

用于全光纤电流传感器的扭转高双折射光纤设计

王英利¹, 康梦华^{1,2}, 任立勇¹, 任凯利^{1,2}

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 传感光纤中的残余线性双折射、温度和振动敏感性严重影响着 Sagnac 式全光纤电流传感器的精度。设计了一种可用于全光纤电流传感器的扭转高双折射光纤, 该光纤由两端变速率扭转部分和中间匀速率扭转部分组成。其中, 变速扭转部分能实现线偏振光和圆偏振光之间的相互转化, 具有 $\lambda/4$ 波片功能; 匀速率扭转部分, 具有较小的光纤固有线性双折射和圆保偏功能, 从而可更为精确地感应法拉第效应。将这种扭转高双折射光纤绕制成特殊结构传感光纤环, 解决了 Sagnac 效应以及电流导体位置对全光纤电流传感器测量结果的影响。理论上建立了扭转高双折射光纤的耦合模方程, 模拟了线偏振光入射该光纤时光波偏振状态演化情况。在此基础上设计一种新型的抗振型 Sagnac 式电流传感器。

关键词: 扭高双折射光纤; 光纤设计; 光纤电流传感器; Sagnac 效应

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0170-06

Design of spun high-birefringent fiber for fiber optic current sensor

Wang Yingli¹, Kang Menghua^{1,2}, Ren Liyong^{1,2}, Ren Kaili^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The residual linear birefringent of sensing fiber, temperature and vibration sensitivity severely influence the accuracy of Sagnac fiber optic current sensor (S-FOCS). A sensing fiber can be used in FOCS with spun high birefringent fiber (S Hi-Bi fiber) was designed. This S Hi-Bi fiber includes three sections: two terminal sections with variable spin-rate along fiber were utilized to substitute the fiber quarter-wave plates, respectively converting the light polarization state from the linear one to the circle one, and vice versa; and the middle section with a uniform spin-rate was utilized as the current sensing fiber which maintains the circular polarization state and compress the residual linear birefringent during the light propagation. In addition, the sensing fiber was wound into a special geometric structure so that the Sagnac phase shift was inherently eliminated and the sensing result did not depend on the position of the current conductor. In theory, used the coupled-mode theory the evolution of the light polarization state was simulated when linear polarization states light incident into the sensing fiber. A novel Sagnac fiber

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51207159, 61275149); 陕西省自然科学基金(2014JM8327); 中国科学院院长优秀奖获得者启动金项目; 中国博士后科学基金特别基金(200902600)

作者简介: 王英利(1973-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤光学及光纤传感器方面的研究。Email: wangyl@opt.ac.cn

optic current sensor with vibration insensitivity based on this spun high birefringent fibers was proposed.

Key words: spun high-birefringent (S Hi-Bi) fiber; fiber design; fiber optic current sensor; Sagnac effect

0 引言

全光纤电流传感器(FOCS)具有体积小、重量轻、无磁饱和效应、绝缘成本低、安全性好及动态范围大等优点,将在高电压等级智能电网中取代传统电磁式电流传感器成为电网监测的最主要手段之一。FOCS 是基于法拉第效应,通过测量电流导体周围磁场引起绕制在其周围的光纤中传输的左旋和右旋圆偏振光传输速度改变导致相位差而实现电流强度的探测。因此,引起光纤中传输的两束光之间非互易性相位差的其他因素就成为 FOCS 的误差来源。其中,传感光纤中残余线性双折射、振动^[1],温度变化^[2], $\lambda/4$ 波片的不完备性及温度敏感性^[3]、 $\lambda/4$ 波片与保偏光纤对轴误差引起的偏振误差^[4]严重影响着 FOCS 的精度,成为阻碍 FOCS 实用化的主要限制因素^[5]。

研究人员提出了退火光纤^[6]、结构螺旋光纤^[7]、扭光纤^[8]等多种方案解决光纤残余线性双折射问题。将传感光纤圈退火的方法可有效消除弯曲产生的线性双折射,然而退火光纤易碎;结构螺旋光纤是沿轴向扭转已制好的传感光纤,引入大量的圆双折射来抑制线性双折射;扭光纤是在光纤制造过程中轴向旋转预制棒,大大地减小光纤不对称性,降低固有双折射,但其对温度和弯曲较为敏感。

Bohnert 用椭圆芯保偏光纤制作 $\lambda/4$ 波片,具有较好的温度性能。王夏霄提出在制作光纤 $\lambda/4$ 波片时选择合适的初始相位延迟角,使温度变化时 $\lambda/4$ 波片的误差与材料费尔德常数引起的测量误差正好相反,从而达到相互补偿的目的。

Huang H C 在 1997 年提出扭转加热至熔融状态的高双折射光纤,变速率扭转部分可实现偏振光的转换功能(线偏振光转化为圆偏振光),制成偏振态转换器(AFPT)^[9];匀速率扭转部分可实现圆保偏功能^[10]。随后,Rose 等发现其扭转高双折射光纤具有良好的温度性能^[11]。由扭转高双折射光纤(S Hi-Bi)制成的偏振态转换器,其一端为线保偏光纤,可解决了 $\lambda/4$ 波片与线保偏光纤耦合的对轴问题;由其制

作的圆保偏光纤作为传感光纤能消除线性双折射对 FOCS 测量结果的影响。另外,该光纤具有良好的温度性能。因此,将 SHi-Bi 光纤应用于 FOCS 中,有望解决 FOCS 上述的问题。

文中设计了一种扭转高双折射光纤(熊猫光纤),用耦合模理论分析了光波在该光纤中传输时不同位置偏振状态,利用数值计算分析了光纤正交模式间功率耦合和偏振态演化情况。将这种扭光纤作为传感光纤绕制成振动不敏感的传感环,得到一种抗振型 Sagnac 式 FOCS。

1 用于 FOCS 的扭转高双折射光纤设计

笔者所设计的 S Hi-Bi 光纤是右手螺旋扭转熔融状态下的高双折射光纤(熊猫光纤)得到的。该光纤可作为 FOCS 的传感光纤:其变速率扭转部分可实现偏振态转换器功能,可取代 FOCS 中的光纤 $\lambda/4$ 波片,匀速率扭转部分具有圆保偏功能,可精确的感应法拉第效应。

对于变速率 S Hi-Bi 光纤,扭转速率与位置之间的函数有线性函数、指数函数和 \cos 函数。其中采用线性函数,要获得性能优良的 S Hi-Bi 需要较长的光纤长度和较大的扭转速率,不易实现;采用指数函数,对电动转台性能提出了极高地要求。因此,多数研究者均常用 \cos 函数形式^[9,11],这里也采用 \cos 函数。

设计的 S Hi-Bi 光纤结构如图 1 所示按扭转速率将光纤分为三段: L_1 开始扭转段; L_2 是匀速扭转段; L_3 降速扭转段。

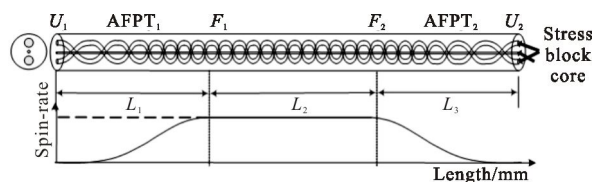


图 1 扭转高双折射光纤结构示意图

Fig.1 Geometric structure of spun high-birefringence fiber

(1) 升速扭转段,变速率扭转部分,图 1 中

AFPT₁ 部分, 起始端 U_1 处旋扭率为 0; 终止端为 F_1 处旋扭率为 τ_{\max} 。光纤旋扭率按照公式(1)缓慢由零变到最大, 该部分可看成 AFPT₁。其旋扭率与位置关系如下:

$$\tau_1(z) = \tau_{\max} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi z}{L_1} \right) \right] \quad (0 \leq z < L_1) \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 为扭光纤的最大扭转速率, $\tau_{\max} \gg \delta\beta$ ($\delta\beta$ 为未旋扭状态下, 光纤固有线性双折射); z 为光纤位置; L 为光纤总长度, $L=L_1+L_2+L_3$ 。

(2) 匀速扭转段, 匀速率扭转部分, 见图 1 中 F_1F_2 部分。光纤旋扭率保持公式(2)不变, 如:

$$\tau_2(z) = \tau_{\max} (L_1 \leq z \leq L_1+L_2) \quad (2)$$

(3) 降速扭转段, 为变速率扭转部分, 如图 1 中 AFPT₂ 部分。其起始端为 F_2 , 光纤旋扭率为 τ_{\max} , 终止端为 U_2 , 旋扭率为 0。光纤旋扭率按照公式(3)缓慢由最大变到零, 该部分可看成 AFPT₂。

$$\tau_3(z) = \tau_{\max} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi(z-(L_1+L_2))}{L_3} \right) \right] \quad (L_1+L_2 < z \leq L) \quad (3)$$

式中: 升速扭转段 L_1 和降速扭转段 L_3 均为变速率扭转部分, 结构对称、长度相等与匀速扭转段长度之间满足: $L_1=L_3 \ll L_2$ 。

2 扭转高双折射光纤耦合模理论

对 S Hi-Bi 光纤来说, 当光纤旋扭率缓慢变化时, 光纤中两个正交的本征模式之间的耦合系数与光纤旋扭率有关, 两本征模之间的耦合过程可用耦合模方程来描述^[12], 如下:

$$\begin{aligned} \frac{dA_x}{dz} &= j \frac{\delta\beta}{2} A_x + \tau(z) A_y \\ \frac{dA_y}{dz} &= -\tau(z) A_x - j \frac{\delta\beta}{2} A_y \end{aligned} \quad (4)$$

$$\delta\beta = \beta_y - \beta_x = \frac{2\pi(n_y - n_x)}{\lambda} = \frac{2\pi}{L_b} \quad (5)$$

式中: $A_x(z)$ 、 $A_y(z)$ 为光纤的两个本征模; $\delta\beta$ 为未旋扭状态下, 光纤固有线性双折射; β_x 、 β_y 分别是两个本征模的传播常数; L_b 表示高双折射光纤未扭转时的拍长; $\tau(z)$ 为旋扭率。

为了求解光纤的本征模, 在这里引入扭转光纤的简正模 $W_x(z)$ 和 $W_y(z)$, 光纤本征模和简正模满足:

$$\begin{aligned} A_x(z) &= \cos[\varphi(z)] W_x(z) + j \sin[\varphi(z)] W_y(z) \\ A_y(z) &= j \sin[\varphi(z)] W_x(z) + \cos[\varphi(z)] W_y(z) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\varphi(z) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\tau(z)}{\delta\beta} \right) \quad (7)$$

式中: $\varphi(z)$ 与 $\tau(z)$ 及位置有关。在 U_1 和 U_2 处位置, $\varphi(z) \approx 0^\circ$, $\tau_{\max} \gg \delta\beta$, 因此在扭光纤 F_1 和 F_2 位置处 $\varphi(z) \approx 45^\circ$ 。

使用对角化方法^[12], 光纤的简正模可表示为(对于变速率扭光纤, 当旋扭率缓慢变化 $\left(\frac{d\tau}{dz} \rightarrow 0 \right)$ 时, 采用零阶近似):

$$\begin{aligned} W_x(z) &= W_x(0) \exp[j\rho(z)] \\ W_y(z) &= W_y(0) \exp[-j\rho(z)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\rho(z) = \int_{z_1}^{z_2} \pi \left[1 + \left(\frac{2\tau(z)}{\delta\beta} \right)^2 \right]^{1/2} dz \quad (9)$$

从公式(8)根据入射初值可以得到位置 z 处扭光纤的简正模。其中, $\rho(z)$ 为扭光纤不同部分的结构参数, 与旋扭率 $\tau(z)$ 及位置有关。根据公式(1)~(3), 扭光纤三部分末端处的 $\rho(z)$ 分别为:

$$\rho_1 = \int_0^{L_1} \pi \left[1 + \left(\frac{2\tau(z)}{\delta\beta} \right)^2 \right]^{1/2} dz \quad (10)$$

$$\rho_2 = \int_{L_1}^{L_1+L_2} \pi \left[1 + \left(\frac{2\tau(z)}{\delta\beta} \right)^2 \right]^{1/2} dz \quad (11)$$

$$\rho_3 = \int_{L_1+L_2}^L \pi \left[1 + \left(\frac{2\tau(z)}{\delta\beta} \right)^2 \right]^{1/2} dz \quad (12)$$

将公式(10)~(12)代入公式(8)分别得到扭光纤三段的输出简正模的表达式。在未扭转状态下, 满足 $W_x(0)=A_x(0)$ 和 $W_y(0)=A_y(0)$ 。扭光纤前部分的输出是后部分的输入, 因此在给定初始输入光简正模的条件下, 即可得到扭光纤各处的简正模 $W_x(z)$ 和 $W_y(z)$ 。再根据公式(6)就可得到扭光纤位置的本征模 $A_x(z)$ 和 $A_y(z)$ 。

3 扭转高双折射光纤中光波偏振状态分析

根据以上理论, 已知入射光波偏振状态就可定性分析光波在扭光纤不同位置处偏振状态。当入射光为 x -轴线偏振光时, 假设坐标系 x 轴和 y 轴分别与光纤双折射的慢轴和快轴重合, 扭光纤不同位置处光纤简正模和本征模的琼斯矩阵如表 1。

表 1 中的指数项是由于光纤扭转引起的 berry phase^[13]。可以看出, 当 x -轴线偏振光入射扭光纤时, 经过升速扭转段, 在 F_1 处得到圆偏振光; 在匀速扭转段, 保持圆偏振光直到 F_2 处; 在降速扭转段出射

端 U_2 处得到 x -轴线偏振光。

表 1 x -轴线偏振光入射时, 光纤不同位置的琼斯矩阵

Tab.1 Jones matrix of the sensing fiber when the x -axis linear-polarized light is launched into it

Position	$W(z)$ normal modes	$A(z)$ local modes
U_1	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
F_1	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \exp(j\rho_1)$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \exp(j\rho_1)$
F_2	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \exp(j(\rho_1+\rho_2))$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \exp(j(\rho_1+\rho_2))$
U_2	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \exp(j(\rho_1+\rho_2+\rho_3))$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \exp(j(\rho_1+\rho_2+\rho_3))$

4 扭转高双折射光纤中光功率耦合情况

利用 matlab 对公式(4)进行数值求解。当 $\frac{\tau_{\max}}{\delta\beta}$ 在 10~100 之间取值时, AFPT 能够实现偏振转化功能^[9,12], 因此, 在模拟计算时取 $\frac{\tau_{\max}}{\delta\beta}=18^\circ$ 。数值模拟计算中采用的参数分别为: 高双折射光纤的拍长 $L_b=2.5$ mm; $\tau_{\max}=45$ rad/mm, $L_1=L_3=100$ mm, $L_2=800$ mm。光纤中两个本征模(A_x 和 A_y)的功率分别为表示为 $P_x=|A_x|^2$ 和 $P_y=|A_y|^2$ 。图 2 计算了 x 轴线偏振光入射 S Hi-Bi 光纤

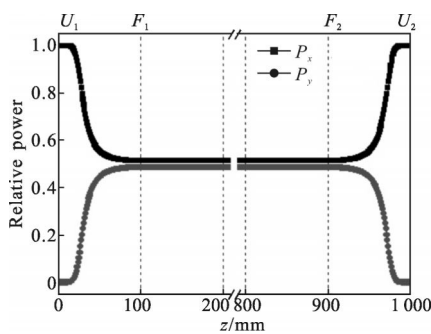


图 2 x 轴线偏振光入射 S Hi-Bi 光纤时, P_x 和 P_y 沿光纤长度方向功率演化情况

Fig.2 Power evolution of the P_x and P_y in the fiber along the length when x -axis linearly light is launched at the S Hi-Bi fiber

时, 两个本征模功率的变化情况。在模拟计算中, 为了计算简单, 将入射光功率进行了归一化。在 S Hi-

Bi 光纤的 L_1 部分(U_1F_1): 当 x 轴线偏振光入射到 U_1 端时, 在光波传输过程中 A_x 模的光功率逐渐耦合到 A_y 模。 A_x 模功率逐渐减小, A_y 模的光功率逐渐增大。当光波到达 F_1 端时, 两个正交线偏振模式 P_x, P_y 功率相等($P_x \approx P_y \approx 0.5$), 光波转化为圆偏振光(表 1 中的 $A(F_1)$ 位置), 与 Huang 等人的结果一致^[9]。

在 S Hi-Bi 光纤的 L_2 部分 (F_1F_2): x 轴和 y 轴之间不存在功率耦合, 即 P_x, P_y 功率保持不变 ($P_x \approx P_y \approx 0.5$), 光纤两个模式之间不存在耦合现象, 光波保持圆偏振光直到 F_2 端(表 1 中的 $A(F_2)$ 位置)。

在 S Hi-Bi 光纤的 L_3 部分(F_2U_2): 在光波传输过程中 A_y 模的光功率逐渐耦合到 A_x 模。 A_y 模功率逐渐减小, A_x 模的光功率逐渐增大。当光波到达 U_2 端时, 光功率完全转化到 x 轴($P_x=1, P_y=0$)。在 U_2 端, 光波转化为 x 线偏振光(表 1 中的 $A(U_2)$ 位置)。

同样地, 当 y 线偏振光入射该 S Hi-Bi 光纤时光波偏振状态的演化情况与前者类似。即在升速扭转段, 光波偏振状态由线偏振光变为圆偏振光, 在匀速扭转段保持圆偏振状态, 在降速扭转段由圆偏振光变为线偏振光。而且由于该 S Hi-Bi 光纤变速率扭转部分 AFPT₁ 和 AFPT₂ 长度相等, 结构对称。因此, 光波分别从这两者任意一端入射 S Hi-Bi 光纤时光波偏振状态演化情况相同。

从理论模拟结果和定性分析结果可以看出, 图 1 所设计的 S Hi-Bi 光纤, 在升速扭转段(L_1)可将线偏振光转化为圆偏振光; 匀速扭转段(L_2)具有圆保偏功能; 在降速扭转段(L_3)将圆偏振光转化为线偏振光。因此, S Hi-Bi 光纤的变速率扭转部分, 可实现光纤 $\lambda/4$ 波片的功能, 而且由于其天然和线保偏光纤相连, 比传统的 $\lambda/4$ 波片减少了一个熔接点, 可避免熔接角度不准确带来的光信号损耗和光偏振质量下降; 匀速扭转部分作为传感光纤具有圆保偏功能, 光纤中两个模式之间不存在耦合现象, 可消除光纤中残余线性双折射带来的测量误差, 而且其具有良好的温度性能和抗弯曲性能^[11-12]可解决传感光纤存在的残余线性双折射、温度特性差和绕制重复性差等问题。

5 振动和导体位置不敏感的 FOCS 传感光纤环设计

扭转光纤的费尔德系数与扭转光纤的旋扭率成

正比^[14]。因此,该 S Hi-Bi 光纤作为 FOCS 传感光纤带来一个较为麻烦的问题是:由于该光纤各处扭转速率不同,从而费尔德系数不同。如果直接将其绕制成光纤环,电流导体位于光纤环不同位置处 FOCS 测量结果不同。这样严重影响其工程化应用。同时对于 Sagnac 式 FOCS, 还需解决 Sagnac 效应对测量结果的影响。

为了解决以上的问题,设计了一种特殊的传感光纤环绕制方法,如图 3 所示。传感光纤环由光纤围成面积相同 I、II 两部分组成,形成“8”字型平面结构。光纤环绕制方法如下所述:将该扭转光纤沿着线圈骨架先向右顺时针绕制光纤环 I,然后向左逆时针绕制光纤环 II,再向右顺时针绕制光纤环 I,再向左逆时针绕制光纤环 II。最后形成匝数相同、光纤环直径相同、面积相等的 I、II 两部分。在绕制光纤环 I 过程中,使 S Hi-Bi 光纤的 AFPT₁ 和 AFPT₂ 反向重叠,即 U₁ 和 F₂ 在线圈骨架上重合;F₁ 和 U₂ 在线圈骨架上重合,如图 4 中的 U₁(F₂)-F₁(U₂)部分(图中浅色部分)。在传感电流时,传感光纤环 I、II 两部分相互垂直,均与电流导体夹角为 45°。

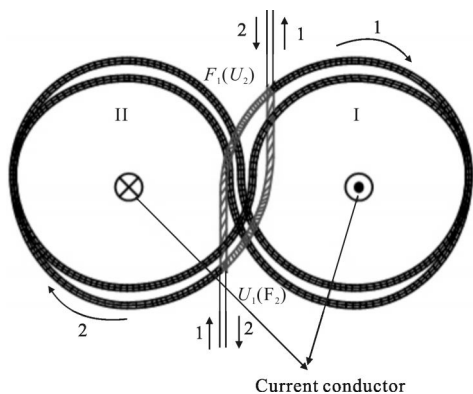


图 3 扭转高双折射光纤 FOCS 传感光纤环平面结构

Fig.3 Geometric winding structure of sensing fiber coils based on spun Hi-Bi fiber

假定该光纤扭转率与费尔德系数之间的比例系数为 K 。由图 3 可以看出,该传感光纤环的部分 II 是匀速扭转的 S Hi-Bi 光纤绕制的,因此,该部分各处的费尔德系数相同, $V(z)=K\tau_{\max}$ 。

对于部分 I (图中的浅色部分), AFPT₁ 和 AFPT₂ 反向重叠即最大扭转速率部分分别与扭转速率为零的部分重叠 U₁ 和 F₂, F₁ 和 U₂ 重叠。例如 AFPT_{1z} 处与 AFPT_{2z=L₁+L₂} 处重合。该处浅色部分的费尔德常

数为:

$$V(z)+V(z+(L_1+L_2))=K\tau_{\max}\left[\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos\left(\frac{\pi z}{L_1}\right)\right]+K\tau_{\max}\left[\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos\left(\frac{\pi(z+(L_1+L_2)-(L_1+L_2))}{L_3}\right)\right]=K\tau_{\max}$$

$$0\leq z<L_1 \quad (13)$$

因此,采用这样的绕制方法制作的传感光纤环各处的费尔德系数相同,解决了扭转光纤用作传感光纤时 FOCS 测量结果受电流导体位置影响的问题。

此外,这种传感光纤环的绕制方法还能消除振动引起 Sagnac 相位差。图 3 中传感光纤环 I、II 部分 Sagnac 相位差分别为:

$$\phi_1=\frac{8N\pi S_1}{\lambda c}\Omega_1(\text{I 部分}) \quad (14)$$

$$\phi_2=\frac{8N\pi S_2}{\lambda c}\Omega_2(\text{II 部分}) \quad (15)$$

式中: ϕ 表示 Sagnac 效应引起的相位差; L 、 λ 、 c 、 N 、分别表示光纤长度、光源波长、真空中光速、光纤环匝数; Ω_1 、 Ω_2 和 S_1 、 S_2 分别光纤环 I、II 的旋转角速度以及光纤环 I、II 所围成的面积。

从图 3 可看出,光波在传感光纤环的光纤环 I、II 部分传输时方向相反:一个为顺时针传播绕制;另一个为逆时针传播。由外界振动引起光纤环转动的角速度大小相等,方向相反,即 $\Omega_2=-\Omega_1$ 。而且光纤环两个部分所围成的面积相等, $S_1=S_2$ 。因此,这两部分 Sagnac 效应引起的相位差大小相等,符号相反,即 $\phi_2=-\phi_1$ 。因此,这样的传感光纤环绕制方法可完全消除 Sagnac 效应引起的相位误差。

6 新型 Sagnac 式 FOCS 方案

设计的基于 S Hi-Bi 光纤的一种新型 Sagnac 式 FOCS 方案,如图 4 所示。光源发出的光波经光纤 50:50 耦合器后分为两束光,其中一端 4 为废弃端,另一端 3 与 Y 波导多功能集成光学器件耦合。Y 波导实现起偏、分光和相位调制的功能。经 Y 波导分束后的两束光波分别耦合进入 S Hi-Bi 光纤 AFPT₁ 的 U₁ 端和 AFPT₂ 的 U₂ 端。S Hi-Bi 光纤的 AFPT₁ 和 AFPT₂ 部分将两束偏振光转化为圆偏振光。在 S Hi-Bi 光纤匀速扭转部分(F₁F₂),圆偏振光偏振态保持。在传感光纤环中两束光波相向传播,两束光传输方向与电流导体周围磁场方向不同,产生法拉第非互易性相位差。光纤环 I、II 两部分中电流形成的磁场

方向相反使法拉第效应引起两束光的相位差加倍。带有法拉第相位差的两束光分别经过 AFPT₂ 的 U_2 端和 AFPT₁ 的 U_1 端, 同圆偏振光转化为同线偏振光。然后在 Y 波导处相遇发生干涉, 干涉信号经光纤耦合器 2 端口返回到光电探测器中。通过信号处理部分得到两束光波之间的相位差, 从而测量出导体中的电流值。

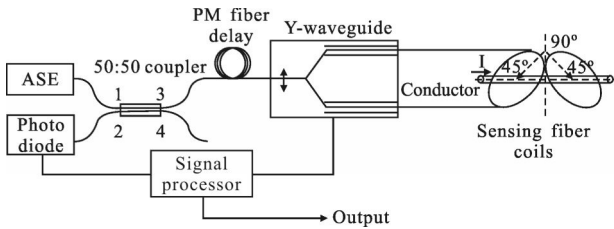


图 4 基于扭转高双折射光纤的新型 Sagnac 式 FOCS 方案

Fig.4 A new scheme of Sagnac FOCS based on the spun Hi-Bi fiber

7 结论

文中设计了一种 S Hi-Bi 光纤, 分析了线偏振光在其中偏振态演化过程, 对其用于 FOCS 的可能性进行了分析。设计一种 FOCS 传感环, 解决了 S Hi-Bi 光纤应用于 FOCS 存在的问题。由于 S Hi-Bi 光纤本身具有良好的温度性能和弯曲不敏感, 该研究为抗振型、温度、弯曲不敏感的 Sagnac 式 FOCS 提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] Wüest R, Frank A, Wiesendanger S, et al. Influence of residual fiber birefringence and temperature on the high-current performance of an interferometric fiber-optic current sensor[C]//SPIE, 2009, 7356: 73560K.
- [2] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, et al. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 267-276.
- [3] Short S, Tselikov A, Arruda J, et al. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(7): 1212-1219.
- [4] Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang, et al. Study of polarization errors of all fiber optical current transformers [J]. *Acta Photonica Sin*, 2007, 36 (2): 320-323. (in Chinese)
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 全光纤电流互感器的偏振误差研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(2): 320-323.
- [5] Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang, et al. Research on temperature characteristic of quarter-waveplate and its effect on fiber optical current transformers[J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(7): 596-598. (in Chinese)
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片温度特性及其影响研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(7): 596-598.
- [6] Tang D, Rose A H, Day G W, et al. Annealing of linear birefringence in single-mode fiber coils: Applications to optical fiber current sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(8): 1031-1037.
- [7] Ulrich R, Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(13): 2241-2251.
- [8] Zhang C, Li C, Wang X, et al. Design principle for sensing coil of fiber-optic current sensor based on geometric rotation effect[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(18): 3977-3988.
- [9] Huang H C. Fiber-optic analogs of bulk-optic wave plates [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(18): 4241-4258.
- [10] Huang H C. Practical circular-polarization-maintaining optical fiber[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(27): 6968-6975.
- [11] Rose A H, Feat N, Etzel S M. Wavelength and temperature performance of polarization-transforming fiber [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(34): 6897-6904.
- [12] Huang H C. Microwave approach to highly irregular fiber optics[D]. New York: Wiley Interscience Publication, 1998, 7: 198-295.
- [13] Berry M V. Interpreting the anholonomy of coiled light[D]. Britanin: Nature 1987, 326: 277-278.
- [14] Wang Jiaxin, Yao Shouquan. Interference method for measuring Verdet coefficient of twisted fiber rings [J]. *J Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2007, 13(2): 121-124. (in Chinese)
王加新, 姚寿铨. 扭转光纤环 Verdet 系数的干涉法测量[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2007, 13(2): 121-124.