

# 宽带光源入射下单模-多模-单模全光纤电流传感器特性研究

张荣香<sup>1,2,3</sup> 韩 群<sup>1,2\*</sup> 刘铁根<sup>1,2</sup> 陈耀飞<sup>1,2</sup> 李 琳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072  
<sup>2</sup> 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072  
<sup>3</sup> 河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

**摘要** 建立了基于单模-多模-单模光纤结构和磁流体的全光纤电流传感器,此传感器能够通过检测透射光谱的特征波长漂移和传输损耗变化两种方法来探测电流。对于第一种方法,得到电流灵敏度为 1243.7 pm/A [77.9 pm/Oe, 1 Oe=1/(4 $\pi$ ) $\times$ 10<sup>3</sup> A/m];对于第二种方法,传感特性依赖于波长的选择,分析了不同波长条件下传感器传输损耗的变化特性。结果表明:选择单波长时,传感特性受波长的影响,且传输损耗变化小,从而灵敏度小;使用宽波长范围内的总传输损耗时,传输损耗变化大,电流检测灵敏度大大加强,所得灵敏度为 506.2 dB/A (31.7 dB/Oe),分别是单波长 1529 nm 和 1611 nm 下灵敏度的 337 倍和 723 倍。在自发辐射宽带光源入射条件下,利用探测器直接检测传感器输出光强的变化,得到 26.8 V/A (1.7 V/Oe) 的电流灵敏度。

**关键词** 光纤光学; 电流传感器; 单模-多模-单模; 磁流体; 宽带光源

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0705003

## Investigation of Characteristics of Single mode-Multimode-Single mode All-Fiber Optic Current Sensor with Broadband Light Source Inputting

Zhang Rongxiang<sup>1,2,3</sup> Han Qun<sup>1,2</sup> Liu Tiegen<sup>1,2</sup> Chen Yaofei<sup>1,2</sup> Li Lin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Tianjin University),  
Ministry of Education, Tianjin 300072, China

<sup>3</sup> College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

**Abstract** A single mode-multimode-single mode fiber optic structure and magnetic fluid based all-fiber optic current sensor, which can be interrogated by monitoring the dip wavelength shift or transmission loss of the transmission spectrum, is designed. For the first interrogation method, the current sensitivity of 1243.7 pm/A [77.9 pm/Oe, 1 Oe=1/(4 $\pi$ ) $\times$ 10<sup>3</sup> A/m] is obtained. For the second way, the sensing property depends on wavelength. By analyzing the rule of the change of transmission loss under different wavelengths, it is found that when a specified wavelength is used, the sensing property is influenced by different wavelengths and the variation of transmission loss is little, leading to a small sensitivity. When the all transmission loss during broad wavelength range of source is employed, the change of transmission loss is obvious, and hence the current sensitivity is greatly enhanced. The obtained sensitivity of 506.2 dB/A (31.7 dB/Oe) is 337 times and 723 times larger than those under 1529 nm and

收稿日期: 2014-03-27; 收到修改稿日期: 2014-04-28

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ03091502)、国家自然科学基金(61107035)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16100)

作者简介: 张荣香(1981—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感和光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: zrx@hbu.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、嵌入式图像检测技术和防伪检测技术等方面的研究。E-mail: tgliu@tju.edu.cn(中国光学学会会员号: s042011274s)

\* 通信联系人。E-mail: hanqun@tju.edu.cn

1611 nm, respectively. Furthermore, the sensitivity of 26.8 V/A (1.7 V/Oe) is achieved by detecting the output intensity using detector with amplified spontaneous emission broadband light source inputting.

**Key words** fiber optics; current sensor; single mode-multimode-single mode; magnetic fluid; broadband light source

**OCIS codes** 060.2370; 230.3810; 160.3820

## 1 引 言

电流检测是电力系统电能计量、继电保护、系统诊断与监测分析的重要组成部分,其测量灵敏度、运行可靠性是实现电力系统安全、经济运行的前提。由于传统的电磁感应电流互感器具有体积大和开路危险等缺点<sup>[1]</sup>,后期发展起来的磁光玻璃光学电流互感器具有加工难度大和可靠性差等不足<sup>[2]</sup>,光纤环式全光纤电流互感器存在容易受线性双折射影响等问题<sup>[3]</sup>,使得开发新型的电流传感器成为电力相关行业一项十分有意义的工作。

随着光纤传感技术的发展,基于单模-多模-单模(SMS)结构的光纤传感器,因为其具有制作容易、体积小、成本低等优点,已经在多个领域得到广泛的应用<sup>[4-12]</sup>。SMS 光纤传感器主要基于多模干涉原理及自映像效应,当其结构参数(多模光纤长度、半径和形状)或材料特性(折射率和吸收特性)发生变化时,多模光纤中传播的模式发生变化,从而使得输出干涉光谱的特征峰漂移和传输损耗发生改变,因此可以通过光谱特征的变化来检测温度<sup>[4-7]</sup>、位移<sup>[4,8]</sup>、折射率<sup>[9-11]</sup>和浓度<sup>[12]</sup>等物理量。由于光纤本身对电流/磁场不敏感,所以改变电流/磁场不能改变 SMS 光纤传感器的结构参数,从而直接利用 SMS 结构不能检测电流/磁场。但是如果在 SMS 结构中多模光纤外覆盖某种磁光敏感材料,通过电流/磁场的改变来影响这种材料的性质,从而影响传播到敏感材料中倏逝场的特性,使得传输光谱发生变化,就可以通过光谱特征的变化量来检测电流/磁场。磁流体(MF)作为一种新型的磁光材料,具有传感器所需要的众多磁光调制特性、如可调折射率特性、场依赖传输特性,双折射特性和法拉第效应等<sup>[13-17]</sup>。将磁流体包裹在 SMS 中多模光纤外面作为包层,利用磁流体的可调折射率特性和场依赖传输特性来影响其中的倏逝场,即可实现电流/磁场检测的目的,由于其利用的不是偏振光的法拉第效应,所以此种电流/磁场传感器在具备光纤传感器优点的同时克服了线性双折射问题。目前,关于这种基于 SMS 和磁流体的电流/磁场传感器的报道很少,Wang 等<sup>[18-19]</sup>分别建立了此种结构的磁场传感器,结果表明,其相比于利用磁流体和光子晶体光

纤<sup>[14-15]</sup>、长周期光栅<sup>[16]</sup>以及迈克耳孙干涉仪<sup>[17]</sup>的磁场传感器,具有结构简单、制作容易、成本低和灵敏度高的优点。不过,Wang 等<sup>[18]</sup>没有考虑磁流体的吸收,没有给出透射损耗随磁场的变化规律,并且多模光纤的腐蚀过程比较复杂、难于控制且具有危险性。Chen 等<sup>[19]</sup>用无芯光纤代替了腐蚀的多模光纤,在简化制作过程的同时实现了永磁铁周围磁场的检测,但是对于基于传输损耗变化的磁场检测方法,只给出了某单一波长处传输损耗随磁场的变化规律,并且传输损耗仅通过光谱仪检测得到,而没有用探测器直接探测传输光强的变化。本文利用线圈将电流转化为磁场,制作了基于无芯光纤构成的 SMS 光纤结构和磁流体的全光纤电流传感器,其可以利用透射谱特征波长漂移或传输损耗变化来检测电流,并且通过进一步分析不同波长选择方法下传输损耗随电流的变化特性,提出可以利用宽波长范围内总光强的变化来检测电流的方法,实验证明此方法所得电流灵敏度大大提高,并且利用理论仿真对其进行了验证。

## 2 SMS 全光纤电流传感器结构及原理

SMS 全光纤电流传感器结构如图 1 所示。实验中所用单模光纤(SMF)为康宁公司生产的标准单模光纤 SMF-28(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)。多模光纤为台湾 Prime Optical Fiber 公司生产的无芯光纤 NCF61.5,其涂覆层内只包裹一种材料(纯硅),直径为  $61.5 \mu\text{m}$ 。磁流体为美国 Ferrotec 公司生产的 EMG605 水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁流体,其密度为  $1.18 \text{ g/cm}^3$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ),无磁场时折射率约为 1.4<sup>[20]</sup>,低于无芯光纤(NCF)的折射率。将一段长度为  $7.85 \text{ cm}$  的无芯

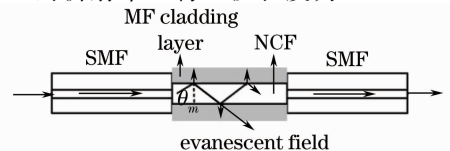


图 1 SMS 全光纤电流传感器结构原理图

Fig. 1 Schematic of SMS all-fiber optic current sensor

光纤用刀片去除涂覆层后,用普通熔接机的手动熔接方式熔接到两段完全一样的单模光纤中间,然后将无芯光纤置入一长度为 10 cm,内径为 5 mm 的直玻璃毛细管中,再利用毛细作用将磁流体吸进玻璃管中,最后玻璃管两端用紫外固化光学胶封装,此时磁流体即为无芯光纤的包层。

对于 SMS 光纤结构,设  $E(r,0)$  为输入端 SMF 中传输的基模光场,由于 NCF 的直径远大于 SMF 的纤芯直径,因此当输入光传输至 NCF 时,会在 NCF 中激发起多个模式  $\{LP_m\}$ 。设 SMF 和 NCF 是无偏心对接,又因为输入场及光纤结构具有中心对称性,因此只有  $\{LP_{0m}\}$  模式被激发<sup>[21]</sup>。在输入端 SMF 和 NCF 连接处,根据电磁场的连续性条件得到

$$E(r,0) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r), \quad (1)$$

式中  $M$  为 NCF 中激发模的总数,  $F_m(r)$  是第  $m$  阶模式的光场,  $r$  为光纤横截面的径向坐标,  $c_m$  为第  $m$  阶模式的激发系数,其可由(2)式求得<sup>[9]</sup>:

$$c_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r,0) F_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} F_m(r) F_m(r) r dr}. \quad (2)$$

因为 NCF 中传输的各阶模式在 NCF 与 MF 的界面上发生全反射时会透入一定深度的 MF 中形成倏逝场,考虑到 MF 是吸收性物质<sup>[22]</sup>,会对倏逝场有一定的衰减作用,所以当光波在 NCF 中传输  $z$  距离后,其光场可表示为<sup>[19,23]</sup>

$$E(r,z) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \exp(i\beta_m z) \exp(-\gamma_m z), \quad (3)$$

式中  $\beta_m$  和  $\gamma_m$  分别为第  $m$  阶模式的纵向传播常数和倏逝场吸收系数。

对于子午线入射情况,  $\gamma_m$  可表示为<sup>[24]</sup>

$$\gamma_m = \frac{\alpha_\lambda n_t \cos \theta_m \cot \theta_m}{4\pi R_0 n_c^2 \cos^2 \theta_c \sqrt{\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta_c}}, \quad (4)$$

式中  $\alpha_\lambda$  是 MF 在真空波长  $\lambda$  处的消光系数,  $[\theta_c = \arcsin(n_t/n_c)]$ ,  $\theta_c$  为传感区域的全反射临界角,  $n_t$  和  $n_c$  分别是 MF 和 NCF 的折射率,  $R_0$  是 NCF 的半径,  $\theta_m$  是传感区域中第  $m$  阶模式的光线相对于分界面法线的入射角,如图 1 所示。

最终,光通过长度为  $L$  的 NCF 后再耦合到输出端 SMF 中得到输出,考虑到各个模式之间发生的干涉现象和 MF 对倏逝场的吸收作用,在波长  $\lambda$  处的透射率可表示为<sup>[25]</sup>

$$T(\lambda) = \sum_{m,n=1}^M c_m^2 \cdot c_n^2 \cdot \cos[(\beta_m - \beta_n)L] \cdot \exp[-(\gamma_m + \gamma_n)L]. \quad (5)$$

由模式传播理论<sup>[26]</sup>可知, MF 折射率  $n_t$  的变化会引起 NCF 中模式传播常数  $\beta_m$  和激发系数  $c_m$  的改变,由(4)式可知折射率  $n_t$  和消光系数  $\alpha_\lambda$  的变化均会引起倏逝场吸收系数  $\gamma_m$  的变化。因为 MF 的折射率  $n_t$  和消光系数  $\alpha_\lambda$  均随电流/磁场而改变<sup>[22]</sup>,所以(5)式中激发系数  $c_m$ 、模式干涉项  $\cos[(\beta_m - \beta_n)L]$  和衰减项  $\exp[-(\gamma_m + \gamma_n)L]$  均随着电流/磁场而变化,从而透射光谱也会随着电流/磁场而改变,具体反映在干涉项变化引起的特征峰的移动和三项共同作用引起的透射率变化。因此,可以通过透射谱特征波长的移动和透射率的变化来检测电流/磁场。

由模式传播理论<sup>[26]</sup>和(4)式可知,影响透射谱透射率的激发系数  $c_m$ 、模式传播常数  $\beta_m$  和倏逝场衰减系数  $\gamma_m$  均与波长  $\lambda$  有关,从而在其他参数相同的条件下,相同电流/磁场下不同波长处的传输损耗不同,同样的电流/磁场变化条件下,不同波长处透射损耗的变化也不同。

## 3 实验及结果

### 3.1 不同电流下 SMS 全光纤电流传感器透射谱

测量不同电流下传感器透射谱的实验装置如图 2 所示,波长范围为 1520~1620 nm 的放大自发辐射(ASE)宽带光源发出的光入射到 SMS 光纤电流传感器中,使用光谱分析仪(OSA)探测传输光谱,以光源光谱为参照,得到不同电流下的透射谱。利用螺线圈将电流转换为磁场作为待测量,电流由一恒流源提供,利用高斯计得到传感器处磁场强度  $H$  和电流  $I$  间校订关系为  $H = 15.96I$ ,其中  $H$  单位为奥斯特[Oe, 1 Oe =  $1/(4\pi) \times 10^3$  A/m],  $I$  单位为安培(A)。为了保证测量的稳定性,每次施加电流 60 s 后采集光谱。

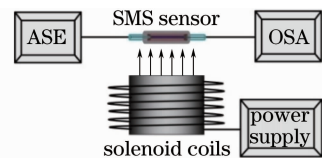


图 2 测量传感器透射谱的实验装置

Fig. 2 Setup for measuring the transmission spectrum of sensor

实验过程中保证磁场方向与光束传播方向相互垂直,因为当给 MF 施加外磁场时,其中纳米颗粒会

凝聚并形成团簇,沿磁场方向形成磁柱<sup>[27]</sup>。相对于其他方位,磁场与光传播方向相互垂直时沿光纤轴向单位长度上的平均磁柱数最多,所以与光纤倏逝场相互作用的纳米颗粒数最多<sup>[28]</sup>,从而磁场对 MF 性能(折射率和消光系数)的影响最大,电流/磁场检测的灵敏度最高。

图 3 和图 4 分别为实验得到的 ASE 光源光谱和不同电流大小下传感器透射光谱,可见随着电流的增加,透射谱的两个干涉特征波长均向长波方向移动,这是因为电流/磁场增加使得磁流体的折射率增加<sup>[22,29]</sup>,从而导致特征波长  $\lambda_{\text{dip}}$  红移<sup>[9-10]</sup>。图 4 中左边 1565.9 nm 处特征波长的移动幅度较大,其随电流  $I$  的变化关系如图 5 所示。从图 5 可以看出,在 0.4~6 A 电流范围内,特征波长随电流的增加线性变化,变化的灵敏度为 1243.7 pm/A (77.9 pm/Oe)。因为实验中电流通过线圈转化为磁场,实际作用于磁流体的是磁场,所以传感器的电流检测范围可以通过调整线圈匝数而改变,线圈匝数增加时,检测范围变小,反之,检测范围增大。若利用线圈电流和磁场间的校订关系和安培环路定理 ( $I=2\pi rH$ ) 换算成直导线周围半径  $r$  为 2 cm 处的电流,则对应的电流线性范围为 64~958 A。另外,通过距离  $r$  的调整可以改变相应的电流线性范围。

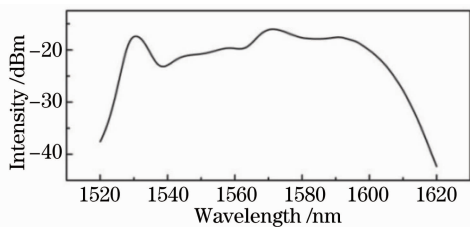


图 3 ASE 光源光谱

Fig. 3 Spectrum of ASE light source

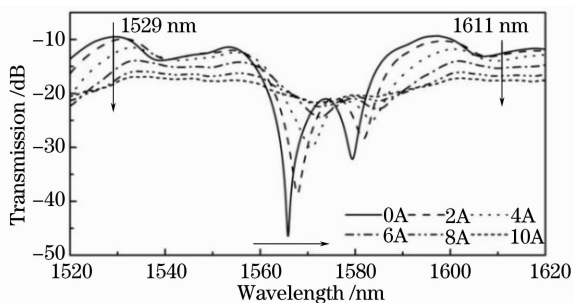


图 4 不同电流大小下传感器的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of the sensor under different currents

由于磁流体是吸收性介质,而且吸收特性随电流/磁场大小而变化,所以不同电流下其对传输光倏

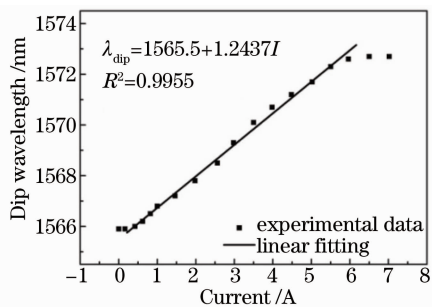


图 5 传感器特征波长随电流的变化关系

Fig. 5 Variation of the dip wavelength as a function of current for sensor

逝场的吸收不同,体现到透射谱上即如图 4 所示的不同电流下透射率不同。图 4 表明不同的波长选择下,透射率随电流的变化规律不同,例如,在同样的电流变化范围内(0~10 A),波长 1529 nm 和 1611 nm 下传输损耗的变化不同,从而传感器的传感特性不同,这与原理部分所述的传输特性和波长有关的结论相符。基于实际使用中波长选择的重要性,下面来详细讨论波长选择对强度解调电流传感特性的影响。

### 3.2 不同波长下 SMS 全光纤电流传感器透射谱传输损耗的变化特性

(5)式表明透射率的变化是激发系数  $c_m$ 、模式干涉项  $\cos[(\beta_i - \beta_j)L]$  和衰减项  $\exp[-(\gamma_i + \gamma_j)L]$  共同决定的,而不仅仅是由衰减项决定的,因而并不是所有波长处的透射率随着 MF 消光系数的增大而单调减小,而是遵循特有的规律。这可由图 4 看出,在一些波长处的传输损耗随着电流的增大呈现出先减小后增大(如 1563 nm)、或者是先增大后减小的趋势(如 1585 nm)。然而大多数波长处的传输损耗都是随着外界电流的增大而单调增大(如 1529 nm、1611 nm)。在这些单调变化的波长处,传输损耗变化的幅度不同,从而对电流的灵敏度不同,这可由下面分别在变化程度较大的 1529 nm 处和变化程度较小的 1611 nm 处对传输损耗的拟合结果看出。

由于不同波长条件下传输损耗的变化规律不尽相同,基于传感目的,通常希望在选择波长下传输损耗的变化是单调且均匀的。本工作选择符合此原则的两个有代表性的波长来分析单波条件下电流传感性能,即总体变化幅度比较大的 1529 nm 和比较小的 1611 nm。为了便于比较,选用零电流下传输损耗为参照,用零电流下传输损耗与不同电流下传输损耗的差值来表示不同电流下透射谱的相对传输



损耗  $\delta$ 。两波长下相对传输损耗随电流的变化关系如图 6 所示,可见,不管是总体变化量还是变化灵敏度,1529 nm 波长处的结果都比 1611 nm 波长处的结果大。因此,对于单波长情况,1529 nm 传感性能更好。除了单波长外,可以利用宽带光总波长范围内的传输损耗变化来检测电流,宽带光全波长范围(1520~1620 nm)内相对传输损耗随电流的变化关系同样如图 6 所示。可见,宽带光全波长范围内相对传输损耗的变化量和变化灵敏度都远远大于两个单波长下的结果。

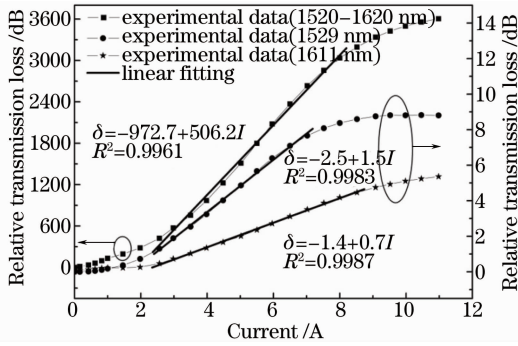


图 6 不同波长下实验得到相对传输损耗随电流的变化

Fig. 6 Experimental relative transmission loss against current at different wavelengths

单波长和宽波长条件下相对传输损耗变化的具体值如表 1 所示,可见,不同波长选择下相对传输损耗在一定的电流大小范围内,变化趋势类似,但是变化量不同,从而导致电流检测的灵敏度不同。由表 1 可知,在 0~11 A 的电流变化范围内,宽带光全波长范围内相对传输损耗的变化幅度为 3604 dB,要远远大于两个单波长下的变化幅度,是 1529 nm 时变化幅度(8.8 dB)的 410 倍,1611 nm 时变化幅度(5.4 dB)的 667 倍。图 6 所示的拟合结果表明宽带光全波长范围内电流检测的灵敏度为 506.2 dB/A (31.7 dB/Oe),远远大于单波长时的 1.5 dB/A (1529 nm)和 0.7 dB/A (1611 nm),分别是二者的 337 倍和 723 倍。这是因为单波长时利用的是某一波长处不同电流下传输损耗的变化来探测电流,而全波长时利用的是不同电流下宽波长范围内所有传输损耗和的变化来探测电流,由于绝大部分波长处的传输损耗变化趋势是相同的,均随着电流的增加而增加,所以全波长下传输损耗相加,可以使得相同电流变化条件下宽波长内传输损耗和的变化幅度增加,从而增加了灵敏度。

表 1 不同波长下相对传输损耗的变化量

Table 1 Variations of relative transmission loss at different wavelengths

Wavelength / nm	Range of current / A	Relative transmission loss / dB
1520~1620		0~3604
1529	0~11	0~8.8
1611		0~5.4

根据第 2 节中原理部分介绍的理论模型编写 Matlab 程序,对不同波长条件下传输损耗随电流的变化进行理论仿真。仿真过程中光纤参数和无磁场时 MF 折射率根据实验材料部分介绍的参数进行选取。因无芯光纤的实心包层为纯石英材料,计算其中色散特性(不同波长处的折射率值)可用 Sellmeier 色散公式计算得到。仿真得到 1529 nm 和 1611 nm 单波长处相对传输损耗及宽波长范围内总相对传输损耗随电流的变化关系如图 7 所示。比较图 6 和图 7,可见仿真结果与实验结果一致,即宽带光入射时电流检测灵敏度大大提高,而且仿真和实验的变化趋势也一致。仿真与实验结果较为吻合,不仅进一步验证了本文提出的电流传感器的可行性,也证明了所述理论模型的正确性。

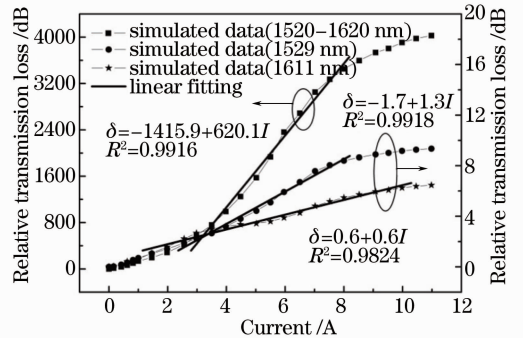


图 7 不同波长下仿真得到相对传输损耗随电流的变化

Fig. 7 Simulated relative transmission loss against current at different wavelengths

上述得到的特征波长和相对传输损耗随电流的变化曲线在两端均呈现出非线性现象,这主要是由磁流体本身的特性引起的。电流/磁场作用于磁流体改变磁流体特性(折射率和消光系数)是通过磁流体中纳米磁性颗粒在外电流/磁场作用下的凝聚和团簇行为所导致的<sup>[27]</sup>:当电流/磁场较小时,磁流体中纳米磁性颗粒的凝聚和团簇现象很少,从而对磁流体特性的影响小,使得传感器输出的变化小;随着电流/磁场的增大,磁流体中纳米磁性颗粒在磁场的作用下逐渐发生凝聚和团簇,形成磁柱,进而影响磁

流体的特性,使得输出随电流/磁场线性变化;当电流/磁场达到一定程度时,磁流体中纳米磁性颗粒的凝聚和团簇作用饱和,基本不出现新的磁柱,磁流体的特性几乎不变,传感器输出趋向饱和。

### 3.3 宽带光入射下基于强度解调的 SMS 全光纤电流传感器传感特性

上述对基于强度解调的传感器的性能分析表明,当利用宽带光全波长范围内的总传输损耗时电流检测的灵敏度大,由于光谱仪价格昂贵,因此实际中可以利用直接探测光强的方法来检测电流。直接探测传输强度的实验装置如图 8 所示,宽带光源发出的光经过隔离器后,被 50:50 光纤耦合器分成两

路,其中一路作为参考光,经过可调光衰减器 (VOA) 后,进入平衡探测器 (BD) 的正输入端;另一路作为检测光通过 SMS 光纤传感器后进入平衡探测器的负输入端。平衡探测器的作用是消除光源波动的影响,使检测更具有稳定性。其中参考臂上可调光衰减器的作用是调节光强大小使得无电流作用下输入到平衡探测器中的两路光强相等,从而可以直接检测不同电流作用下磁流体引起的强度改变。两路光经过平衡探测器后由数据采集卡 (DAQ) 采集,然后送入计算机 (PC) 中进行数据处理和分析。同样为了保证测量的稳定性,每次施加电流 60 s 后采集数据。

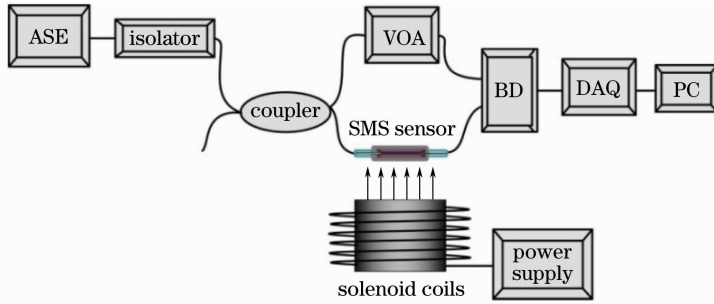


图 8 宽带光入射下测量传感器透射强度的实验装置

Fig. 8 Schematic diagram for detecting the transmission intensity of sensor with the ASE light source inputting

实验得到的输出电压  $V$  随电流  $I$  的变化关系如图 9 所示,可见,与图 6 所示的由透射光谱得到的变化趋势一致。在 1.5~6 A (23.9~95.8 Oe) 范围内,输出随电流线性变化,变化的灵敏度为 26.8 V/A (1.7 V/Oe)。传感器的电流检测范围同样可以通过调整线圈匝数而改变,换算成直导线周围半径 2 cm 处检测的电流线性范围为 239~958 A。考虑到成本问题,实际使用中可考虑将平衡探测器换为两个功率计,或者自制电路板实现光电转换和相减过程。

## 4 结 论

对基于 SMS 光纤结构和磁流体的全光纤电流传感器的传感性能进行了研究,结果表明:对于此传感器可以利用透射谱的特征波长漂移或传输损耗变化来检测电流。利用特征波长漂移来检测电流时,得到检测灵敏度为 1243.7 pm/A (77.9 pm/Oe)。利用传输损耗变化来检测电流时,波长的选择具有重要影响。当选用单波长时,有些波长处传输损耗非单调变化,不适合进行电流检测,其他传输损耗单调变化的波长可以用来检测电流,但变化幅度较小,并且传感灵敏度受波长影响比较明显;当采用宽带光全波长范围的总传输损耗变化来检测电流时,传输损耗的总体变化量大大增强,从而灵敏度大大提高,所得灵敏度为 506.2 dB/A (31.7 dB/Oe),是 1529 nm 波长下电流灵敏度的 337 倍,1611 nm 波长下电流灵敏度的 723 倍。在上述结论基础上,利用探测器取代光谱仪,在宽带光入射下直接检测传输强度,得到电流灵敏度为 26.8 V/A (1.7 V/Oe),从而在获得好的电流传感特性的同时降低了检测成本。本文所得结果能够为基于磁流体和 SMS 光纤结构的电流/磁场传感器的实际应用提供重要参考。当将此

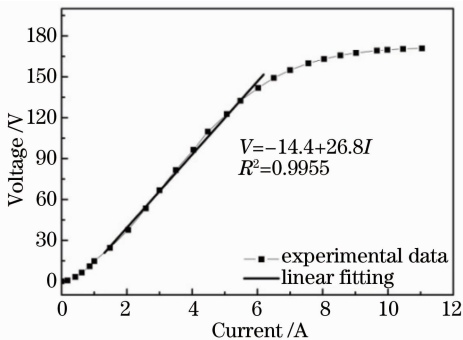


图 9 传感器输出电压随电流的变化

Fig. 9 Output voltage response of sensor versus current

传感器用于直导线电流探测时,由于可测电流范围随检测点距离导线的半径而变化,所以可以通过增加此半径提高可检测电流的最大值,另外如果能用饱和磁场强度大的磁流体代替现有磁流体,则不仅能提高可测电流的最大值,而且能扩大电流检测的线性范围。除电流/磁场传感外,所建立传感器结构在调制器和滤波器方面也有很好的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Z P Wang, S Q Zhang, L B Zhang. Recent advances in optical current-sensing techniques[J]. *Sens Actuators A*, 1995, 50(3): 169—175.
- 2 Y N Ning, D A Jackson. Review of optical current sensors using bulk-glass sensing elements[J]. *Sens Actuators A*, 1993, 39(3): 219—224.
- 3 K Bohnert, P Gabus, J Nehring, *et al.*. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(2): 267—276.
- 4 Q Wu, A M Hatta, P Wang, *et al.*. Use of a bent single SMS fiber structure for simultaneous measurement of displacement and temperature sensing[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(2): 130—132.
- 5 R X Gao, Q Wang, F Zhao, *et al.*. Optimal design and fabrication of SMS fiber temperature sensor for liquid[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(16): 3149—3152.
- 6 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905003.  
王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905003.
- 7 Huang Zejia, Li Qiang, Xu Yaqin, *et al.*. Research on temperature sensing characteristics based on modular interference of single-mode-multimode-single-mode fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0605001.  
黄泽钺, 李强, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605001.
- 8 Q Wu, Y Semenova, P Wang, *et al.*. Experimental demonstration of a simple displacement sensor based on a bent single-mode-multimode-single-mode fiber structure[J]. *Meas Sci Technol*, 2011, 22(2): 025203.
- 9 Q Wu, Y Semenova, P Wang, *et al.*. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer-analysis and experiment[J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 7937—7944.
- 10 P Wang, G Brambilla, M Ding, *et al.*. High-sensitivity, evanescent field refractometric sensor based on a tapered, multimode fiber interference[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(12): 2233—2235.
- 11 Chen Yaofei, Han Qun, He Yang, *et al.*. Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0905001.  
陈耀飞, 韩群, 何洋, 等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905001.
- 12 Zheng Jingjing, Ma Lin, Bai Yunlong, *et al.*. Theoretical and experimental investigation on solution concentration sensing characteristics of NCF interference[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(9): 1651—1655.
- 郑晶晶, 马林, 柏云龙, 等. 无芯光纤干涉仪溶液浓度传感特性的理论和实验研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(9): 1651—1655.
- 13 L Martinez, F Cecelja, R Rakowski. A novel magneto-optic ferrofluid material for sensor applications[J]. *Sens Actuators A*, 2005, 123-124: 438—443.
- 14 R Gao, Y Jiang. Magnetic fluid-filled microhole in the collapsed region of a photonic crystal fiber for the measurement of a magnetic field[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(16): 3181—3184.
- 15 P Zu, C C Chan, W S Lew, *et al.*. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon J*, 2012, 4(2): 491—498.
- 16 Y Miao, K Zhang, B Liu, *et al.*. Ferrofluid-infiltrated microstructured optical fiber long-period grating [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(3): 306—309.
- 17 M Deng, X Sun, M Han, *et al.*. Compact magnetic-field sensor based on optical microfiber Michelson interferometer and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 734—741.
- 18 H Wang, S Pu, N Wang, *et al.*. Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(19): 3765—3768.
- 19 Y Chen, Q Han, T Liu, *et al.*. Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode-multimode-single-mode structure and magnetic fluid[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(20): 3999—4001.
- 20 M Konstantaki, A Candiani, S Pissadakis. Optical fibre long period grating spectral actuators utilizing ferrofluids as outcladding overlayers[J]. *J Eur Opt Soc Rapid Publ*, 2011, 6: 11007.
- 21 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang, *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0205001.  
孙浩, 忽满利, 乔学光, 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0205001.
- 22 M Saito, N Matsumoto, J Nishimura. Measurement of the complex refractive-index spectrum for birefringent and absorptive liquids[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(22): 5169—5175.
- 23 Zhang Yanjun, Xu Huabin, Xie Xiaopeng, *et al.*. Tunable liquid-core optical filter based on multimode interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0206005.  
张燕君, 徐华斌, 谢晓鹏, 等. 基于多模干涉液芯可调谐滤波器[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0206005.
- 24 B D Gupta, H Dodeja, A K Tomar. Fibre-optic evanescent field absorption sensor based on a U-shaped probe [J]. *Opt & Quantum Electron*, 1996, 28(11): 1629—1639.
- 25 W S Mohammed, P W E Smith, X Gu. All-fiber multimode interference bandpass filter[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(17): 2547—2549.
- 26 Gu Wanyi, Li Guorui. *Optical Fiber Communication System* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003. 23—50.  
顾皖仪, 李国瑞. *光纤通信系统*[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003. 23—50.
- 27 S Y Yang, Y F Chen, H E Horng, *et al.*. Magnetically-modulated refractive index of magnetic fluid films[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(26): 4931—4933.
- 28 S Y Yang, H E Horng, C Y Hong, *et al.*. Control method for the tunable ordered structures in magnetic fluid microstrips[J]. *J Appl Phys*, 2003, 93(6): 3457—3460.
- 29 A Dutt, S K Varshney, S Mahapatra. Design of tunable couplers using magnetic fluid filled three-core optical fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(3): 164—166.

栏目编辑: 王晓琪