

## 空芯光子晶体光纤磁敏感性研究

李彦, 孙彦凤, 宋镜明, 姜漫

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 空芯光子晶体光纤是一种新型的陀螺用光纤, 较传统光纤具有良好的抗磁性, 光纤的磁敏感性是由光纤的 Verdet 常数来表征的。为研究空芯光子晶体光纤的磁敏感性, 利用 Comsol 软件对 HC-1550-2 空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数进行仿真计算, 选用含有法拉第旋转反射镜(FRM)的反射式双光路测量方案对空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数进行实验测量。双光路测量系统中的 FRM 可以消除被测光纤中线性双折射对测量的影响。仿真与测量结果相吻合, 且由结果可知空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数约为传统光纤的 1/100 倍, 验证了空芯光子晶体光纤在陀螺降低磁敏感性方面的优势。

**关键词:** 磁敏感性; 空芯光子晶体光纤; Verdet 常数; Faraday 效应

**中图分类号:** O4-34    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4051-05

## Magnetic-field sensitivity of air-core photonic crystal fiber

Li Yan, Sun Yanfeng, Song Jingming, Jiang Man

(School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Air-core photonic crystal fiber is a new optical fiber used in fiber-optic gyroscope, which has better diamagnetic than traditional optical fiber. Magnetic-field sensitivity of the fiber is characterized by the Verdet constant of the fiber. In order to study the magnetic-field sensitivity of air-core photonic crystal fiber, Comsol software was used to simulate the Verdet constant of HC-1550-2 air-core photonic crystal fiber in this paper. At the same time, a dual-optical system including a Faraday Rotation Mirror (FRM) was chosen to measure the air-core photonic crystal fiber's Verdet constant. In the system, the FRM can eliminate the influence of the linear birefringence in the tested fiber on measurement. The measured results are in agreement with the simulation results. It can be seen from the results, Verdet constant of air-core photonic crystal fiber is nearly 1/100 of the traditional optical fiber, which verifies that air-core photonic crystal fiber has the advantages on decreasing the magnetic-field sensitivity.

**Key words:** magnetic-field sensitivity; air-core photonic crystal fiber; Verdet constant; Faraday effect

收稿日期: 2014-04-10; 修订日期: 2014-05-15

作者简介: 李彦(1975-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光纤陀螺方面的研究。Email: li\_yan@buaa.edu.cn

## 0 引言

空心光子晶体光纤由周期分布的空气孔所形成的包层和空芯组成,基于光子带隙机理将光子限制在空芯内传输<sup>[1]</sup>,其带隙结构可以有效降低克尔效应、法拉第效应、瑞利散射和热效应等对传输光的影响,这使其成为光纤陀螺中新型传感光纤的选择。

光纤的磁敏感性是由 Verdet 常数来表征的,为了证明空芯光子晶体光纤较普通光纤具有更好的抗磁性,文中通过对空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数进行理论仿真与实验测量来研究其磁敏感性。运用 Comsol 软件对被测的空芯光子晶体光纤进行了建模仿真,对其传输的基模进行能量积分计算,根据相关理论求得被测光纤 Verdet 常数的理论值范围;在单模光纤 Verdet 常数测量方面,目前已经有很多报道<sup>[2-6]</sup>,斯坦福大学的论文主要是对单模光纤与空芯光子晶体光纤进行了测量<sup>[7]</sup>,而斯坦福大学的测量方法存在线性双折射的影响。光纤的线性双折射是通过测量光纤的拍长来得到的,但是对于非理想的单模光纤而言,其拍长随外界温度、压力等因素是随机变化的,造成偏振衰落问题存在。文中提出基于法拉第旋转反射镜(FRM)的测量系统,其中的 FRM 可以消除被测光纤中线性双折射对测量的影响,从而可以有效消除测量过程中偏振衰落造成的测量误差,使测量结果更加准确。

## 1 法拉第效应理论

光纤 Verdet 常数的测量主要基于法拉第磁光效应。一束线偏振光沿磁化方向或外加磁场方向通过介质时偏振面发生旋转的现象成为法拉第效应。法拉第效应的旋转角度与外加磁场强度  $B$  成正比,与光线在介质中穿过的距离成正比<sup>[8]</sup>:

一束双折射可忽略的线偏振光在磁场  $B$  中传播,其偏振面会发生旋转。旋转角  $\phi$  满足公式:

$$\phi = VBL \quad (1)$$

式中: $V$  为被测光纤的 Verdet 常数; $B$  为外加磁场强度; $\phi$  为光经过磁场后的旋转角。且对于给定的每一种旋光物质,法拉第旋转方向与光的传播方向无关,仅由磁场  $B$  的方向决定,如图 1 所示,在磁场方向不变的情况下,光线往返穿过光纤时,法拉第旋转将加倍。

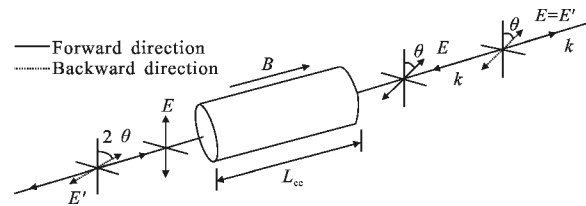


图 1 法拉第磁光效应示意图

Fig.1 Schematic diagram of Faraday effect

## 2 空芯光子晶体 Verdet 常数仿真计算

### 2.1 仿真实论

利用有限元软件 Comsol 对空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数进行仿真计算,Comsol 软件是一款大型的有限元高级数值仿真软件,由瑞典的 COMSOL 公司开发,广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算中。

空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数可表示为:

$$V_{\text{HC-PCF}} = \eta V_{\text{silica}} + (1 - \eta) V_{\text{air}} \quad (2)$$

式中: $\eta$  为空心光子晶体光纤中基模传输在硅中传播的能量百分比。空气中的 Verdet 常数很弱,所以上式可以表示为:

$$V_{\text{HC-PCF}} = \eta V_{\text{silica}} \quad (3)$$

$\eta$  可以通过有限元分析 Comsol 软件中射频 (RF) 模块的模式分析仿真得到,具体为令偏振光基模在光纤中传输,通过特征频率求解器得到输出端的多个特征频率,找到对应基模解的折射率作为有效折射率  $n_{\text{eff}}$ ,然后利用 Comsol 软件的积分计算功能对基模传输情况下的总能量与在硅中传输的能量进行积分,得到  $\eta$  值。 $V_{\text{silica}}$  可以用所报道的单模光纤的 Verdet 常数  $0.52 \sim 0.6 \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  来计算。从而可以得到空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数测量值。

### 2.2 仿真参数与结构

文中主要是对 NKT 公司的 HC-1550-2 空芯光子晶体光纤进行 Verdet 常数测量,其厂家结构参数如表 1 所示。

表 1 HC-1550-2 结构参数

Tab.1 Structural parameters of HC-1550-2	
Parameter	HC-1550-2/ $\mu\text{m}$
Core diameter	9.2
Pitch	3.8
Diameter of holey region	70
Small hole diameter	2.15
Cladding diameter	120
Coating diameter	220

利用 Comsol 软件对空芯光子晶体光纤进行了模型建立,几何结构如图 2 所示。

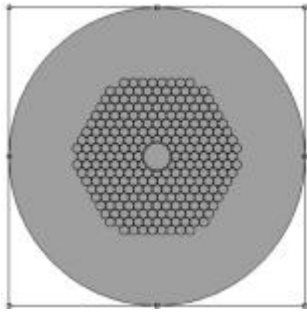


图 2 HC-1550-2 几何仿真图  
Fig.2 Geometric simulation diagram of HC-1550-2

### 2.3 仿真结果

对几何结构设定好材料参数、边界条件,然后对模型进行稳态分析,利用 Comsol 中的特征频率求解器求解其能够传输的特征频率,从中找到基模传输所对应的频率。最终计算得到该空芯光子晶体光纤的有效折射率 $n_{eff}$ 为 0.995 116,基模传输图如图 3 所示。

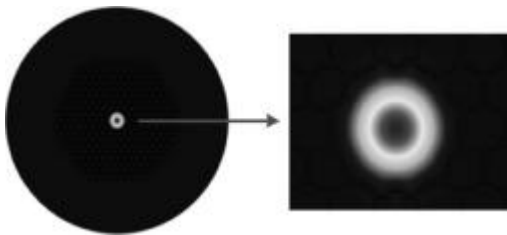


图 3 仿真结果 2D 图  
Fig.3 2D diagram of simulation results

仿真结果 3D 图如图 4 所示,更加清晰地表现了仿真稳态传输中基模传输的高斯能量分布。

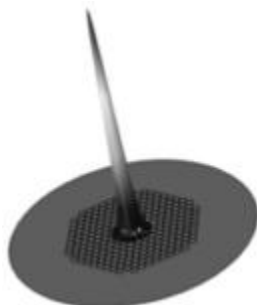


图 4 仿真能量分布示意图  
Fig.4 Simulation of energy distribution diagram

利用 Comsol 后处理功能对空芯光子晶体光纤中心传输的能量与整个光纤中能量分别进行积分计

算,得到硅中传播的能量百分比  $\eta$ 。计算结果为: Silica 中的能量为 6.098 84,总能量为 543.375 93,则  $\eta=6.098 84/543.375 93=1.122\%$ ,将  $\eta$  值代入到公式(3)中得到:

$$V_{HC-PCF} = \eta V_{silica} = (5.83 \sim 6.73) \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m}) \quad (4)$$

根据以上仿真可以得到空芯光子晶体光纤 Verdet 常数的仿真范围值,为测量结果提供了依据。

## 3 空芯光子晶体光纤 Verdet 常数测量

### 3.1 测量系统

基于法拉第效应原理,在文中采用含有 FRM 的双光路系统对空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数进行测量<sup>[9]</sup>。系统结构如图 5 所示。

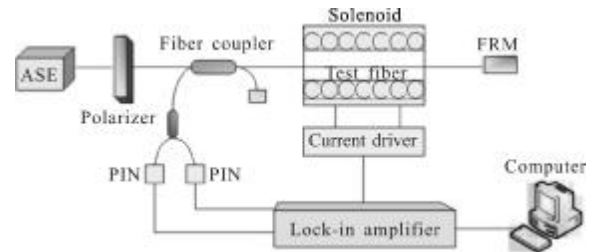


图 5 系统结构图  
Fig.5 Schematic diagram of the system including a FRM

光源(ASE)光束经起偏器 $45^\circ$ 角起偏后成为线偏振光,经光纤耦合器后进入到被测光纤中传输,被测光纤受到沿光纤轴向的磁场作用,由于法拉第效应,线偏振光的偏振方向会发生一定角度的旋转,由 FRM 反射再次经过磁场,偏振光会发生相同方向的角度旋转,即使旋转角加倍。最后经偏振分束器(PBS)分成振动方向相互垂直的两束线偏振光  $E_p$  与  $E_s$  后进行“差除和”的信号处理。

考虑到被测光纤中性线双折射的存在,设线性双折射造成的相位延迟为  $\delta$ ,则被测光纤正向传输琼斯矩阵<sup>[9]</sup>可以表示为:

$$F_1' = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= \cos(\psi/2) + i\cos(x)\sin(\psi/2) \\ B &= \sin(x)\sin(\psi/2) \\ (\psi/2)^2 &= (\delta/2)^2 + \phi^2 \\ \sin(x) &= 2\phi/\psi \quad \cos(x) = \delta/\psi \end{aligned} \quad (6)$$

被测光纤的反向传输矩阵表示为:

$$F_2' = \begin{bmatrix} A & B \\ -B & A^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据琼斯矩阵原理计算该系统的琼斯矩阵模型为<sup>[9]</sup>:

$$E_{out} = \begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \phi^2 + 2\phi e^{i\delta/2} \\ 1 - \phi^2 - 2\phi e^{i\delta/2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \phi^2 + 2\phi(\delta/2) + 2i\phi\sin\delta/2 \\ 1 - \phi^2 - 2\phi(\delta/2) + 2i\phi\sin\delta/2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

法拉第旋转镜的作用是保持线偏光的偏振态,当单路时,线偏振光会变为椭圆偏振光,法拉第旋转反射镜反射后,会使得椭圆偏振光又变为线偏振光。通过计算偏振光相互垂直的  $E_p$  与  $E_s$  的相位差是否为零来判断被测光纤的线性双折射是否存在。

设  $E_p$  与  $E_s$  的相位差分别为  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ , 则:

$$\tan\alpha_1 = \frac{2\phi\sin\delta/2}{1 - \phi^2 + 2\phi\cos\delta/2}$$

$$\tan\alpha_2 = \frac{2\phi\sin\delta/2}{1 - \phi^2 - 2\phi\cos\delta/2} = \frac{4\phi^2\sin\delta}{1 - 4\phi^2\cos\delta} \approx 0 \quad (9)$$

可以看到,两垂直偏振光的相位差几乎为零(大概为  $1.4340e-006\text{rad}$ ), 所以可以看出:FRM 能够起到消除被测光纤中线性双折射的作用, 解决了斯坦福大学系统<sup>[7]</sup>中被测光纤传输光的偏振衰落问题。

根据“差除和”方案得到:

$$T = \left| \frac{I_p - I_s}{I_p + I_s} \right| = \left| \frac{E_p E_p^* - E_s E_s^*}{E_p E_p^* + E_s E_s^*} \right| = \left| \frac{\frac{4\theta\sin\delta}{\delta} \left[ 1 - \frac{4\theta^2}{\delta^2} \left( \sin \frac{\delta}{2} \right)^2 \right]}{1 + \frac{4\theta^2}{\delta^2} [(\sin\delta)^2 - 2(\sin\delta/2)^2]} \right| \approx 4V \int \text{Bdl} \left| \frac{\sin\delta}{\delta} \right| \approx 4V \int \text{Bdl} \quad (10)$$

磁场影响下,两路相等电压会产生电压差值,用锁相放大器进行两路差值信号的解调与采集。然后可根据公式(10)计算出光纤的 Verdet 常数。

### 3.2 实验测量结果与分析

利用此系统对 HC-1550-2 空芯光子晶体光纤进行测量,被测光纤的长度为 25 cm,螺线管的驱动电流为 1 A,调制频率为 50 Hz,如图 6 所示。

测量中人为加入振动,可以看到会有尖峰出现,但系统会自行恢复稳定,可以证明系统的稳定性。测量的变化电压差均值为 0.000 086 V,总电压为 4 V,计算出  $V=9.8 \text{ mrad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。多次测量的结果为  $V=$

$9.8\pm 0.1 \text{ mrad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。由结果可以看出,测量结果(图7)与仿真结果为一个数量级,可以证明测量的准确性,较斯坦福大学的测量结果更具说服力。

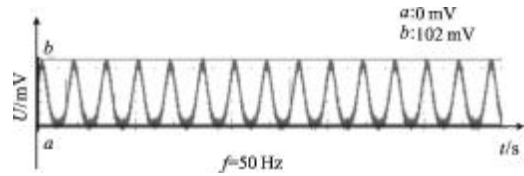


图 6 正弦驱动电流示意图

Fig.6 Sine drive current schematic diagram

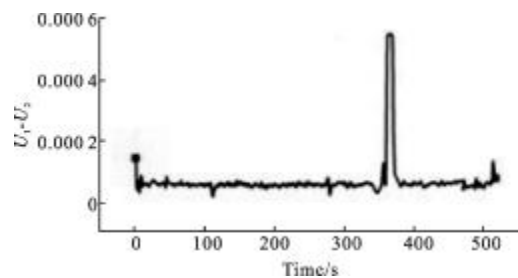


图 7 HC-1550-2 空芯光子晶体光纤的测量结果

Fig.7 Measuring result of HC-1550-2 air-core photonic crystal fiber

## 4 结论

文中对空芯光子晶体光纤磁敏感性的仿真研究与测量研究。仿真研究运用 Comsol 软件得到 Verdet 常数的仿真值,为空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数提供了测量依据;测量研究基于含有反射镜的双光路方案,解决了斯坦福大学双光路方案中偏振衰落的问题。

由仿真与测量结果可知,空芯光子晶体光纤的 Verdet 常数为传统光纤的 1/100 左右,可见,空芯光子晶体光纤较传统光纤具有更好的抗磁性,其作为新型的光纤陀螺光纤在磁敏感性方面占有很大优势。

### 参考文献:

[1] Yang Yuanhong, Duan Weiqian, Ye Miao, et al. Tecnology of photonic crystal fiber gyroscope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1143-1147. (in Chinese)

[2] Wang Xiaoxiao, Song Ningfang. Experiment study on magnet sensitivity of fiber optic gyro [J]. Journal of Beijing University of Aeronautic and Astronautics, 2005, 31 (10): 1116-1120.

- [3] Yang XueYu, Liao Yanbiao. The measurement of Verdet constant of fiber current sensor[J]. *Applied Laser*, 1986, 7(4): 151-154
- [4] Dong Xiaopeng, Dai Wenhua. Measurement of Verdet constant for fibers with intrinsic linear birefringence[J]. *Acta Optical Sinica*, 1995, 15(10): 1452-1457.
- [5] Zhuang Jing, Xiao Yueyu. Measurement of Verdet constant in fiber optical current transducer using an optimization method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1128003-1-1128003-6
- [6] Rose A H, Etzel S M. Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(5): 803-807
- [7] HeWen, Matthew. Measurement of the birefringence and Verdet constant in an air-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(15): 3194-3201.
- [8] Cruz J L, Andres M V. Faraday effect in standard optical fibers: dispersion of the effective Verdet constant[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(6): 922-927.
- [9] Yan Li, Man Jiang, De Zhaoyang, et al. Measurement system of the fibers' verdet constant including a Faraday rotator mirror [C]//The Third International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, 2013.