

基于光纤电流传感器的韦尔代常数优化测量法

庄 静 肖悦娱 彭 蕾 颜锦奎

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要 韦尔代常数(Verdet)是决定光纤电流传感器(FOCT)灵敏度的重要因素之一。根据萨格纳克(Sagnac)干涉原理计算得到校准信号,并测量 FOCT 的实际输出信号,通过比较这两组信号建立目标函数,基于单纯形算法进行参数优化,从而得到石英光纤的韦尔代常数。实验结果与经典模型计算结果基本吻合。FOCT 的输出信号经过测量电路会引入相位差;另外受到调制器和外界环境的影响,干涉回路的工作点会产生漂移,导致输出信号不对称而产生直流量。考虑到以上因素,提出的这种方法还能同时测量出电路的相位差、干涉回路的工作点以及反映非线性畸变的直流量。

关键词 光纤光学;韦尔代常数;萨格纳克干涉;光纤电流传感器

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1128003

Measurement of Verdet Constant in Fiber Optical Current Transducer Using an Optimization Method

Zhuang Jing Xiao Yueyu Peng Lei Yan Jinkui

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract Verdet constant is one of important parameters which can determine sensitivity of a fiber optical current transducer (FOCT). Calibration signal is calculated based on Sagnac interference principle, and the output signal of FOCT is measured. By comparing above these two sets of signals, an objective function is established, and then the parameters of the function are optimized based on a Nelder-Mead simplex method. Thereby the Verdet constant of silica fiber is measured. Experimental results are in good agreement with the results calculated by classical models. Phase delay is added to the output signal when it goes through the measuring circuits. Influenced by rotator and changing environment, the working point of the interference loop drifts. As a result, the output signal becomes asymmetric and creates the direct current quantity. Considering all these situations, the phase delay, working point and direct current quantity which reflects the nonlinear distortion can also be obtained by this method.

Key words fiber optics; Verdet constant; Sagnac interferometer; fiber optical current transducer

OCIS codes 060.2270; 060.2300; 060.2370

1 引 言

随着电力部门的电压等级以及自动化程度的提高,传统的电磁式电流互感器日益显露出其固有的局限性。近年来,光纤传感技术的迅速发展,促进了世界范围内光纤电流传感器(FOCT)的研制。FOCT 具有抗电磁干扰能力强、测量动态范围广、绝缘性好和长期稳定等优点,已经成为传统电磁式互

传感器的有力竞争者。目前,FOCT 的研制和开发已日趋成熟和完善,并有少量进入现场试运行。但是,前期的研究表明 FOCT 的输出信号会受到温度和振动等环境因素的影响,因此 FOCT 要实现真正实用化还需要进一步深入的研究。

传感光纤的韦尔代常数(Verdet)是决定 FOCT 灵敏度的重要因素之一。韦尔代常数值(以下简称 V

收稿日期: 2012-05-30; 收到修改稿日期: 2012-06-11

作者简介: 庄 静(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感、光电检测和数据接口等方面的研究。

E-mail: sheilazhuang@shu.edu.cn

导师简介: 颜锦奎(1965—),男,副教授,硕士生导师,主要从事特种光纤参数测量和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: jkylan@shu.edu.cn

值)和温度、光源波长以及材料本身有关^[1~10]。通过法拉第旋转角测出的 V 值单位为弧度每米特斯拉,随着磁光材料的电流传感器的发展,为方便表示就出现了弧度每安这种形式的单位^[4]。 V 值的测量可追溯到 1968 年,Garn 等^[6]利用连续的可见光谱来测量法拉第旋转角,并给出了几种物质的 V 值。1978 年,Smith 等^[7]给出了 633 nm 波长下单模光纤的 V 值为 $4.65 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$;Lassing 等^[8]也随之测量出了 633 nm 波长下超低双折射单模光纤的 V 值为 $(4.60 \pm 0.02) \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$,在这些前人工作的基础上可以用 $\mu V = \mu V_0 (\lambda_0 / \lambda)^2$ 经典模型^[9](式中 μ 为真空磁导率, $V_0 = 4.61 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$, $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$)推算出其他波长下光纤的 V 值。1980 年,Smith^[10]使用激光作为光源来测量法拉第旋转角,推算出 830 nm 波长下单模光纤 $V = 2.68 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$ 。1984 年,Noda 等^[3]提出了 $\mu V = 2.0 \times 10^{-35} \nu^2$ 模型,式中 ν 是入射光频率。1995 年,董小鹏等^[11]提出了一种适用于存在固有线双折射的光纤韦尔代常数测量的新方法。1997 年,Rose 等^[4]总结了前人的工作,并使用具有低双折射特性的退火光纤测出了在 600~1550 nm 下光纤的 V 值曲线,并认可了 Noda 模型。2007 年,王加新等^[12]测出了不同扭转圈数的光纤环的 V 值。2009 年,Wen 等^[13]提出了一种用于测量空心的光子带隙光纤的双折射系数和韦尔代常数的方法。

本文通过采样 FOCT 的输出信号,结合萨格纳克(Sagnac)干涉原理计算得到的校准信号建立目标函数,以单纯形算法为理论依据,利用 Matlab 提供的优化方法进行参数优化,从而获得韦尔代常数等

重要参数。实验结果和国内外已报道的方法所得结果基本相符。这种方法同时给出了干涉回路的工作点,测量电路引入的相位差和输出信号中的直流量等重要参数。

2 理论分析

2.1 法拉第磁光效应

法拉第磁光效应^[14],指在某些媒质中,沿磁场方向传播的光线偏振面会发生旋转,其旋转角度 $\Delta\phi$ 与磁场强度 H 、磁场中光路的长度 L 成正比:

$$\Delta\phi = VHL, \quad (1)$$

式中 V 为光纤的韦尔代常数。对于 FOCT,由于载流导线在周围空间产生的磁场满足安培环路定理,所以光纤中的旋转角度为

$$\Delta\phi = V \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = NVI, \quad (2)$$

式中 N 为传感光纤环的总圈数, I 为光纤中的电流。

2.2 萨格纳克干涉型电流传感器原理

基于萨格纳克干涉原理的全 FOCT 原理如图 1 所示。从光源超辐射发光二极管(SLD)S 出发的光线,被耦合器 C_2 分成两路,分别沿两个不同传播方向通过传感光纤环,最终到达光电检测器 D 的两路光有着完全相同的光路。温度、应力、弯曲等因素引起的互易性相位扰动,在萨格纳克干涉回路中得到相消,而法拉第效应引起的非互易效应得到加倍增强。图中的 M 为调制器,是一个非互易器件,在这里选用具有 $\pi/4$ 固定相位延迟的法拉第磁光旋转器。使用 $\lambda/4$ 波片是为了实现线偏振光和圆偏振光相互转换,因为法拉第磁光效应的本征态是圆偏振光。

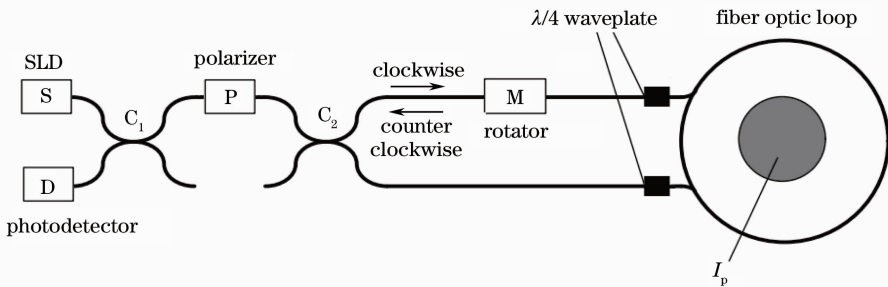


图 1 全光纤萨格纳克干涉型电流传感器

Fig. 1 All-fiber optical Sagnac interferometer current transducer

两路光沿顺时针(CW)方向和逆时针(CCW)方向传播,最终到达探测器 D 的出射光表达式分别为

$$E_{CW} = E_0 \cos\left(\omega t - \phi_{CW} - \frac{\pi}{4} + \phi_r\right), \quad (3)$$

$$E_{CCW} = E_0 \cos\left(\omega t - \phi_{CCW} + \frac{\pi}{4} + \phi_r\right), \quad (4)$$

式中 E_0 为入射光振幅, ϕ_{CW} 和 ϕ_{CCW} 分别是顺时针和逆时针方向的法拉第非互易相移,且

$$\phi_{CCW} = -\phi_{CW} = NVI_p, \quad (5)$$

式中 I_p 为被测电流, $\pi/4$ 由调制器 M 提供, ϕ_r 为互易的相位延迟。

由于萨格纳克回路中的两束光受到电流磁场传感信号的叠加,干涉所得到的相移是普通法拉第相移的 2 倍^[12,15],因此光电检测器检测到的光强为

$$I_D = \frac{1}{T} \int_0^T |E_{cw} + E_{ccw}|^2 dt = E_0 [1 + \sin(2NVI_p)], \quad (6)$$

光电检测管将光强转换为光电流,经过线性放大电路将电流信号转换成电压信号,并分解成交流(AC)信号和直流(DC)信号

$$\begin{cases} V_{ac} = A_2 |E_0|^2 \sin(2NVI_p) \\ V_{dc} = A_1 |E_0|^2 \end{cases}. \quad (7)$$

通常把交流信号除以直流信号作为传感器的输出信号,这样可以把光源变化的影响消除。即输出信号 V_s (无量纲)表达式为

$$V_s = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = A \sin(2NVI_p), \quad (8)$$

式中 A 为电路引入的一个常数。通过电路实际测量, $A = A_1/A_2 = 10$ 。

2.3 目标函数建立和多参数优化测量方法

I_p 为被测电流,是频率为 50 Hz 的正弦信号。在被测电流回路中串联 0.1Ω 标准电阻,通过对电阻两端的电压进行模数(AD)转换得到一组离散的值 $I_{pi}, i = 1, \dots, N$, 代入(8)式后作为校准信号 V_{si} 。同时对 FOCT 的输出直流电压 V_{dc} 和交流电压 V_{ac} 进行 AD 转换,将其比值 V_{ac}/V_{dc} 作为测量信号,记为 \bar{V}_{si} 。由于希望得到测量信号和校准信号之间的关系,所以建立目标函数

$$\delta = \sum_{i=1}^N |V_{si} - \bar{V}_{si}|^2. \quad (9)$$

(8)式是萨格纳克干涉的理想数学模型,但是由于:1)调制器引入的非互易相位差与 $\pi/2$ 有差异,余弦函数不能转换为纯粹的正弦函数,干涉回路不是处于最佳工作点;2)测量电路和非同步采样将引入 V_{si} 和 \bar{V}_{si} 之间的相位差;3)干涉回路的工作点不佳引入的直流量等原因导致实际上 FOCT 的输出为

$$V_s = 10 \sin[2Nx_1 f(I_p, x_2) + x_3] + x_4, \quad (10)$$

式中 x_1 为韦尔代常数, x_2 为电路引入的相位差, $f(I_p, x_2)$ 为一个对一次电流信号 I_p 作 x_2 相移的操作。 x_3 为萨格纳克干涉回路的工作点, x_4 是干涉回路非线性引入的直流量。

萨格纳克干涉型传感器输出信号和输入信号的关系符合(6)式,如图 2 所示,只有当相角小于 5° 时,正弦函数在零点附近呈现线性。实验表明,工作点与调制器和光路中光的偏振态有关。理想光纤传感

器的工作点位于零点,但是环境因素(如温度、压力、振动)的变化会使光纤中传输光的偏振态改变^[16,17],导致工作点漂移^[18]。如果干涉回路的工作点远离零点,输出信号就会发生非线性畸变,表现为交流信号的正负周期不对称,平均值不为零,产生直流量 x_4 。

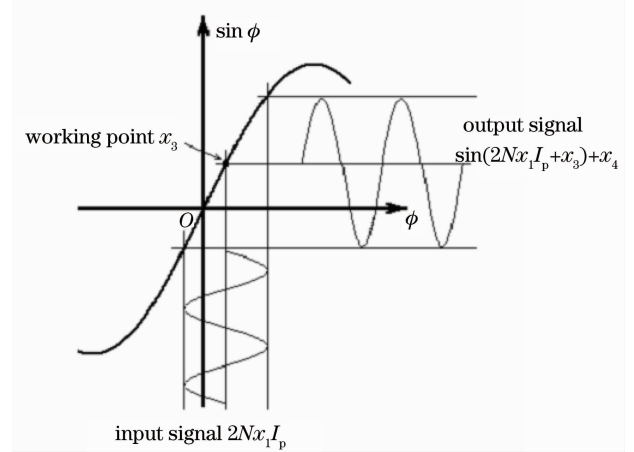


图 2 输入、输出信号和工作点的关系
Fig. 2 Relation among working point and input, output signals

$f(I_p, x_2)$ 代表对周期性函数 I_p 移动 x_2 相位的操作。实验得到的 I_p 为数组 I_{pi} , 直接对数组移动只能移整数位,即只能对 I_p 移动某个最小相位差的整数倍,而 I_p 和 V_s 的实际相位差并不正好是这个相位的整数倍,为此必须对数组移动分数位。具体应对 x_2 取整,记为 n ,对 I_{pi} 循环移动 n 步,而 $x_2 - n$ 的部分采用线性插值法获得,计算公式为

$$f(I_{pi}, x_2) = (1 - z)I_{p, n+i-1} + zI_{p, n+i}, \quad z = x_2 - n, \quad (11)$$

将(10)式中的 $x_i, i = 1, \dots, 4$ 作为未知变量,把(10)式代入(9)式,建立优化问题。选择合适的初值和优化方法,使(9)式取最小值,求得一组最优的解 $x_i, i = 1, \dots, 4$, 就可以获得韦尔代常数、相位差、工作点和直流量等重要参数。

3 Matlab 测量优化程序

数据采集、处理和优化计算在 Matlab 环境下进行,整个程序包括数据采集器初始化 I_p, V_{ac}, V_{dc} 数据采集,选取 x_i 初值,优化计算获得一组最佳值,计算韦尔代常数、工作点、相位差和直流量。子函数包括目标函数和分数移位子函数。

3.1 NI USB-6120s 数据采集器初始化语句

```
AI1=analoginput('nidaq','Dev1'); %建立数
```

据采集器设备句柄

```
set(AI1,'SampleRate',10000); %采样率 10 k/s
set(AI1,'SamplesPerTrigger',2000); %每个
通道数据点 2000 点
```

3.2 目标函数子函数

```
function y=fobj(x,Ip,Vs); %优化参数 x,一
次电流 Ip,二次信号 Vs
y1=10 * sin{2*30*x(1) * fshift[Ip,x(2)]+
x(3)}+x(4); %实际 FOCT 的输出信号
y=sum[(y1-Vs).^2]; %目标函数
```

3.3 分数移位子函数

```
function y=fshift(x,x0) %x 被移位数组,x0
移位量
N=length(x); %数组长度
n=floor(x0); %地板方向取整
z=x0-n; % x0 小数部分
y1=cirshift(x,n); %循环移位,Matlab 自带
函数
```

```
y2=[y1;y1(1)]; %为差值,数组扩展移位
y(1:N)=(1-z) * y2(1:N)+z * y2(2:N+
1); %分数插值
```

3.4 主程序

```
function [x,fv,V]=mverdet
```

global AI1

```
start(AI1); %启动 AD 转换
ssz=getdata(AI1); %获取数据
Vac=ssz(:,1); %获取 Vac 数据
Vdc=ssz(:,3); %获取 Vdc 数据
Ip=ssz(:,2) * 10000; %获取数据,线圈 1000
匝,电阻 0.1 Ω
Vs=Vac./Vdc; %计算 Vs
x0=[10.^-6,1,0.1,0.1]; %选取初值
[x0,fv]=fminsearch(@fobj(x,Ip,Vs),
x0); %用 Matlab 自带的优化程序寻找最佳解
V=x(1); % 韦尔代常数
dphase=x(2) * 360 * 10/2000; %计算相位差
phi0=x(3) * 180/pi; %计算工作点
dc0=x(4); %直流量
```

4 实验装置和测量结果

图 3 为测量装置的框图。测量装置包括带调压变压器和线圈的一次电流发生器、萨格纳干涉光路、检测电路、数据采集器和微型计算机等。图 4 为传感光纤环和线圈、测量系统的实物照片。

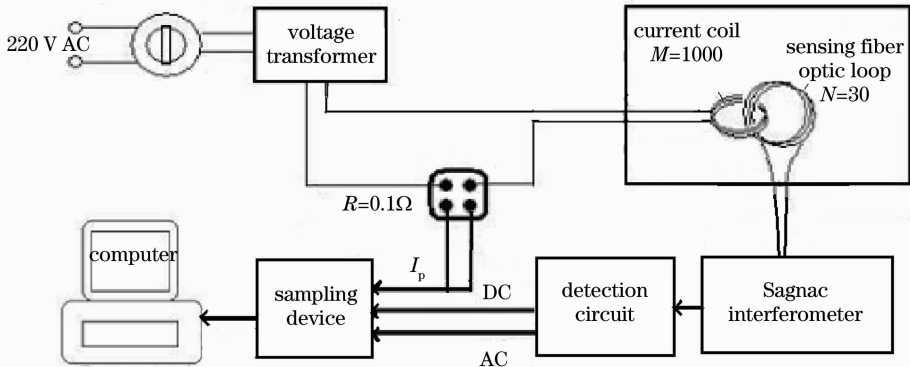


图 3 测量装置框图

Fig. 3 Block diagram of measuring device

输入电压为 220 V 交流电,通过调压变压器改变线圈中的电流大小。0.1 Ω 的标准电阻可以把电流转换成电压以便采样。传感光纤环采用自制的特种光纤,为了提高灵敏度,光纤的圈数不宜太少,实际为 30 圈($N=30$)。检测电路的功能包括光电转换、信号放大以及交直流信号的分离。数据采样使用 NI 公司的 USB-6120s 型采集器,速率 10 k/s,数据点 2000 点,对于 50 Hz 交流信号,相当于采样 10

个周期,每个周期 200 点。图 5 为输入电流 I_p 和输出信号 V_s 的采样电压曲线。

利用编写的 Matlab 程序,对图 5 所示曲线的数据进行计算。初值选取 $x_0=[10^{-6},1,0.1,0.1]$,经计算的优化值为 $x=[7.8796 \times 10^{-7},0.6585,-0.0240,0.3813]$,同时得到韦尔代常数 $V=7.8796 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$,相位差 $\Delta\phi=1.18^\circ$,工作点 $\phi_0=-0.94^\circ$,直流量 $d_{c0}=0.29 \text{ A}$ 。

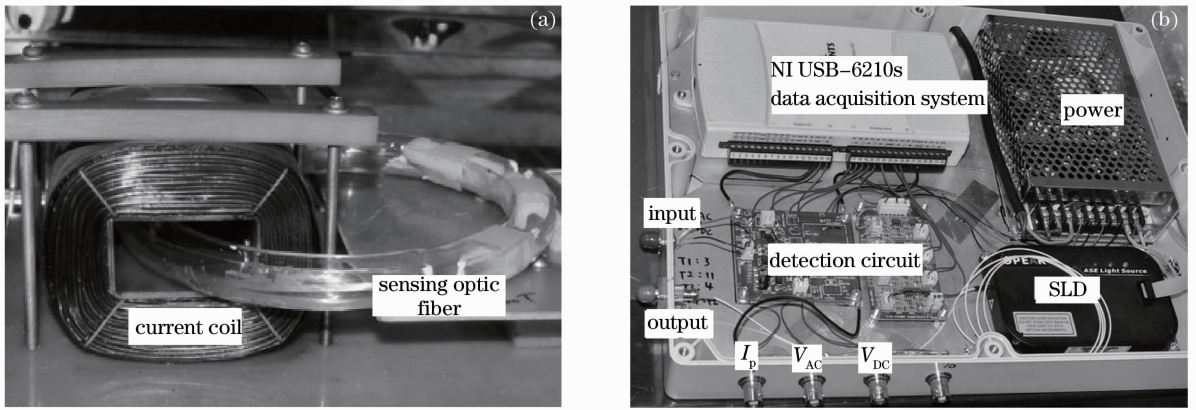


图 4 实验装置实物照片。(a)传感光纤环和电流线圈;(b)检测电路和数据采集系统

Fig. 4 Pictures of experimental device. (a) Sensing optic fiber and current coil; (b) detection circuit and data acquisition system

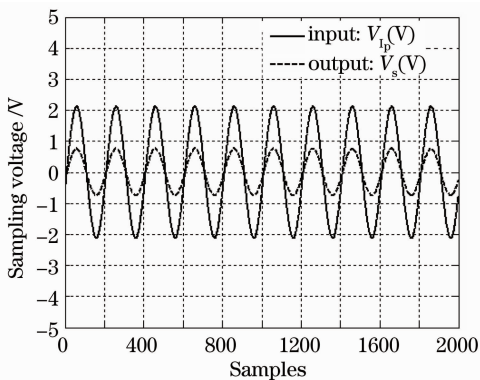


图 5 输入电流 I_p 和输出信号 V_s 的采样电压曲线

Fig. 5 Sampling voltage of input current I_p and output signal V_s .

实验在室温下进行,采用 1550 nm 波长的 SLD 光源,在此波长下按照经典模型^[9]推算, $V=7.6886 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$;按照 Noda 模型^[3]计算, $V=7.4922 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$;Rose 等^[4]得到的 V 值约为 $7.85 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$ 。本文测量值为 $V=7.8796 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{A}^{-1}$,与上述结果基本一致。

实验表明,工作点与调制器和光路中光的偏振态有关,理想光纤传感器的工作点 $\phi_0=0$,但是光路中光的偏振态会随着外界条件(如温度、压力、振动等)变化而改变,实际调制器产生的工作点是一个非零的固定值。一套良好的光纤传感器,当外界干扰因素消除后应能恢复到被干扰前状态,即工作点回到被干扰前的值。工作点是体现 FOCT 传输特性的一个重要参数,当工作点远离最佳点时,会引入严重的非线性,导致输出信号出现不对称的畸变,产生直流量。可见,直流量与工作点密切相关。

5 结 论

通过测量 FOCT 输出信号,结合萨格纳克干涉理论分析所得的公式,加上必要的物理考虑,建立目标函数,利用 Matlab 提供的优化算法就可以获得韦尔代常数、干涉光路的工作点、相位差和非线性畸变程度(直流量)。用这种方法还可以进一步研究韦尔代常数随着外界温度和光源波长的变化特性。

参 考 文 献

- Xu Ling, Yao Shouquan. Effects of temperature on the performance of twisted optic fiber loop[J]. *Laser technology*, 2005, **29**(1): 52~55
许 玲,姚寿铨. 温度对扭转光纤环性能的影响[J]. *激光技术*, 2005, **29**(1): 52~55
- J. W. Dawson, T. W. MacDougall, E. Hernandez. Verdet constant limited temperature response of a fiber-optic current sensor[J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 1995, **7**(12): 1468~1470
- J. Noda, T. Hosaka, Y. Sasaki *et al.*. Dispersion of Verdet constant in stress-birefringent silica fiber[J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(22): 906~908
- A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang. Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5): 803~807
- Wang Zhengping, Li Qingbo, Qi Yi *et al.*. Theoretical study of the effect of the Verdet constant dispersion upon the sensitivity of an optical current sensor[J]. *J. Harbin Engineering University*, 2004, **25**(2): 189~191
王政平,李庆波,齐 异等. Verdet 常数色散对光学电流传感器灵敏度影响的理论研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, **25**(2): 189~191
- W. B. Garn, R. S. Caird, C. M. Fowler *et al.*. Measurement of Faraday rotation in megagauss fields over the continuous visible spectrum[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, **39**(9): 1313~1317
- A. M. Smith. Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(1): 52~56
- H. S. Lassing, A. A. M. Oomens, R. Woltjer *et al.*. Development of a magneto-optic current sensor for high pulsed currents[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(5): 851~854

- 9 M. N. Deeter, G. W. Day, A. H. Rose. Handbook of Laser Science and Technology, Supplement 2: Optical Materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 1995. 367~402
- 10 A. H. Smith. Faraday effect in single-mode optical fibre using an injection laser light source[J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(6): 206~208
- 11 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
- 12 Wang Jiaxin, Yao Shouquan. Interference method for measuring Verdet coefficient of twisted fiber rings [J]. *J. Shanghai University*, 2007, **13**(2): 122~124
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*, 2007, **13**(2): 122~124
- 13 He Wen, M. A. Terrel, H. Kim *et al.*. Measurements of the birefringence and Verdet constant in an air-code fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15): 3194~3201
- 14 Liao Yanbiao, Li Min, Zhang Min *et al.*. Optical Fiber Sensing Techniques and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 7~19
廖延彪, 黎敏, 张敏等. *光纤传感技术与应用*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. 7~19
- 15 J. Blake. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. *IEEE T. Power Deliver.*, 1996, **11**(1): 116~121
- 16 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. 消除萨格纳克 FOCT 振动干扰的光纤补偿环研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205005
- 17 He Jingyi, Liu Deming, Zhang Xinliang *et al.*. Polarization state auto-compensated optical fiber current transducer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1678~1681
何竞翼, 刘德明, 张新亮等. 光纤偏振态自动补偿的光纤电流互感器[J]. *光学学报*, 1999, **19**(12): 1678~1681
- 18 Dong Xiaopeng, B. C. B. Chu, K. S. Chiang. Twisted fibre electric current sensor with compensation for arbitrary bias phase shift[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 981~987
董小鹏, B. C. B. Chu, K. S. Chiang. 可补偿偏置漂移的扭转 FOCT[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 981~987

栏目编辑: 王晓球