

文章编号: 0258-7025(2010)04-1058-06

基于环状梯度折射率磁光玻璃的电流传感方法

王美蓉 赵建林 刘 圣 万 洵 刘 飞 张 鹏

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 为消除块状光学玻璃型电流传感器中反射相移对测量精度的影响,提出了一种折射率呈梯度分布的环形磁光玻璃传感头结构。该环形磁光玻璃的内外两侧均为折射率渐变层,中间为折射率均匀层。同时,为便于信号光的输入输出耦合,该环形磁光玻璃上有一定大小的开口。理论分析表明,在一定条件下,光线在环形磁光玻璃中传播时,可不再与玻璃和空气界面试触,从而可以有效地避免反射相移的影响,提高传感器的测量精度。通过数值模拟分析了环形磁光玻璃的结构参数对光线传播轨迹以及有效初始角的影响。结果表明,通过合理设计环形磁光玻璃的结构参数,可以得到具有较大有效初始角且无反射相移的高灵敏度磁光玻璃型电流传感器。

关键词 传感器;电流传感器;环形磁光玻璃;梯度折射率;反射相移

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1058

An Optical Sensing Method of Current Based on Annular Graded-Index Magneto-Optical Glass

Wang Meirong Zhao Jianlin Liu Sheng Wan Xun Liu Fei Zhang Peng

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract We propose a novel optical element for bulk glass Faraday current sensor to avoid the influences of the reflection phase shift in traditional bulk glass current sensors. An annular graded-index magnetic-optic glass with an opening is designed as the sensing head, in which the inner and outer layers possess gradient indices, while the center layer is uniform. The theoretical analyses show that since the light propagating in the sensing head can not reach the interface between the magnetic glass and air, the reflection phase shift could be avoided essentially, resulting in dramatically enhancement of the sensitivity. The influences of the geometrical parameters on the beam traces and the effective range of the initial angle are numerically simulated. It is revealed that this sensing head with high sensitivity, large effective range of the initial angle and no reflection phase shift can be obtained by choosing proper parameters of the annular magnetic-optic glass.

Key words sensors; current sensor; annular magneto-optical glass; graded-index medium; reflection phase shift

1 引 言

光学电流传感器是一种集光纤技术、光电技术以及先进信号处理技术等多个学科领域的理论和应用于一体的新型高压电流传感器。与传统的电磁式电流传感器相比,光学电流传感器具有测量精度高、体积小、重量轻、绝缘性能优良、动态范围大等优点,因而在电力工业中具有广泛的应用前景^[1~3]。随着电压等级的升高,光学电流传感器更加显示出其独

特的优越性。迄今为止,所提出的众多类型的光学电流传感器中,较为成熟的是块状光学玻璃型电流传感器^[4,5]。它采用具有较高费尔德常数的整块磁光玻璃制作传感头。由于传感头部分不用光纤,因而不受光纤中的各类双折射的影响,并且其长期稳定性优于全光纤型电流传感器,故目前商品化的光学电流传感器主要采用这种结构。

在现有的块状光学玻璃型传感头结构中,为了

收稿日期:2009-05-15;收到修改稿日期:2009-07-22

作者简介:王美蓉(1977—),女,博士研究生,主要从事光电检测及光纤传感器方面的研究。

E-mail:meirong_wang@nwpu.edu.cn

导师简介:赵建林(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术及应用方面的研究。

E-mail:jlzhao@nwpu.edu.cn(通信联系人,中国光学学会高级会员号:S040420657S)

使信号光在传感头中环状被测电流母线传播,将不可避免地引入反射结构。当线偏振光在磁光玻璃与空气界面处发生全反射时,其两个正交反射分量相对于入射分量会出现不同大小的相位延迟,从而在两正交分量之间引入相位差,即反射相移。该反射相移使得入射线偏振光变为椭圆偏振光,大大影响了系统的测量精度^[6,7]。目前,块状光学玻璃型电流传感器的传感头内部不可避免的反射相移,是阻碍其进一步发展的主要因素。为了减小反射相移对传感器灵敏度和稳定性的不良影响,人们相继提出了临界角反射^[8~12]、双正交反射^[13]以及保偏反射膜等解决方案^[14,15]。然而在实际情况中,由于加工误差和缺陷的存在,块状玻璃型电流传感器系统中总会存在某种程度上的反射相移。为了消除反射相移的影响,本文提出一种折射率呈梯度分布的环状磁光玻璃型传感头结构,该结构中,线偏振光沿曲线轨迹传播,不与介质和空气界面相接触,从而可以避免反射相移,提高传感器的灵敏度。

2 理论分析

根据法拉第效应,外加磁场会使通过磁光介质的线偏振光的偏振面发生旋转,其旋转角 Φ_F 与外加磁场的关系可以表示为

$$\Phi_F = \int_l \mathbf{V} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}, \quad (1)$$

式中 V 为磁光介质的费尔德常数, \mathbf{H} 为磁场强度矢量, \mathbf{l} 为光波在介质中的传播距离矢量。

设一块状透明介质的折射率沿 x 方向呈抛物线变化关系,且满足

$$n^2(x) = n_0^2 [1 - (mx)^2], \quad (2)$$

式中 $m = (n_0^2 - n_2^2)^{1/2} / (n_0 a)$, n_0 为 $x = 0$ 处介质的折射率, n_2 为介质与空气分界面处的折射率, a 为折射率渐变层的厚度。当 $m^2 x^2 \ll 1$ 时,将(2)式所表示的 $n(x)$ 展开并取一级近似可得折射率随横向位置坐标呈平方变化。假设入射光线位于 xOz 平面且与 z 轴夹角为 α , 初始入射点为 $(x, 0)$ 点, 则在该平方律介质中的光线轨迹可表示为^[16]

$$x(z) = \left(\frac{\sin \alpha}{m} \right) \sin \left(\frac{mz}{\cos \alpha} + \varphi_0 \right), \quad (3)$$

(3) 式表明,在这种梯度折射率介质中,光线的轨迹呈正弦状,其幅值和周期分别为 $A = \sin \alpha / m$ 和 $T = 2\pi \cos \alpha / m$, 如图 1 所示。

显然,当 $A < a$ 时,光线将在到达界面前即发生偏折,不会与界面发生接触。但在曲线轨迹的顶点

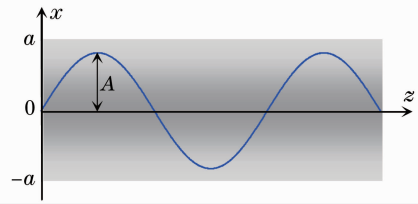


图 1 梯度折射率介质中光线的传播轨迹

Fig. 1 Beam trace in graded-index medium

处,仍可以看作是发生了全反射,此时引入的相位延迟称为弯曲相移。当 $x \rightarrow A$, 即光线在曲线顶点处的入射角 $\gamma \rightarrow \pi/2$ 时,根据菲涅耳公式可以得出 TE 波和 TM 波的弯曲相移都等于 π ^[17]。因此,当线偏振光在梯度折射率介质中传播时,在光线传播轨迹的顶点位置处,其两正交分量之间的弯曲相移相等,即入射的线偏振光在发生偏折的过程中偏振态保持不变,因而不会引入反射相移,从而可以避免反射相移对光波偏振状态的影响。根据光波在梯度折射率介质中的这种传播特性,可设计出一种折射率呈梯度分布的环状磁光玻璃型光学电流传感器的传感头结构。光线在该环状传感头中沿周期性曲线轨迹传播,并不与磁光玻璃和空气界面相接触,从而有效地消除了反射相移的影响。

3 传感头设计及分析

所设计的传感头结构如图 2 所示,其敏感元件为一环形磁光玻璃,其折射率沿环线方向均匀分布,沿横向呈梯度分布,在该环形磁光玻璃的环壁上加工一圆心角为 θ_0 的开口,其折射率分布为

$$\begin{cases} n^2(r) = n_0^2 [1 - m^2 (R_2 - r)^2], & R_1 \leq r < R_2 \\ n^2(r) = n_0^2, & R_2 \leq r \leq R_3 \\ n^2(r) = n_0^2 [1 - m^2 (r - R_3)^2], & R_3 \leq r \leq R_4 \end{cases} \quad (4)$$

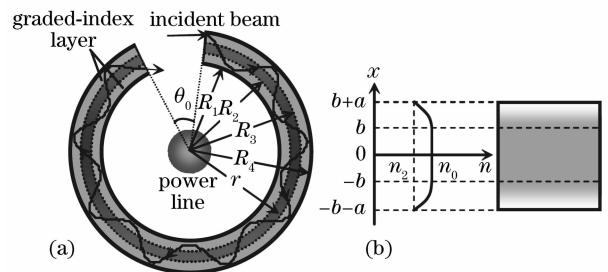


图 2 基于梯度折射率磁光玻璃的光学电流传感器传感头结构(a)和横截面折射率分布(b)示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sensing head with graded-index layer (a) and the transverse refractive index distribution (b)

式中 $n_2 = n(R_4) = n(R_1)$, $a = R_2 - R_1 = R_4 - R_3$ 。结合上述理论分析可知,光线在该环形磁光玻璃的折射率渐变层中将沿曲线轨迹传播,而在中间的均匀层中将仍然保持直线传播。因此,可以预测图 2 中从环形磁光玻璃右侧端面入射的信号光,在初始入射角满足一定条件时,其传播轨迹将被限制在环形磁光玻璃内部,最终到达左侧端面出射,并且转向时不会到达环形磁光玻璃的侧面边界。被测电流母线穿过环形磁光玻璃的中心,且在母线周围产生闭合的环形磁场。此时,磁力线和环形磁光玻璃构成同心圆环。

当线偏振光在环形磁光玻璃中环绕母线电流传播时,其偏振面的法拉第旋转角 Φ_F 可表示为

$$\Phi_F = \int_l \mathbf{VH} \cdot d\mathbf{l} = N_i N_l V \int_0^{2\pi - \theta_0} \frac{I}{2\pi r} r d\theta = \frac{2\pi - \theta_0}{2\pi} N_i N_l V I, \quad (5)$$

式中 θ_0 为开口所对应的圆心角, N_i 为穿过磁光玻璃中心的母线电流的根数, I 为单根母线中的电流强度, N_l 为光线在传感头中环绕母线电流传播的圈数。(5) 式表明,法拉第旋转角 Φ_F 正比于 N_i , N_l , 母线电流和磁光玻璃的费尔德常数,而与环形磁光玻璃的半径和光线的传播轨迹无关。显然,环形磁光玻璃的开口大小直接影响法拉第旋转角 Φ_F 的大小。开口越小,法拉第旋转角 Φ_F 越大,且抗外场干扰的能力越强,传感头的测量灵敏度和稳定性越高。因此,在设计传感头时,应根据实际输入和输出光耦合器的大小来确定开口角的大小。为讨论方便,(5) 式中假设整个环形磁光玻璃的费尔德常数是均匀的。需要注意的是,一般情况下,费尔德常数 V 是温度和波长的函数,此时,母线电流引起的温度场对磁光玻璃的费尔德常数产生的影响应予以考虑。不过,对于抗磁性材料而言,其费尔德常数受温度影响很小,因此通常可以忽略。此外,折射率的梯度变化也可能会导致费尔德常数 V 发生一定的变化。因此,实际测量中可采用定标的方式来确定光束的法拉第旋转角 Φ_F 。

将环形磁光玻璃分割成许多折射率不同的环状介质薄层,在薄层边界处根据折射定律确定光线的传播方向,当初始入射点为 $r_0 + b$ 时,经推导可得

$$\frac{r_0 + b + a}{r_0 + b} \leq \frac{n_0}{n_2}, \quad (6)$$

式中 $r_0 = (R_2 + R_3)/2$, $2b = R_3 - R_2$ 为均匀层厚度。(6) 式表明,只有当所设计的磁光玻璃传感头参数 a, b, r_0, n_0 和 n_2 满足上述条件时,光线才能在环形

磁光玻璃中沿周期性曲线轨迹传播,并且不与玻璃和空气界面相接触,从而避免反射相移的影响。

如果进一步在上述环形磁光玻璃的出射端面增镀一层特殊的反射膜^[18,19],并合理选择入射角、基底玻璃折射率、膜介质折射率及膜厚波长比等参数,则可以使薄膜实现理想的保偏反射。当入射到该薄膜上的线偏振光被反射后,将不会产生反射相移,并且将在环形磁光玻璃内部沿曲线轨迹反向传播,最后从原入射端面出射,其光线的传播轨迹如图 3 所示。这样可使光线在环形磁光玻璃中的有效光程增大至未镀保偏反射膜情况下的 2 倍,即 $N_l = 2$,从而使得传感器的灵敏度提高 1 倍。同时还可以使传感器系统更加紧凑。不过,当所选参数偏离理想值时,将会对保偏反射膜的保偏特性产生不同程度的影响,此时,光束的反射过程将不再满足严格意义下的保偏反射^[20]。

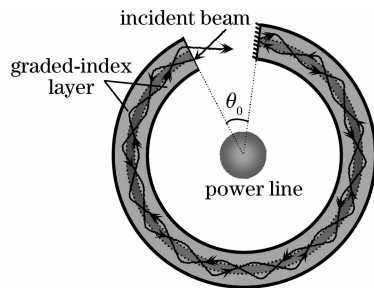


图 3 通过镀保偏反射膜倍增有效光程的方法示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the method for doubling the effective optical length by employing a reflection coating

4 数值模拟及讨论

利用 Matlab 编程对所设计的环形磁光玻璃中的光线传播轨迹进行了数值模拟。所取结构参数如图 4 所示。其中均匀层厚度为 $2b$, 折射率为 n_0 , 中心位置记为 r_0 , 渐变层厚度为 $a = R_4 - R_3$, 折射率由(4) 式给出。模拟过程中,将环形磁光玻璃分割成许多折射率不同的环状介质薄层,在薄层边界处根

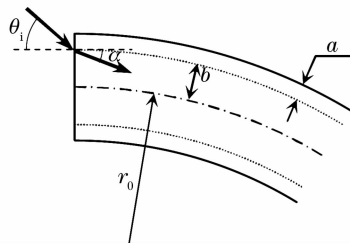


图 4 环形磁光玻璃开口处光线径迹示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the beam trace at the opening of the annular magneto-optical glass

据折射定律确定光线的传播方向。令入射光线在环形磁光玻璃开口处端面的初始入射点为 $r_0 + b$ ，入射角为 θ_i ，则其在介质中的折射角 α (折射光线与薄层切线的夹角，为简便起见，以下简称为初始角) 可由关系式 $n_0 \sin \alpha = \sin \theta_i$ 给出。考虑到环形磁光玻璃的开口对光线传播轨迹的研究影响不大，为方便起见，模拟中假定环形磁光玻璃无开口。

图 5 所示为不同参数情况下，初始角 α 对光线在环形磁光玻璃中传播轨迹影响的数值模拟结果。其中图 5(a)~(d) 对应的结构参数为 $n_0 = 1.9, n_2 = 1.5, a = 2 \text{ mm}, b = 0 \text{ mm}, r_0 = 20 \text{ mm}$ ，相应的初始角分别为 $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 54.7^\circ$ 。可以看出，随着初始角的增大，线偏振光在环形磁光玻璃中传播轨迹的幅值和周期逐渐增大[图 5(a), (b)]。当 $0^\circ \leq \alpha < \gamma_c = 29.7^\circ$ 时，线偏振光在环形磁光玻璃中沿周期性曲线轨迹传播，不与磁光玻璃 - 空气界面相接触，从而不存在反射相移，故 γ_c 为初始角的临界值。当 $\gamma_c \leq \alpha < \gamma' = 54.62^\circ$ 时，线偏振光将在外圈渐变层-空气界面发生全反射[图 5(c)]，则 γ' 为该全反射临界角。此时光线与环形磁光玻璃 - 空气界面发生接触，线偏振光在全反射后变为椭圆偏振光，存在反射相移，显然这种情况不符合设计的要求。当 $\alpha > \gamma'$ 时，光线将逐渐泄露出去而不能被约束在环形磁光玻璃中传播[图 5(d)]。因此，对于具有特定参数的环形磁光玻璃而言，初始角的有效范围为 $0^\circ \leq \alpha < \gamma_c$ 。在该范围内，光线能被很好地约束在环形磁光玻璃内部并沿周期性曲线轨迹向前传播，不会与环形磁光玻璃-空气界面接触，因而可以避免反射相移。图 5(e)~(h) 对应环形磁光玻璃的结构参数为 $n_0 = 1.6, n_2 = 1.5, a = 0.5 \text{ mm}, b = 4 \text{ mm}, r_0 = 20 \text{ mm}$ ，该参数接近现有的梯度折射率玻璃制造工艺，所对应的初始角分别为 $\alpha = 5^\circ, 10^\circ,$

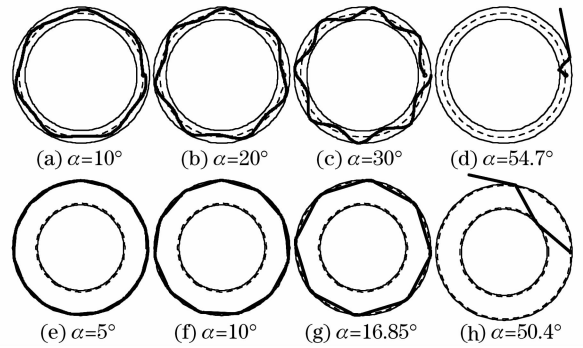


图 5 不同结构参数情况下，初始角对光线传播轨迹影响的数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation of the beam traces versus the initial angles under various geometric structure factors $16.85^\circ, 50.4^\circ$ 。显然，在该结构参数下，环形磁光玻璃中初始角的有效范围显著减小 ($0^\circ \leq \alpha < \gamma_c = 16.85^\circ$)，并且随着初始角的增大，光线轨迹的周期变大，周期数迅速减小。当 $16.85^\circ \leq \alpha < \gamma' = 50.36^\circ$ 时，线偏振光将在外圈渐变层-空气界面发生全反射[图 5(g)]。当 $\alpha > \gamma' = 50.36^\circ$ 时，光线发生泄露[图 5(h)]。由以上模拟结果可以看出，就目前的梯度折射率玻璃制造工艺而言，加工出能够完全克服反射相移影响的传感头是可行的。

图 6(a), (b) 分别给出了当初始入射点为 $r_0 + b$ ， $n_0 = 1.9, n_2 = 1.5, a = 2 \text{ mm}, b = 1 \text{ mm}$ 时， γ_c 和 γ' 随 r_0 变化的关系曲线和 $b = 1 \text{ mm}, r_0 = 30 \text{ mm}$ 时， γ_c 和 γ' 随 a 变化的关系曲线。图 6 中区域 I 表示初始角的有效范围，光线约束在磁光玻璃内部；区域 II 表示光线在外圈渐变层-空气界面发生全反射的范围。由图 6 可知，随着环形磁光玻璃中心半径 r_0 的增大，初始角的有效范围和发生全反射时的临界角均逐渐增大[如图 6(a) 所示]；随着渐变层厚度 a 的增加，初始角的有效范围和发生全反射时的临界角值反而减小[如图 6(b) 所示]。

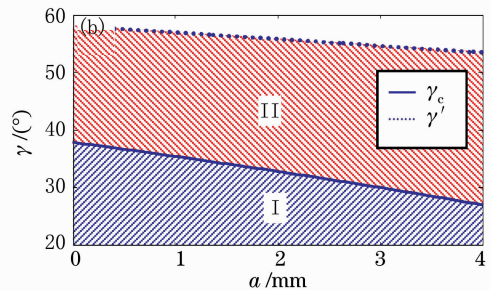
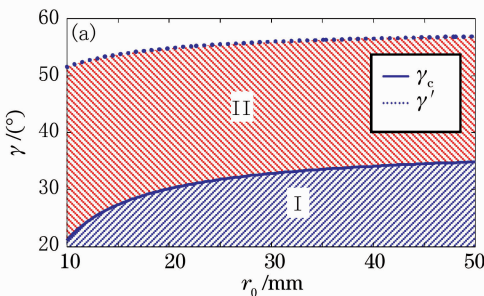


图 6 (a) γ_c 和 γ' 与 r_0 的关系曲线；(b) γ_c 和 γ' 与 a 的关系曲线

Fig. 6 (a) γ_c and γ' versus r_0 ; (b) γ_c and γ' versus a

图 7(a), (b) 分别给出了当初始入射点为 $r_0 + b$ ， $n_0 = 1.9, n_2 = 1.5, a = 1 \text{ mm}, r_0 = 20 \text{ mm}$ 时， γ_c 和

γ' 随 b 变化的关系曲线和 $n_0 = 1.5, a = 1 \text{ mm}, b = 1 \text{ mm}, r_0 = 20 \text{ mm}$ 时， γ_c 和 γ' 随 Δn 变化的关系曲

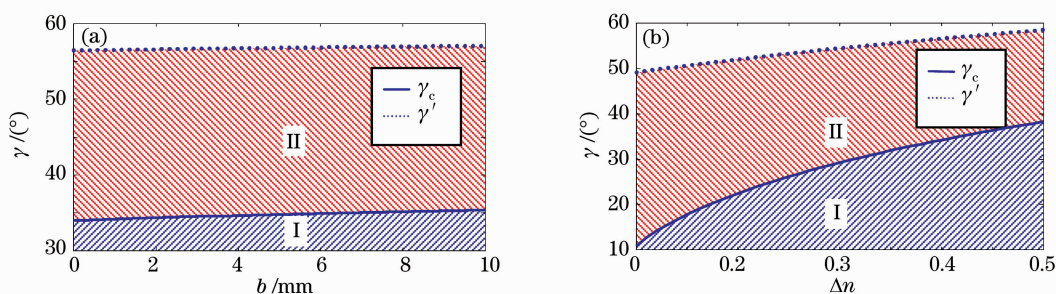


图7 (a) γ_c 和 γ' 与 b 的关系曲线; (b) γ_c 和 γ' 与 Δn 的关系曲线

Fig. 7 (a) γ_c and γ' versus b ; (b) γ_c and γ' versus Δn

线。可以看出,随着均匀层厚度 b 的增加, γ_c 和 γ' 缓慢增加,而随着折射率梯度 Δn 的增大, γ_c 和 γ' 增加迅速。因此,当均匀层厚度 b 和折射率梯度 Δn 逐渐增大时,初始角的有效范围增大,反之亦然。

综上分析,对于所提出的这种环形磁光玻璃传感头结构,要保证传感头具有较大的初始角度范围,需要选取合适的结构参数,如中心半径 r_0 和折射率差 Δn 不能太小,渐变层的厚度 a 不能太大。而对均匀层厚度 b 的选取,则没有太多的要求。

5 结 论

根据光线在梯度折射率介质中的传播特性,提出了一种基于环形梯度折射率磁光玻璃的新型电流传感器探头结构。理论和数值模拟分析了光线在环形磁光玻璃中的传播轨迹以及初始角的有效范围。结果表明,由于光线在环形磁光玻璃中沿曲线轨迹周期性向前传播,不再与磁光玻璃-空气界面接触,从而避免了传统光学玻璃型电流传感器中反射相移对系统测量精度的影响。对不同参数的环形磁光玻璃中光线传播轨迹的数值模拟结果表明,增大环形磁光玻璃的折射率梯度 Δn , 均匀层的厚度 b 和中心半径 r_0 , 或者减小梯度折射率层的厚度 a , 均可以有效地增大初始角的取值范围。在有效取值范围之内,增大初始角 α , 光线轨迹的周期增大,周期数减小,但传感器的灵敏度不会发生改变。因此,通过选择适当的环形磁光玻璃参数,如折射率梯度、梯度渐变层的厚度和初始角度,可以获得无反射相移的高灵敏度磁光玻璃型电流传感器。

参 考 文 献

- 1 N. Ning, Z. P. Wang, A. W. Palmer *et al.*. Recent process in optical current sensing techniques [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(5):3097~3111
- 2 C. S. Li, T. Yoshino. Simultaneous measurement of current and voltage by use of bismuth germanate crystal [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(25):5391~5397

- 3 B. Lee. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**:57~79
- 4 Peng Hui, Su Yang, Li Yuquan. Research of the effect of the linear birefringence on the performance of FBG sensor for measuring magnetic field [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2):196~199
- 5 彭 晖, 苏 洋, 李玉权. 光纤线双折射对光栅磁场传感器性能影响的理论分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(增刊2):196~199
- 5 Kang Chong, Lü Wenlei, Ouyang Hong *et al.*. The separate detection of linear birefringence and Faraday effect in optical current transformer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):163~168
- 康 崇, 吕文磊, 欧阳鸿 等. 光学电流互感器中性线双折射与法拉第效应的分离检测 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):163~168
- 6 Kang Chong, Wang Zhengping, Huang Zongjun *et al.*. Influence of reflection-induced-retardance of non-polarizing beam splitter upon the polarization state of the output light of Faraday mirror optical current transformer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12):1857~1860
- 康 崇, 王政平, 黄宗军 等. 无偏振效应分束器反射相移对法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振态的影响 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(12):1857~1860
- 7 H. Katsukawa, H. Ishikawa, H. Okajima *et al.*. Development of an optical current transducer with a bulk type Faraday sensor for metering [J]. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1996, **11**(2):702~707
- 8 Y. N. Ning, B. C. B. Chu, D. A. Jackson. Miniature Faraday current sensor based on multiple critical angle reflections in a bulk-optic ring [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24):1996~1998
- 9 G. D. Li, M. G. Kong, G. R. Jones *et al.*. Sensitivity improvement of an optical current sensor with enhanced Faraday rotation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(12):2246~2252
- 10 B. Yi, B. C. B. Chu, K. S. Chiang *et al.*. New design of optical electric-current sensor for sensitivity improvement [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2000, **49**(2):418~423
- 11 M. R. Wang, W. M. Zhou, P. Zhang *et al.*. Optical fiber current sensor based on Bi₄Ge₃O₁₂ crystal with enhanced Faraday rotation by critical angle reflections [C]. *SPIE*, 2007, **6279**:627911
- 12 Wang Meirong, Zhou Wangmin, Zhao Jianlin *et al.*. Optical fiber current sensor based on BGO crystal with enhanced Faraday rotation by reflections [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1186~1190
- 王芙蓉, 周王民, 赵建林 等. 基于BGO晶体的反射型法拉第光纤电流传感器 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(6):1186~1190
- 13 E. N. Li, J. M. K. MacAlpine, Y. B. Liu *et al.*. A novel optical current transducer for power systems [J]. *Electric*

- Power Systems Research*, 1998, **46**:21~25
- 14 K. B. Rochford, A. H. Rose, M. N. Deeter *et al.*. Faraday effect current sensor with improved sensitivity-bandwidth product [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(22):1903~1905
- 15 T. Yoshino, M. Gojyuki, Y. Takahashi *et al.*. Single glass block Faraday effect current sensor with homogeneous isotropic closed optical circuit [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(22):5566~5573
- 16 Zhao Jianlin. *Advanced Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 69~72
赵建林. 高等光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 69~72
- 17 She Shouxian. *Physical Fundamental of Guided Wave Optics* [M]. Beijing: Northern Jiaotong University Press, 2002. 28~30
- 余守宪. 导波光学物理基础[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002. 28~30
- 18 Z. P. Wang, Z. J. Huang, C. Kang *et al.*. Optical current sensing element with single medium layers for high voltage applications [J]. *Optics & Laser Technol.*, 1999, **31**:455~458
- 19 B. Yi, B. C. B. Chu, K. S. Chiang. Magneto-optical electric-current sensor with enhanced sensitivity [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**(7):61~63
- 20 Zhang Shengwu, Huang Feng, Li Ming *et al.*. Process control of high reflectance mirrors preparation in transition region by reactive magnetron sputtering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1):198~204
张盛武, 黄 烽, 李 明 等. 在反应磁控溅射过渡区制备高反射膜的工艺控制[J]. 中国激光, 2009, **36**(1):198~204