

# 基于全光纤型系统的光纤 Verdet 常数测量

李彦 姜漫\* 宋镜明 孙彦凤

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要** 为对光纤磁敏感性进行研究, 基于法拉第效应原理, 利用琼斯矩阵建立了全光纤型光纤 Verdet 常数测量系统的传输模型。对输入端光纤、输出端光纤、被测光纤对系统输出的影响进行了分析与仿真, 结果表明测量系统中输入端保偏光纤对系统输出有影响, 输出端光纤及光纤种类不影响系统输出, 并确定了被测光纤的有效被测长度。搭建测量系统对单模光纤进行测量, 测量的单模光纤 Verdet 常数为  $0.52 \pm 0.01 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ , 多根光纤测量结果在  $0.52 \sim 0.56 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$  之间, 且不同驱动电压下的测量结果与驱动电流成线性关系, 说明系统线性度好。实验结果证明了此系统具有很好的可靠性与稳定性。

**关键词** 光纤光学; Verdet 常数; 全光纤结构; 琼斯矩阵

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.100601

## Measurement of the Fibers' Verdet Constant Based on an All Fiber-Optical Structure System

Li Yan Jiang Man Song Jingming Sun Yanfeng

(School of Instrument Science and Opt-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** In order to research the magnetic-optical characteristic, an all fiber-optical structure system is built to measure the fibers' Verdet constant based on the Faraday effect. The system's theoretical model is built with the Jones matrix. Through analysis and simulation, it is shown that the input fiber can influence the measurement result, while the result is independent of the output fiber contrarily. Meanwhile the optimum length of the measured fiber is confirmed. Experimental system is built to measure the SMF-28e fiber's Verdet constant. The measurement results prove that the Verdet constant of the SMF-28e fiber is  $0.52 \pm 0.01 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ , and the measurement results range from  $0.52 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$  to  $0.56 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ . Experiment is also taken under different driving voltages, and the result shows that the system has good linearity and feasibility, which also demonstrates the reliability and stability of the system.

**Key words** fiber optics; Verdet constant; all fiber-optical structure; Jones matrix

**OCIS codes** 060.2270; 060.2300; 060.2310; 060.2240; 060.2430

## 1 引言

光纤陀螺作为一种重要的角速度传感器, 在各种民用和军用定位导航系统方面有着重要的应用。但光纤陀螺受磁场、温度、振动等环境因素的干扰, 会产生信号漂移, 精度受到很大的影响<sup>[1]</sup>。其中, 光纤陀螺的磁敏感性是由光纤的 Verdet 常数来表征的。测量陀螺用光纤的 Verdet 常数可以从微观上了解光纤陀螺的磁敏感性能, 为筛选光纤、研究采用新型光纤的光纤陀螺提供依据。因此, 搭建测量系统对光纤 Verdet 常数进行准确测量在光纤陀螺技术方面具有重要的意义。

国内外对 Verdet 常数测量已有所研究<sup>[2-10]</sup>, 其中大部分是以空间光路测量为主的方案, 空间光路的结构复杂, 光纤耦合难于调节, 受外界干扰大, 搭建难度大, 实用性不高。本文提出一种全光纤型的光纤

收稿日期: 2013-05-06; 收到修改稿日期: 2013-06-20; 网络出版日期: 2013-08-26

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 李彦(1975-), 女, 讲师, 硕士生导师。主要从事光纤陀螺方面的研究。E-mail: lettrom@aspe.buaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jiangmandu@126.com

Verdet 常数测量系统。全光纤系统搭建方便,光纤熔接耦合替代了空间光路的光耦合,光能利用率高,抗干扰能力强。

首先利用琼斯矩阵建立了全光纤 Verdet 常数测量系统的理论模型。然后对输入光纤、被测光纤、输出光纤对系统测量结果的影响进行了分析与仿真,并确定了该系统下被测光纤的有效被测长度。最后搭建了全光纤方案的测量系统,对 SMF-28e 光纤进行了测量,测量值为  $0.52 \pm 0.01 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$ ,多根光纤测量的结果范围为  $0.52 \sim 0.56 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$ 。在不同磁场强度下进行测量,结果证明系统输出与驱动电压有很好的线性关系,说明系统具有较好的重复性与稳定性。

## 2 理论与模型建立

### 2.1 法拉第效应

光纤 Verdet 常数测量的理论依据是法拉第效应原理,即一束线偏振光在光纤中传输时,受到磁场影响后偏振面会发生一定角度的旋转<sup>[11]</sup>。设旋转角为  $\phi$ ,理想情况下有

$$\phi = VBL_{ce}, \quad (1)$$

式中  $V$  为光纤的 Verdet 常数, $B$  为均匀磁场下的磁感应强度, $L_{ce}$  为受磁场影响的光纤长度。

### 2.2 模型建立

根据法拉第效应原理,基于双光路测量方案提出全光纤型光纤 Verdet 常数测量系统,原理如图 1 所示。建立如图 2 所示的系统坐标系,设光传播方向为  $z$  轴方向, $xoy$  平面垂直于传播方向。可调起偏器起偏方向与  $x$  轴成  $45^\circ$  角,偏振分束器(PBS)的分光轴与系统参考坐标轴相同。

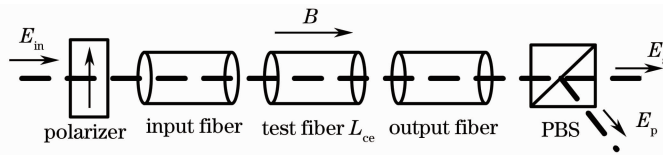


图 1 系统模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system model

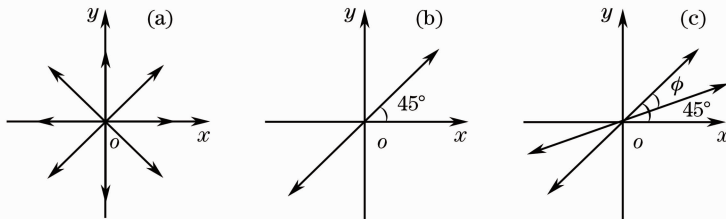


图 2 传输光的偏振态。(a)输入光偏振态;(b)起偏后为线偏光;(c)磁场作用下线偏光的旋转

Fig. 2 Polarized state of the light. (a) Polarized state of the input light; (b) linear polarized light after the polarizer; (c) rotation of the polarized light

入射光为完全非偏振光,经起偏器后成为与  $x$  轴成  $45^\circ$  角的线偏光,线偏光经输入端光纤进入被测光纤,所加磁场沿  $z$  轴方向,线偏光在磁场的影响下产生法拉第旋转角  $\phi$ ,随后经输出端光纤由 PBS 分为振动方向相互垂直的两束线偏光  $E_p$  与  $E_s$  输出。其中,输入光纤为保偏光纤,被测光纤为单模光纤,输出光纤为单模光纤或保偏光纤。

对系统进行琼斯矩阵理论<sup>[11-14]</sup>计算,并讨论输出端光纤单模或保偏种类对系统的影响。经起偏器后的线偏光的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

因为非理想单模传输与保偏传输对光造成的影响均是两轴相位差的产生,所以设一定长度的输入端光纤产生的相位差为  $\Delta\delta_1$ ,一定长度的输出端光纤造成的相位差为  $\Delta\delta_2$ ,琼斯矩阵分别为

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\delta_1) \end{bmatrix}, \quad F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\delta_2) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

考虑到被测单模光纤为非理想单模光纤,存在内部固有双折射和外部感应线性双折射。因此被测光纤在磁场与线性双折射共同作用下的琼斯矩阵可以由下式表示<sup>[12]</sup>:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= \cos(\psi/2) + i\cos x \sin(\psi/2), & B &= \sin x \sin(\psi/2), \\ (\psi/2)^2 &= (\delta/2)^2 + \phi^2, & \sin x &= 2\phi/\psi, \\ \cos x &= \delta/\psi, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\phi$  为磁场作用下的法拉第旋转角,  $\delta$  为被测光纤的线性双折射引起的相位延迟。

因为 PBS 的分光轴与系统的  $xoy$  坐标相同,所以其琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{F}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据琼斯矩阵理论可以得到整个系统的琼斯矩阵表示:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} = \mathbf{F}_3 \mathbf{F}_2 \mathbf{F} \mathbf{F}_1 \mathbf{E}_i. \quad (7)$$

根据(2)~(7)式,得到

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A - B \exp(-i\Delta\delta_1) \\ B \exp(-i\Delta\delta_2) + A^* \exp[-i(\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2)] \end{bmatrix}. \quad (8)$$

根据双光路方法,采取“差除和”信号处理方案,即  $T = |(I_p - I_s)/(I_p + I_s)|$ ,  $I_p$  与  $I_s$  分别为由 PBS 分束的两光路的光功率。此方案能有效去除外界环境因素的干扰,减少光源光强涨落等因素对系统输出的噪声影响,得到与入射光强无关的信号,从而提高系统的测量精度与稳定性。

此时有

$$I_p = E_p E_p^* = AA^* + B^2 - A^* B \exp(-i\Delta\delta_1) - AB \exp(i\Delta\delta_1), \quad (9)$$

$$I_s = E_s E_s^* = AA^* + B^2 + AB \exp(i\Delta\delta_1) + A^* B \exp(-i\Delta\delta_1), \quad (10)$$

代入到  $T = |(I_p - I_s)/(I_p + I_s)|$  中得到

$$T = \left| \frac{I_p - I_s}{I_p + I_s} \right| = \left| \frac{AB \exp(i\Delta\delta_1) + A^* B \exp(-i\Delta\delta_1)}{AA^* + B^2} \right| = \left| \frac{2\phi}{\psi} \sin \psi \cos(\Delta\delta_1) - \frac{4\delta\phi}{\psi^2} \sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right) \sin \Delta\delta_1 \right|. \quad (11)$$

当磁场为非均匀磁场时,旋转角  $\phi = V \int_{L_{ce}} B dl$ ,且经信号处理系统光电转换后(11)式可以表示为

$$T = \left| \frac{U_p - U_s}{U_p + U_s} \right| = 2V \int_{L_{ce}} B dl \left| \frac{\sin \psi}{\psi} \cos(\Delta\delta_1) - \frac{2\delta}{\psi^2} \sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right) \sin \Delta\delta_1 \right|, \quad (12)$$

式中  $U_p$  与  $U_s$  分别通过光电转换采集到的 PBS 分束后两路光功率的电压值。根据(12)式可以求得被测光纤的 Verdet 常数。

## 3 分析与仿真

### 3.1 输入与输出端光纤对系统输出的影响

由(12)式可以看出,采取“差除和”信号处理方案,系统输出与输出端光纤的种类无关。同时,由(12)式可以得知,系统输出与输入光纤的长度有关,为了提高测量精度,可以将被测光纤直接与可调起偏器连接,此时  $\Delta\delta_1 = 0$ , (12)式可以表示为

$$T = 2V \int_{L_{ce}} B dl \cdot \left| \frac{\sin \psi}{\psi} \right|. \quad (13)$$

### 3.2 被测光纤有效被测长度的确定

#### 3.2.1 螺线管磁场对有效被测光纤长度确定的影响

系统中采用螺线管施加轴向磁场,而螺线管的磁场不是均匀分布的,设螺线管的长度为  $L$ ,内径为  $R_1$ ,外径为  $R_2$ ,则螺线管的有效半径  $R_{\text{eff}}$  为<sup>[15]</sup>

$$R_{\text{eff}} = (R_2 - R_1) / \ln(R_2 / R_1), \quad (14)$$

沿被测光纤的总磁场可以表示为

$$\int_{-L_{\text{ce}}/2}^{L_{\text{ce}}/2} B dl_{\text{ce}} = \frac{B_0 \sqrt{L^2 + 4R_{\text{eff}}^2}}{2L} \left[ \sqrt{4R_{\text{eff}}^2 + (L_{\text{ce}} + L)^2} - \sqrt{4R_{\text{eff}}^2 + (L_{\text{ce}} - L)^2} \right], \quad (15)$$

式中  $dl_{\text{ce}}$  为积分微小元,对被测光纤  $L_{\text{ce}}$  进行积分求解总磁感应强度,  $B_0$  为螺线管中心的磁感应强度,且总磁感应强度与螺线管的电流成正比关系。

本系统中定制的螺线管电阻约为  $10.5 \Omega$ ,长度  $L = 0.1 \text{ m}$ ,内径  $R_1 = 1.5 \text{ cm}$ ,外径  $R_2 = 4 \text{ cm}$ ,根据(14)式求得螺线管的有效半径  $R_{\text{eff}} = 2.2 \text{ cm}$ 。

当电流为  $1.8 \text{ A}$  时中心磁场  $B_0 = 500 \text{ G}$ ,根据(15)式对总磁感应强度进行仿真得到如图 3 中虚线所示结果。由图 3 可知,被测光纤越长,受磁场影响越大,则法拉第效应产生的法拉第旋转角就越大。

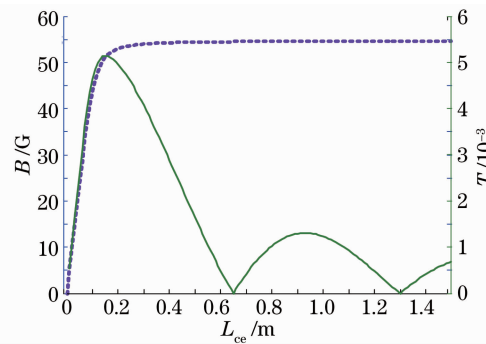


图 3 磁感应强度  $B$  和系统输出  $T$  与被测光纤长度  $L_{\text{ce}}$  的关系

Fig. 3 Dependence of the magnetic induction density  $B$  and system output  $T$  on the test fiber length  $L_{\text{ce}}$

对被测光纤长度进行精确测量是不可取的,通过计算可知,  $1.8 \text{ A}$  下总磁场磁感应强度极限约为  $54.626 \text{ G}$ ,当被测光纤长度为  $15 \sim 25 \text{ cm}$  时,若仍用极限磁感应强度代入造成的测量误差为  $5\% \sim 2\%$ ,在可接受的精度范围内。

#### 3.2.2 线性双折射对有效被测长度确定的影响

由于被测单模光纤的非理想性,会存在线性双折射。单模光纤的拍长  $L_B \approx 1.3 \text{ m}$ <sup>[16]</sup>,螺线管驱动电流为  $1.8 \text{ A}$ ,光纤的 Verdet 常数选用  $0.55 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$ <sup>[16]</sup>,一般  $\phi$  很小,则有  $\delta \approx \psi$ ,此种情况下可以得到系统输出  $T$  与被测光纤长度  $L_{\text{ce}}$  的关系,如图 3 中实线所示。

可以看出,随着被测光纤长度的增加,光纤的线性双折射也在增加,使得系统输出  $T$  的值与  $\sin \delta / \delta$  成正比例变化。由图 3 可以看出,当被测光纤长度约为  $15 \sim 25 \text{ cm}$  时,系统输出  $T$  较大且曲线斜率小,可知系统输出对光纤的线性双折射的敏感度较小。

结合上述分析,在所用磁场作用于被测光纤时有效被测长度选为  $15 \sim 25 \text{ cm}$ 。

## 4 系统搭建与实验验证

### 4.1 系统搭建

根据上述理论,搭建实验系统,如图 4 所示,系统所用光源为放大自发辐射(ASE)光源,该光源的稳定性好且输出光功率高,其低偏振度有利于系统减少偏振串扰的影响,宽光谱有利于减少背向散射对测量的干扰。起偏器具有可调节功能,磁场开启前调节起偏器使两路探测器输出电压  $U$  相等,利用高精度的数字示波器对两路探测器(OSC)输出的电压进行监测,总电压为  $2U$ 。

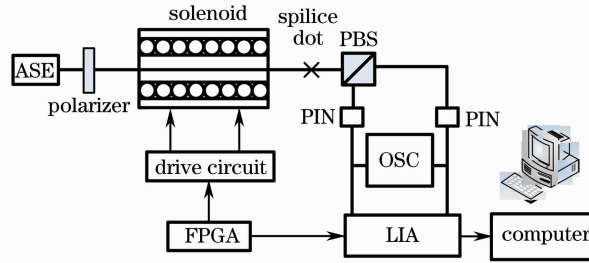


图4 全光纤型测量系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the entire-fiber measurement system

螺线管由 IRF630 V 型槽金属氧化物半导体场效应管 (VMOS 管) 驱动电路驱动, 其能提供的电流为 0~9 A, 可以驱动螺线管产生大磁场, 使得系统的动态范围大。调制方波由现场可编程门阵列 (FPGA) 提供, 调制频率为 1 Hz。所用 PBS 带有保偏尾纤, 其分光比达到 40 dB 以上, 且被测光纤与 PBS 的尾纤通过熔接技术相连接, 可以减少光的损耗。

探测器的响应度为 0.92 A/W; 锁相放大器 (LIA, SR830) 为双通道型, 参考频率同样由 FPGA 提供, 可使得信号频率与参考频率同步, 从而减少测量的误差, 且锁相放大器的解调频率范围广, 为 0.1 Hz~102 kHz。由锁相放大器直接解调出两路信号的电压差为  $U_1 - U_2$ , 则  $T = (U_1 - U_2) / 2U$ 。再利用公式 (13) 计算出光纤的 Verdet 常数。信号处理部分电路如图 5 所示。

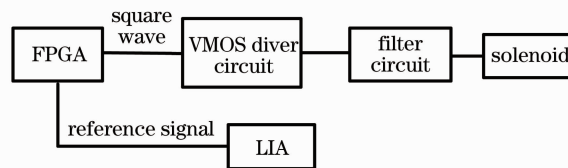


图5 电路部分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the circuit in the system

## 4.2 实验测量与结果分析

利用所搭建的全光纤结构系统对多根康宁 SMF-28e 光纤以及同一根光纤的 Verdet 常数进行多次测量, 螺线管的驱动电流为 0.38 A, 调制频率为 1 Hz。开启磁场前, 两路信号的输出总电压为 1.66 V, 被测光纤长度为 20 cm。对同一根光纤的 Verdet 常数进行了多次测量, 结果如表 1 所示; 对 5 根不同批次的 SMF-28e 光纤进行了多次测量, 结果如图 6 所示。因锁相放大器工作原理是相敏检测, 只对正弦波进行检测, 且输出值为均方值, 则实际信号的输出电压为  $|U_1 - U_2| \cdot \sqrt{2} \cdot 2 / 1.273$ 。

表1 同一光纤的多次测量结果

Table 1 Measurement results of the same fiber

Number	$U_1 - U_2 / \text{mV}$	Variance / $10^{-5} \text{ mV}^2$	$V / [\text{rad}/(\text{T} \cdot \text{m})]$
1	0.764	1.252	0.51
2	0.775	1.139	0.52
3	0.779	1.014	0.52
4	0.769	1.642	0.52
5	0.781	1.242	0.53
6	0.765	1.254	0.51
Average value	0.772	1.26	0.52

由表 1 可知, 本系统测量的单模光纤的 Verdet 常数均值为  $0.52 \pm 0.01 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$ , 由测量结果方差可知, 系统稳定性好。由于不同批次光纤的制作工艺问题, Verdet 常数的测量值会有所不同, 由图 6 可知, 对多根光纤测量的 Verdet 常数值范围为  $0.52 \sim 0.56 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$ 。已有研究测量的单模光纤的 Verdet 常数

在  $0.52 \sim 0.60 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$  范围内<sup>[7-9]</sup>, 可以证明系统测量的可靠性。

同时, 在不同驱动电流下对光纤 Verdet 常数进行了测量, 如图 7 所示。由结果可知, 系统具有很好的线性关系, 同样说明了系统的稳定性与可重复性。

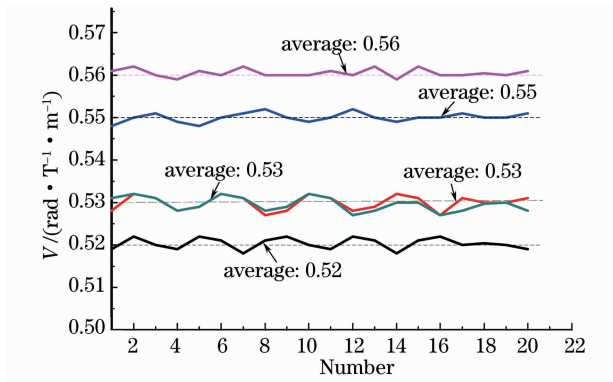


图 6 多根单模光纤的测量结果

Fig. 6 Results of the different SMF-28 fibers

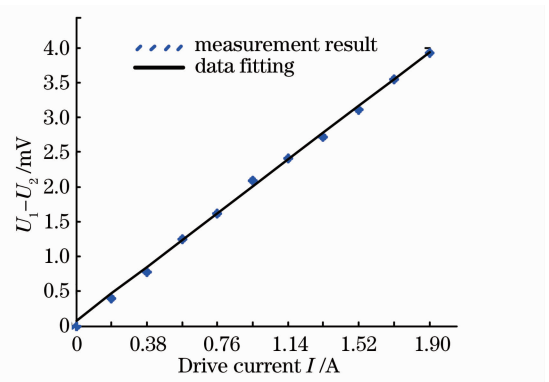


图 7 不同驱动电流下系统输出

Fig. 7 Result under the different drive currents

## 5 结 论

提出了全光纤型光纤 Verdet 常数的测量系统, 该系统搭建简单、抗干扰能力强、实用性高。系统基于双光路方案, 运用琼斯矩阵对系统进行了理论建模, 对系统中输入、被测、输出光纤进行了分析仿真, 从螺线管磁场分布与光纤双折射方面分析确定了被测光纤的有效被测长度。从光路、电路两方面搭建系统, 对单模光纤进行了测量, 测量的结果为  $0.52 \pm 0.01 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ , 多根光纤测量值亦在经验测量范围内。实验证明了全光纤结构系统的可行性, 并且系统的测量方差小、与驱动电压的线性关系好, 说明其有很好的测量稳定性。此系统为光纤陀螺用新型光纤的磁敏感性研究提供了平台, 下一步将对新型单模光纤的 Verdet 常数进行测量研究。

## 参 考 文 献

- Wang Xiaoxiao, Song Ningfang, Zhang Chunxi, *et al.*. Experiment study on magnet sensitivity of fiber optic gyro[J]. J Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(10): 1116-1120.  
王夏霄, 宋凝芳, 张春熹, 等. 光纤陀螺磁敏感性的试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1116-1120.
- Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 191-197.  
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 191-197.
- K Hotate, K Tabe. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect; influence of the earth's magnetic field [J]. Appl Opt, 1986, 25(7): 1452-1457.
- Dong Xiaopeng, Dai Wenhua. Measurement of Verdet constant for fibers with intrinsic linear birefringence[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(10): 1452-1457.  
董小鹏, 戴文华. 存在固有双折射光纤费尔德常数的测量[J]. 光学学报, 1995, 15(10): 1452-1457.
- Zhuang Jing, Xiao Yueyu, Peng Lei, *et al.*. Measurement of Verdet constant in fiber optical current transducer using an optimization method[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128003.  
庄 静, 肖悦娱, 彭 蕾, 等. 基于光纤电流传感器的韦尔代常数优化测量法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128003.
- Ling Ou, Jincheng Wang, Qifeng Xu. Faraday rotation angle measurement based on conoscopic interference pattern in optical current transducer[J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1060-1066.
- A M Smith. Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber[J]. Appl Opt, 1978, 17(1): 52-56.
- J L Cruz, M V Andres, M A Hernandez. Faraday effect in standard optical fibers; dispersion of the effective Verdet constant[J]. Appl Opt, 1996, 35(6): 922-927.
- A H Rose, S M Etzel, C M Wang. Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors[J]. J Lightwave Technology, 1997, 15(5): 803-807.
- Yinlan Ruan, Ruth A Jarvis, Andrei V Rode. Wavelength dispersion of Verdet constant in chalcogenide glasses for magneto-optical waveguide devices[J]. Opt Commun, 2005, 252(1-3): 39-45.

- 11 Zhang Guicai. The Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 121—122.  
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 121—122.
- 12 Liao Yanbiao. Polarization Optic[M]. Beijing: Science Press, 2003. 270—271.  
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 270—271.
- 13 Li Xuyou, Hao Jinhui, Yang Hanrui, *et al.*. Research on the compensating fiber loop for eliminating vibration in Sagnac optic current sensor[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0205005.  
李绪友,郝金会,杨汉瑞,等. 消除萨尼亚克光纤电流传感器振动干扰的光纤补偿环研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205005.
- 14 Wang Wei, Liu Xiaolong. Effects of azimuth of fiber optic principal axes on fiber optic current sensors[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1):0114003.  
王 伟,刘晓隆. 光纤主轴方位角对光纤电流传感器的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114003.
- 15 Zhang Huan, Ma Quanxi. Effect radius of multiple coils in the electromagnetism calculation[J]. Physics Bulletin, 2010, (10): 17—18.  
张 欢,马全喜. 多层圆线圈在电磁计算中的等效半径[J]. 物理通报, 2010, (10): 17—18.
- 16 He Wen, Matthew ATerrel, Hyang Kyun Kim, *et al.*. Measurement of the birefringence and Verdet constant in an air-core fiber[J]. J Lightware Technology, 2009, 27(15): 3194—3201.