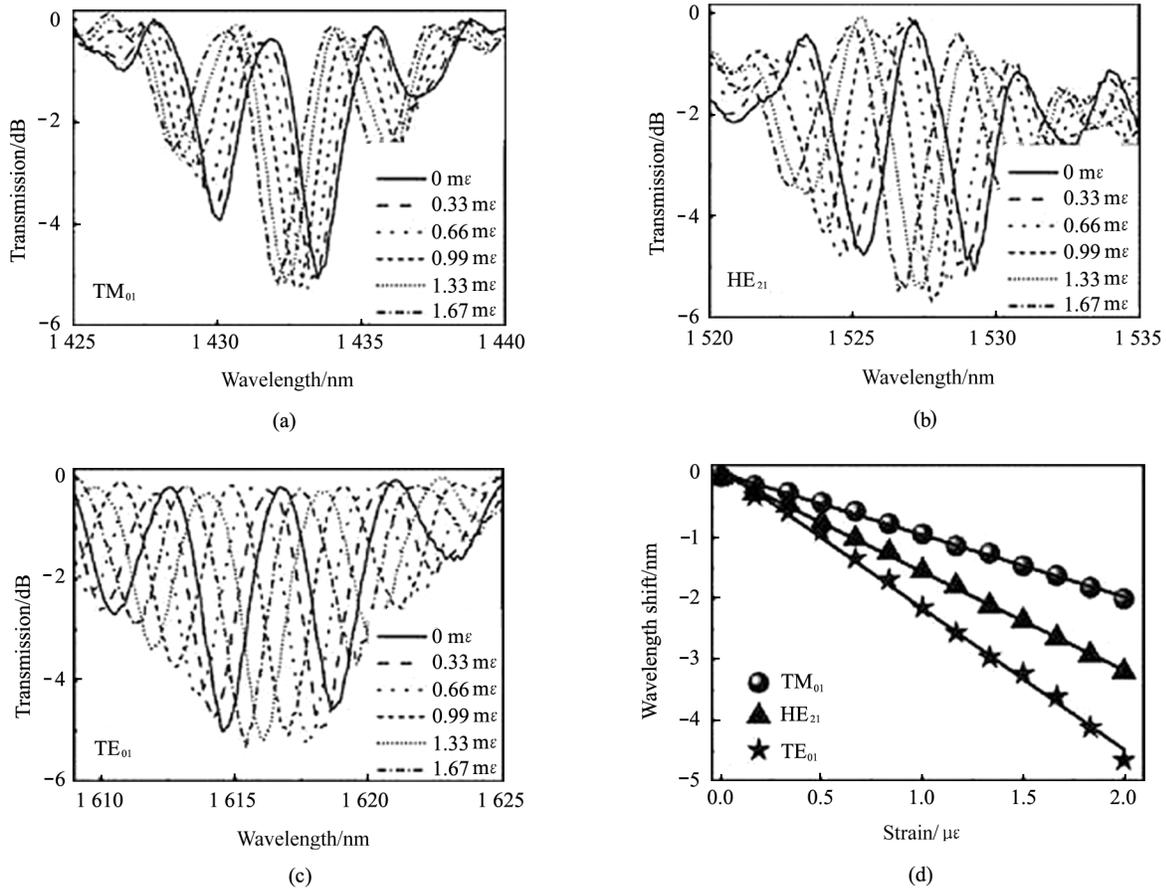


图 8 基于光纤内迈克尔逊应变的传感实验结果:

- (a)  $TM_{01}$ , (b)  $HE_{21}$  和 (c)  $TE_{01}$  的 CVM 的应变干涉光谱响应;
- (d)  $TM_{01}$ ,  $HE_{21}$  和  $TE_{01}$  的 CVMs 的干涉光谱偏移,直线是线性拟合

Fig. 8 Experimental results of the in-fiber Michelson interference strain sensing: the interference spectral response to the strain for (a) the  $TM_{01}$  mode, (b) the  $HE_{21}$  mode and (c) the  $TE_{01}$  mode; (d) The interference spectral dip shifts for the CVMs of  $TM_{01}$ ,  $HE_{21}$ , and  $TE_{01}$ , where the straight lines are the linear fitting

时调整右端的五维调整架 2 向右移,在 VF 上施加  $0-2m\epsilon$  ( $\epsilon = \delta L/L$ ) 的轴向拉伸力,步长  $\delta L$  为  $40\ \mu\text{m}$ ,用光谱仪记录每移动一个步长得到的反射光谱。图 8(a)、(b)、(c)显示了光纤内迈克尔逊干涉仪在  $25\ ^\circ\text{C}$  环境温度下,随拉伸应变步长  $40\ \mu\text{m}$  变化的光谱响应。由实验结果可以看到:  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  3 个 CVMs 的干涉光谱都呈现出了蓝移,但是其灵敏度却不同。实验选择典型的干涉谱谷值来表征灵敏度,如图 8(d)所示。对于  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  的 CVM,干涉点的偏移具有良好的线性度,应变灵敏度分别为  $-1.01\ \text{nm}/m\epsilon$ 、 $-1.61\ \text{nm}/m\epsilon$  和  $-2.31\ \text{nm}/m\epsilon$ 。波长应变的拟合曲线的线性回归系数值分别为  $0.997$ 、 $0.999$  和  $0.996$ ,具有很高的线性度。

### 3.2 温度传感特性

由温度变化引起的波长漂移表达式为<sup>[17]</sup>:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{m,T} &= \frac{2(\Delta n_{\text{eff},T} + \delta n_{\text{eff},T})(L + \delta L)}{2m + 1} - \\ &= \frac{2\Delta n_{\text{eff},T}L}{2m + 1} = \frac{2(\Delta n_{\text{eff},T}\delta L + L\delta n_{\text{eff},T})}{2m + 1}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\Delta n_{\text{eff},T}$  为光纤基模和 CVMs 的有效折射率差,由 VF 确定,  $\delta n_{\text{eff},T}$  和  $\delta L$  是光纤有效折射率和光纤长度随温度  $T$  的变化量。由式(5)可知温度对光纤传感特性的影响主要来自材料的热膨胀和热光效应,  $\delta L$  主要与热膨胀相关,而  $\delta n_{\text{eff},T}$  主要由热光效应引起。对于石英光纤,热膨胀系数和热光系数分别约为  $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$  和  $6.45 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。与热光系数相比,热膨胀系数相对较小,对于二氧化硅光纤基本可以忽略不计,因此温度传感特性灵敏度主要由  $\delta n_{\text{eff},T}$  决定,温度变化引起的波长可表示为:

$$\Delta\lambda_{m,T} = \frac{2\delta n_{\text{eff},T} \cdot L}{2m + 1}. \quad (6)$$

由于 CVB 模式  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  中偏振态的不同, VF 的折射率变化将引起它们的不同模式有效折射率的变化,其表现在光纤迈克尔逊干涉仪的干涉光谱的变化。实验中,光纤迈克尔逊干涉仪的温度传感特性通过微型管式炉实现,温度范围从  $25\ ^\circ\text{C}$  升至  $120\ ^\circ\text{C}$ ,步长为  $5\ ^\circ\text{C}$ ,管式炉加热部分长约  $8\ \text{cm}$ ,通过光谱仪观察干涉谱变化,如图 9 所示。其中

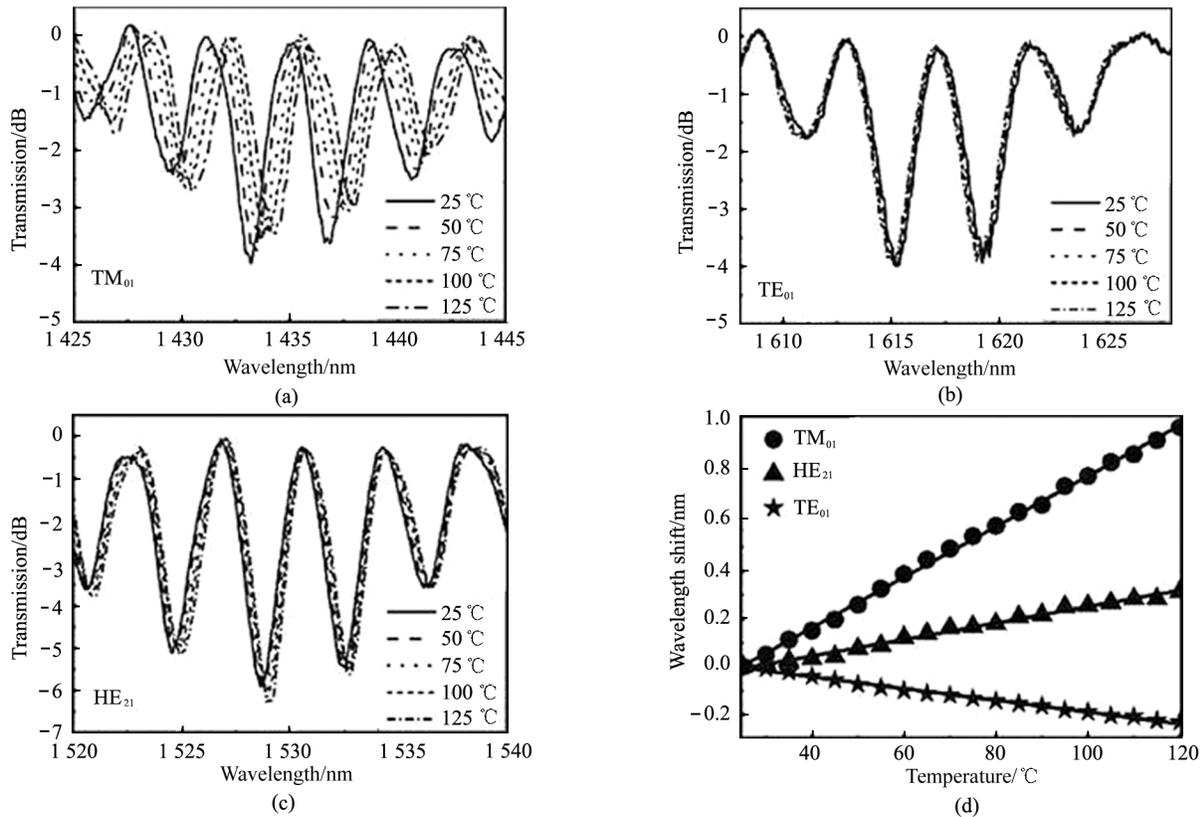


图 9 光纤内迈克尔逊干涉仪温度传感的实验结果:(a)  $\text{TM}_{01}$ 、(b)  $\text{HE}_{21}$  和 (c)  $\text{TE}_{01}$  的 CVMs 对温度的干扰光谱响应; (d)  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TE}_{01}$  的 CVMs 的干涉谱的温度响应,实线是线性拟合

Fig. 9 Experimental results of the in-fiber Michelson interference temperature sensing: The interference spectral response to the temperature for the CVM of (a)  $\text{TM}_{01}$ , (b)  $\text{HE}_{21}$  and (c)  $\text{TE}_{01}$ ; (d) Temperature responses of the interference dips for  $\text{TM}_{01}$ ,  $\text{HE}_{21}$  and  $\text{TE}_{01}$  modes, where the solid lines are the linear fitting

图 9(a)、(b)、(c)显示了温度升高过程中不同温度值在光纤迈克尔逊干涉仪的光谱变化。随着温度的升高,干涉带中的谐振波长点偏移表现出良好的线性响应,如图 9(d)所示。对于  $TM_{01}$ 、 $HE_{21}$  和  $TE_{01}$  模式的干涉光谱,其灵敏度分别为  $9.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $3.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $-2.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。从图 9(d)看到, $TM_{01}$  和  $HE_{21}$  波长向长波移动,主要是由于二氧化硅掺杂锗的正热光系数形成的。然而,笔者还注意到, $TE_{01}$  波长向短波移动,这主要是由 VF 环的折射率变化的各向异性导致的。相对于 SMF, VF 在环形芯中具有更高的锗掺杂,因而在 VF 拉制过程中产生较高的热应力,这在环形芯的内边缘和外边缘中引入了较大的切应力。随着温度的升高,应力引起的折射率将降低,这对  $TE_{01}$  有很大的影响,但对  $TM_{01}$  的影响较小。 $TE_{01}$  电场方向为切向,因热光效应和应力引起的折射率的减小,导致了  $TE_{01}$  的干涉光谱中的热响应为负值。

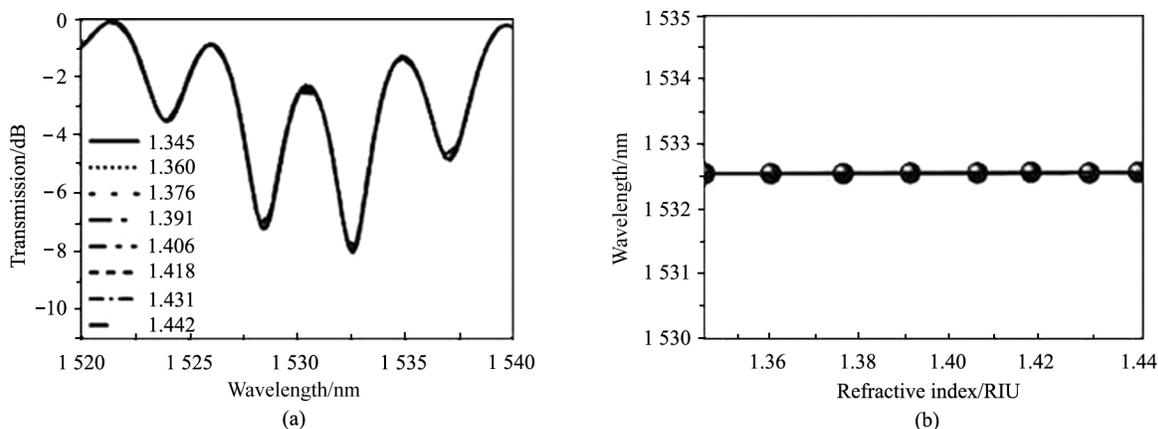


图 10 光纤内迈克尔逊干涉仪的折射率传感的实验结果:(a)  $HE_{21}$  对折射率的干涉光谱响应;  
(b)  $HE_{21}$  干涉谱谐振点的折射率传感响应

Fig. 10 Experimental results of the in-fiber Michelson interference refractive index sensing:  
(a) The interference spectral response to the refractive index for the CVMs of  $HE_{21}$  ;  
(b) Refractive index sensing responses of the interference dips for  $HE_{21}$

## 4 结 论

总之,本文基于具有同轴结构的 VF 和耦合模理论,利用 MLPG 和 VF 尾端的反射镜,将  $HE_{11}$  模式部分耦合到  $TE_{01}$ 、 $HE_{21}$  和  $TM_{01}$  CVMs 实现了迈克尔逊干涉仪传感器,分别对轴向应变、温度和折射率传感特性进行了理论和实验研究。实验测得的对应于  $TM_{01}$ 、 $HE_{21}$  和  $TE_{01}$  的 CVM 应力灵敏度分别为  $-1.01 \text{ nm}/\text{me}$ 、 $-1.61 \text{ nm}/\text{me}$  和  $-2.31 \text{ nm}/\text{me}$ ,温度灵敏度分别为  $9.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $3.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和

## 3.3 折射率传感特性

采用甘油和水混合物溶液作为样本来进行折射率特性传感实验研究。外部环境折射率变化由水和甘油浓度的不同比例确定,当外界环境折射率改变时,光纤中支持的各个不同传输模式的有效折射率也会相应改变,谐振波长会随外界环境折射率的改变发生线性漂移。利用实验装置图 6 测试了  $HE_{21}$  模式的折射率传感特性,在 VF 外部加折射率溶液试剂,图 10(a)为在 VF 上加不同折射率溶液时得到的光谱响应,可以看到随着折射率溶液的变化, $HE_{21}$  光谱基本没有变化。从图 10(b)中也可以看出,迈克尔逊传感器  $HE_{21}$  模式对折射率的不敏感性,同理可得到  $TM_{01}$  和  $TE_{01}$  模式对折射率也是不敏感的。这是由于基模  $HE_{11}$  和 CVMs  $TM_{01}$ 、 $HE_{21}$  和  $TE_{01}$  都属于 VF 的纤芯模式,基模和 CVMs 的折射率变化量相等,因此折射率不会改变。

$-2.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,以及折射率不敏感。所设计的传感器具有折射率不敏感、应变敏感性高、温度稳定性好等特点,并且结构简单易于制造,有很强的实际应用价值。可应用于任何结构的折射率不敏感的、温度交叉灵敏度低的理想无补偿应变传感等智能工程中。

## 参考文献:

- [1] SHI P, DU L P, YUAN X C. Optical manipulation with electric and magnetic transverse spin through multilayered focused configuration[J]. Applied Physics Express, 2019,

- 12(3):032001.
- [2] DREVINSKAS R, ZHANG J Y, BERESNA M, et al. Laser material processing with tightly focused cylindrical vector beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(6): 221107.
- [3] LIU M, LEI Y Z, YU L, et al. Super-resolution optical microscopy using cylindrical vector beams[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(15): 3395-3420.
- [4] ZHANG W D, LI X, ZHANG L, et al. Generation of cylindrical vector beams and optical vortex in a solid-ore ring fiber based on an acoustically induced fiber grating[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 26(4): 4252.
- [5] HUANG W, YOU Y, SONG B B, et al. A photonic crystal fiber for supporting 30 orbital angular momentum modes with low dispersion[J]. *Optoelectronics Letters*, 2022, 16(1): 34-39.
- [6] ZHANG H B, FU C W, FANG J C, et al. Cylindrical vector beams demultiplexing optical communication based on spin-dependent vortex Dammann grating[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(35): 11041-11045.
- [7] GU M, KANG H, LI X P. Breaking the diffraction-limited resolution barrier in fiber-optical two-photon fluorescence endoscopy by an azimuthally-polarized beam[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3627.
- [8] ZHANG Y P, WANG T X, CHENG Y, et al. Controllable laser output of high-quality cylindrical vector beam through intra-cavity mode conversion[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(7): 111105.
- [9] SHI S, DING D S, ZHOU Z Y, et al. Magnetic-field-induced rotation of light with orbital angular momentum[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(6): 261110.
- [10] YU S F, PANG F F, LIU H H, et al. Compositing orbital angular momentum beams in  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystal for magnetic field sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(9): 091107.
- [11] PANG F F, ZHENG H Q, LIU H H, et al. The orbital angular momentum fiber modes for magnetic field sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 893-896.
- [12] DEMAS J, GROGAN M D W, ALKESKJOLD T, et al. Sensing with optical vortices in photonic-crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3768-3770.
- [13] YANG J F, LIU H H, WEN J X, et al. Cylindrical vector modes based Mach-Zehnder interferometer with vortex fiber for sensing applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(7): 051103.
- [14] DATTA A, SAHA A, SHUKLA. Investigation of modal-interference-induced fiber optic refractive index sensor: markedly enhanced sensitivity realized by shining an optical vortex beam[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(11): 2034-2045.
- [15] ZHU T, WU D, LIU M, et al. In-line fiber optic interferometric sensors in single-mode fibers[J]. *Sensors*, 2012, 12(8): 10430-10449.
- [16] BOZINOVIC N. *Orbital angular momentum in optical fibers* [D]. Boston: Boston University, 2013: 40-45.
- [17] ZHOU J T, LIAO C R, WANG Y P, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature by employing fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1680-1686.

#### 作者简介:

杨俊锋 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感、特种光纤器件等方面的研究。