

圆双折射光栅的传输和偏振特性研究及 磁场传感应用

苏 洋 朱 勇 益晓新 李玉权

(中国人民解放军理工大学通信工程学院光纤通信实验室, 江苏 南京 210007)

摘要 从原理上阐述了圆双折射光纤光栅中的传输特性和偏振特性。通过坐标变换,得到圆双折射光栅的琼斯矩阵,并基于此详细分析了磁场大小、传输距离和入射光偏振态对透射光传输特性和偏振特性的影响。结果表明,一定大小的磁致圆双折射将使透射光谱产生分裂,透射光偏振态随磁场和波长变化。同时偏振相关损耗和第三斯托克斯参量与外加磁场大小在一定范围内呈单调变化关系,可由此实现对磁场的监测。测量范围和灵敏度由光栅材料和结构决定,给出了由 Bi-YIG 和 YIG 材料作为传感媒质可实现的动态范围。

关键词 物理光学;法拉第效应;光栅;磁场测量;偏振相关特性

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0626001

Transmission and Polarization Properties of Circular-Birefringence Fiber Gratings and Their Applications in Magnetic-Field Sensor

Su Yang Zhu Yong Yi Xiaoxin Li Yuquan

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract The transmission and polarization properties of circular birefringence fiber gratings are analyzed. Based on the Jones matrix and the coordinate conversion, the evolutions with wavelength of transmission spectrum and the polarization properties of output light with different magnetic field intensities, grating lengths and incident states of polarization (SOP) are analyzed. The results show that circular birefringence leads to the splitting of transmission spectrum and variation of transmitted SOP for different wavelengths. It is demonstrated that the polarization-dependent loss (PDL) and the third Stocks parameter increase monotonously with applied magnetic field, and they can be used in magnetic field sensor. The measurement range and sensitivity are dependent on the grating structure and material. The dynamic measurement range of Bi-YIG and YIG fiber gratings are both given.

Key words physical optics; Faraday effect; gratings; magnetic field sensing; polarization-dependent properties

OCIS codes 260.2110; 260.5430; 280.4788; 050.2770

1 引 言

光纤光栅作为一种成熟的全光纤器件,由于其具有体积小、插入损耗低和易于与其他光纤器件集成等特点,在光纤通信和光纤传感领域中有着非常重要的应用。目前多数是利用波长偏移量进行温度传感和应力传感^[1~5]。对于磁场测量方法,主要的原理有法拉第效应、洛伦兹力效应和磁致伸缩效应

等^[6~8]。利用光纤光栅测量磁场的传统方法主要应用磁致伸缩效应,即利用磁场使磁致伸缩材料在光栅中产生应力,从而引起波长漂移。Kersey 等^[9]等描述了一种用于监测磁场的光纤光栅探头,利用干涉检测方法检测由磁致圆双折射引起的光栅布拉格波长的位移,从而测量磁场。这种方法与常规温度、应力传感一样,利用外界参量引起波长漂移达到传

收稿日期: 2010-11-04; 收到修改稿日期: 2011-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(60871075)和中国博士后科学基金(20090451500)资助课题。

作者简介: 苏 洋(1980—),女,博士,讲师,主要从事光传感技术方面的研究。E-mail: qieziyangyang@163.com

感的目的,因此需要有高分辨率的波长检测单元。为了提高磁致圆双折射,从而提高磁场测量的灵敏度,Arce 等^[10]提出可采用掺稀土离子的材料制成光栅。邱昆等^[11]提出使用磁性钇铁石榴石(YIG)材料得到高磁光性能光纤,拉制成为磁光光栅,从而增强法拉第效应。

近来的研究表明,光参数中的偏振特性也会对外界变量敏感,Caucheteur 等^[12,13]利用光纤光栅中的双折射效应引起的偏振特性的改变进行了横向力的测量。因此本文以分析圆双折射光纤光栅中的偏振特性为目的,通过坐标变换,得到了圆双折射光栅中传输光的琼斯矩阵,进而分析了磁场大小、光栅长度和入射光偏振态(SOP)等因素对传输特性和偏振特性的影响。研究表明,法拉第效应使光栅内部出现了偏振模式的转换,可以用磁场控制传输光的偏振态。最后,基于对传输光偏振相关特性的监测,实现了对磁场的测量。测量的灵敏度和范围取决于光栅的结构和材料,这为磁场检测提供了一种新的途径。

2 基础理论

在均匀布拉格(Bragg)光栅中的布拉格谐振条件为 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$,其中 λ_B 为布拉格中心波长, n_{eff} 是光栅的纤芯折射率, Λ 是光纤布拉格光栅(FBG)的周期。当沿光栅方向有外加磁场时,法拉第效应使光纤光栅中的左旋和右旋两个圆偏振光之间出现了折射率差,称之为磁致圆双折射 Δn_C 。与这两个圆偏振相关的有效折射率则为 $n_{\text{eff,L}} = n_{\text{eff}} + \Delta n_C/2$ 和 $n_{\text{eff,R}} = n_{\text{eff}} - \Delta n_C/2$ 。因此就出现了两个布拉格条件^[9]:

$$\lambda_{B,L(R)} = 2n_{\text{eff,L(R)}}\Lambda. \quad (1)$$

式中 $n_{\text{eff,L(R)}}$ 为左旋和右旋光的折射率 $n_{\text{eff,L}}$ 和 $n_{\text{eff,R}}$ 的统一表示。这两个布拉格波长的间距与磁场的大小成正比。此时圆双折射导致了光栅的透射谱发生分裂,左、右旋圆偏振光的透射系数分别为 t_L 和 t_R ^[9,10]。因此在圆坐标系中,得到圆双折射光栅的

琼斯矩阵 $\mathbf{J}_C = \begin{bmatrix} t_R & 0 \\ 0 & t_L \end{bmatrix}$,假设入射光的琼斯矢量为 $[E_{i,R}, E_{i,L}]$,透射光琼斯矢量为 $[E_{t,R}, E_{t,L}]$,则得到传输方程为

$$\begin{bmatrix} E_{t,R} \\ E_{t,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_R & 0 \\ 0 & t_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i,R} \\ E_{i,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_R E_{i,R} \\ t_L E_{i,L} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在圆坐标系中,左旋与右旋圆偏振光不发生耦合,分别对应不同的透射系数,这与从耦合模方程中推导的结论一致^[11]。由于左、右旋圆偏振光与线偏振光单位矢量之间存在关系^[14]

$$\mathbf{e}_R = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e}_x - j\hat{e}_y), \quad \mathbf{e}_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e}_x + j\hat{e}_y). \quad (3)$$

从(2)和(3)式中推导得到笛卡儿坐标系中圆双折射光栅的传输方程:

$$\begin{bmatrix} E_{t,x} \\ E_{t,y} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{T_{xy}} \begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(t_R + t_L) & -\frac{1}{2}j(t_R - t_L) \\ \frac{1}{2}j(t_R - t_L) & \frac{1}{2}(t_R + t_L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{式中 } \mathbf{J}_{T_{xy}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(t_R + t_L) & -\frac{1}{2}j(t_R - t_L) \\ \frac{1}{2}j(t_R - t_L) & \frac{1}{2}(t_R + t_L) \end{bmatrix} \text{ 为}$$

笛卡儿坐标下的琼斯矩阵。

对于均匀磁光光栅,左右旋圆偏振光的透射系数为^[15]

$$t_{R(L)} = \frac{iq_{R(L)}}{\sigma_{R(L)} \sin[q_{R(L)}L] + iq_{R(L)} \cos[q_{R(L)}L]}, \quad (5)$$

式中 $q_{R(L)} = \sqrt{(\delta \pm \kappa_m)^2 - \kappa_g^2}$, $\delta = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right)$ 是失谐量, L 是光栅长度, $\kappa_m = \frac{k_0 f_1 M_{xz}}{2n_{\text{eff}}}$ 是与模式转换相关的磁光耦合系数, f_1 为一级磁光系数, M_{xz} 是 z 方向上的磁化强度^[15], $\kappa_g = k_0 \delta n = \frac{2\pi \delta n}{\lambda}$,其中 δn 是折射率调制系数, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是真空中传输常数,Bi-YIG和纯YIG材料的一级磁光系数分别为 $f_1 = 2.88 \times 10^{-8}$ (m/A)和 $f_1 = 2.44 \times 10^{-9}$ (m/A)^[16]。

从(4)式的琼斯矩阵中可以看出,进行坐标转换后,不同于圆坐标,在笛卡儿坐标中,磁光法拉第效应使同一传播方向的导波光发生偏振模式转换,出射 x 方向的光不仅与 x 入射光有关,而且还和 y 方向的入射光有关。

表征光的偏振信息常用归一化斯托克斯参量 (s_1, s_2, s_3) 表示,其中 s_1 给出了 x 分量和 y 分量的强度差,其正(负)表示光波中是 x (y)线偏振占优势。 s_2 的正(负),表示 $+\pi/4$ ($-\pi/4$)线偏振分量较强。 s_3 的正、负和零分别表示波的右旋偏振态、左旋偏振态和线偏振态。

3 圆双折射光栅中透射光的传输和偏振态演变

光在圆双折射光栅中传输时,其传输特性和偏振态变化受到多种因素的影响,比如磁场的大小、传输长度和入射光的偏振态等。总透射功率为 $T = T_x + T_y$,其中 $T_{x(y)} = |E_{t,x(y)}|^2$ 。引入特征参数“磁栅耦合比” $k_r = |\kappa_m/\kappa_g|^{[17]}$,当 κ_g 确定,而 κ_m 受外加可控磁场的影响时, k_r 的值也随之变化,因此使用 k_r

的值替代磁场的相对大小。

3.1 磁场的影响

图 1 分别为不同磁场下的 T_x, T_y, T , 第三斯托克斯参数以及偏振态在庞加莱球上的表示,仿真中所取光栅参量为:光栅长度 $L=6$ mm,折射率调制系数 $\delta n = 0.6 \times 10^{-4}$,布拉格中心波长 $\lambda_B = 1550$ nm,以下仿真中参量 δn 和 λ_B 不变。仿真中假设入射光为 x 方向偏振。

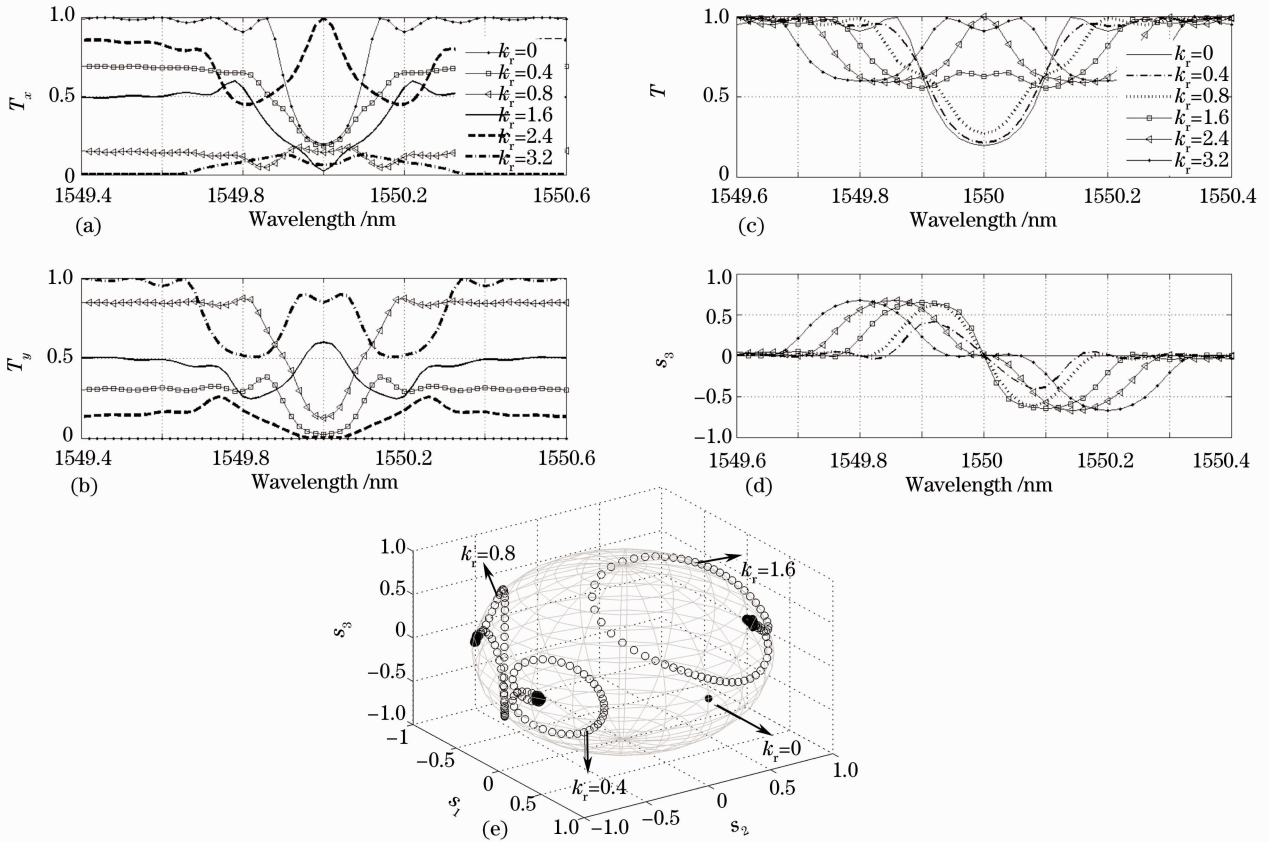


图 1 不同磁场大小下的(a),(b)传输功率分量,(c)总传输功率,(d)归一化斯托克斯参量 s_3 和(e)传输光偏振态在庞加莱球上的表示

Fig. 1 Wavelength dependency of component transmitted power (a), (b), total transmitted power (c), normalized Stokes parameter s_3 (d) and SOP (e) on Poincaré sphere of transmitted spectrum in different magnetic fields

如图 1(a)所示由于起偏角为 0,因此在无磁场时, y 方向没有透射光,但随着磁场的增加, x 方向的透射光逐渐耦合到 y 方向。由图 1(c)~(e)可见,当磁场较小时,总透射谱几乎没有变化,当磁场达到一定程度后,透射谱才分裂成两个波瓣,波瓣间隔随磁场的增加而增加,幅度稳定。当磁场较小时 s_3 的幅度随磁场单调增加,类似正弦曲线,当磁场增加到一定值后, s_3 幅度也趋于饱和,上下两峰值的间隔也随磁场逐渐增加。另外,所有波长点的偏振态在初始无磁场时都为 x 方向线偏振,外加磁场后,各波长点的偏振态在邦加球上逐渐分散,构成了一

个关于赤道对称的封闭曲线,中心波长点位于赤道上,两边的波长点分别位于右旋态和左旋态,并随磁场增加整体按顺时针方向移动。由于 s_3 反映了左旋和右旋偏振分量的强度差,因此由磁场变化导致的左旋和右旋圆偏振光透射谱的功率变化就体现在 s_3 信息中。

3.2 长度的影响

对于普通光栅,长度的增加会增加透射深度。在圆双折射光栅中,当所加磁场较小时($k_r = 0.2$),光栅长度起了类似的作用,此时的透射谱和 s_3 的变化如图 2(a),(b)所示,透射深度逐渐增强,此时 s_3

幅度随长度单调递增。但如果磁场比较大 ($k_r = 1.5$), 那么随着长度的增加, 透射谱会发生分裂。如图 2(c), (d) 所示, 此时 s_3 的幅度饱和。但是在一定的磁场下, 长度的进一步增加并不能使分裂谱的间

隔增大, 只是使幅度趋于 0.5, 子带的间隔最终还是要取决于磁场的大小。 s_3 的幅度也随长度趋于 ± 1 , 其峰值波长对应着透射谱的两波瓣。

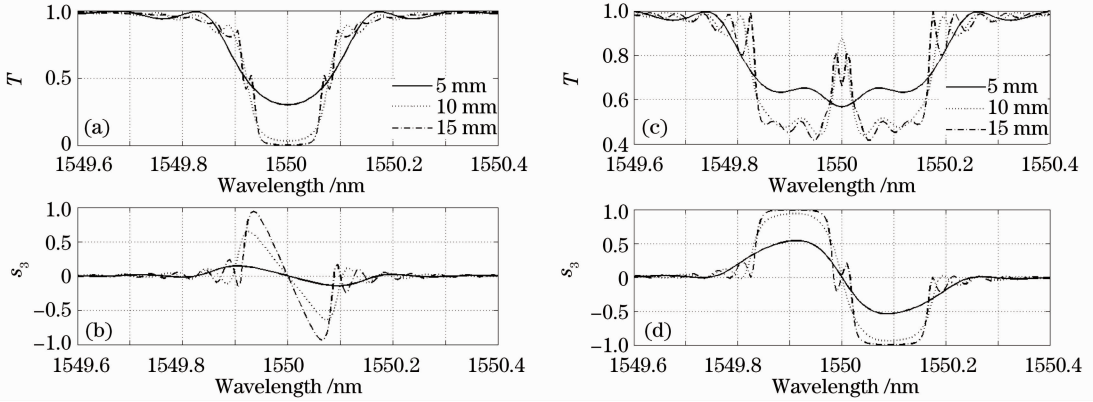


图 2 (a), (b) 小磁场和 (c), (d) 大磁场下的透射功率谱和 s_3 谱随长度的变化

Fig. 2 Influence of the grating length on transmission and polarization evolutions with wavelength under a low (a), (b) and high (c), (d) magnetic fields

3.3 入射偏振态影响

入射光可以是线偏振光, 也可以是圆偏振光或椭圆偏振光。对于线偏振光, 由于输入功率为单位 1 的线偏振光不论其起偏角为多少, 都可以分解为一个左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 而 s_3 表征了这两者功率之差, 因此 s_3 与线偏振光的起偏角无关。对于透射功率而言, 假设入射线偏振光起偏角为 θ , 则入射光可以写为 $[E_{i,x}, E_{i,y}] = [\cos \theta, \sin \theta]$, 代入 (4) 式中可以得到总透射功率 $T = |E_{t,x}|^2 + |E_{t,y}|^2 = \left| \frac{1}{2}(t_R + t_L) \right|^2 + \left| \frac{1}{2}j(t_R - t_L) \right|^2$, 这是一个与起偏角 θ 无关的值。所以线偏振光起偏角的大小并不影响总透射谱以及 s_3 参量, 这也可通过仿真得到。

圆偏振态是磁光光栅的本征态。它在 x 方向和 y 方向的透射功率相同, 总透射谱深度随长度增加, 中心波长随磁场的增加而平移。作为本征态传输, 其偏振态始终不变。

椭圆偏振光介于线偏振光和圆偏振光之间。透射谱呈不对称分布, 如图 3(a), (b) 和图 4(a), (b) 所示, 图 4 中 $L=6$ mm。仿真中可以看到, 透射深度随长度增加, 中心波长随磁场发生偏移, 变化特性类似于圆偏振光。从偏振态特性看, s_3 幅度随磁场或长度的增加而逐渐增加, 基准值不再为 0, 相应的偏振特性变化类似于线偏振光, 如图 3(c) 和 4(c) 所示。因此可知, 在磁圆双折射的作用下, 椭圆偏振光的传输特性类似于圆偏振光, 而偏振特性类似于线偏振光。

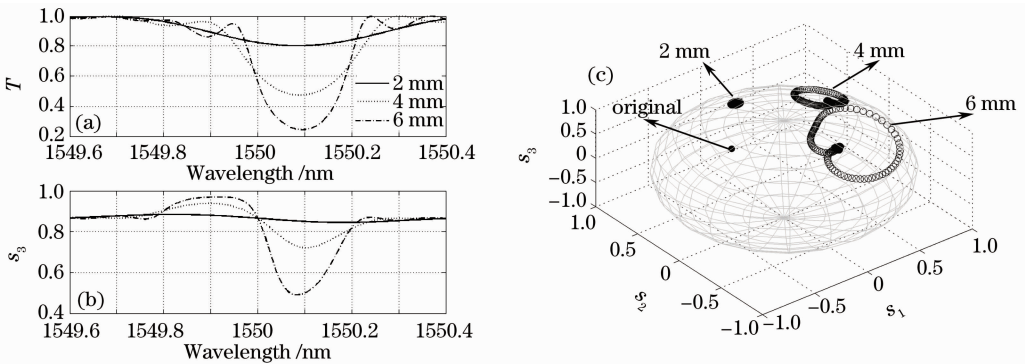


图 3 椭圆偏振光入射时, 传输距离对 (a) 透射谱, (b) s_3 以及 (c) 偏振态的影响

Fig. 3 Influence of propagation distance on the evolutions of transmission spectrum (a), s_3 (b) and SOP (c) with elliptically polarized light

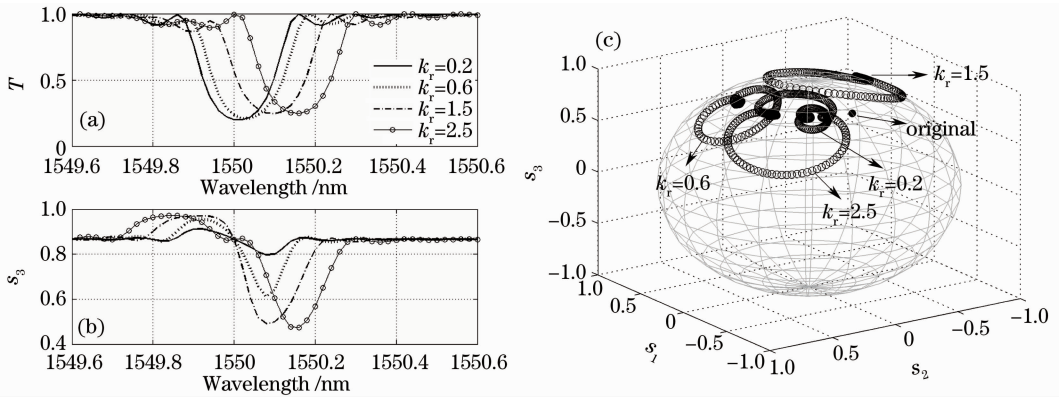

 图 4 椭圆偏振光入射时,磁场大小对(a)透射谱,(b) s_3 以及(c)偏振态的影响

 Fig. 4 Influence of magnetic field on the evolutions of transmission spectrum (a), s_3 (b) and SOP (c) with elliptically polarized light

4 磁场传感应用

对不同偏振态入射光在磁光光栅中的传输特性进行比较,图 5 为对起偏角分别为 0 和 $\pi/4$ 的线偏振光、左旋圆偏振光和右旋圆偏振光以及两种不同椭圆偏率的椭圆偏振光的透射谱进行比较。线偏振光中心波长不变,所有的线偏振光的透射谱一致,不受起偏角影响。圆偏振光和椭圆偏振光都受圆双折射的影响而发生漂移,漂移的大小取决于磁场大小。仿真中可以看到,以不同的偏振态入射时,透射功率谱的上限或下限对应着左旋或右旋圆偏振入射光的功率。

偏振相关损耗(PDL)的定义是输入信号在所有偏振态下传输功率的最大变化,如下式表示^[13]:

$$L_{PD}(\lambda) = 10 \lg \left[\frac{T_{\max}(\lambda)}{T_{\min}(\lambda)} \right], \quad (6)$$

式中 T_{\max} 和 T_{\min} 分别表示经过 FBG 的最大和最小传输光功率。结合图 5,透射功率的上、下限分别是左旋或右旋圆偏振光功率,即在圆双折射光栅中有

$$L_{PD}(\lambda) = 10 \left| \lg \left[\frac{T_R(\lambda)}{T_L(\lambda)} \right] \right|. \quad (7)$$

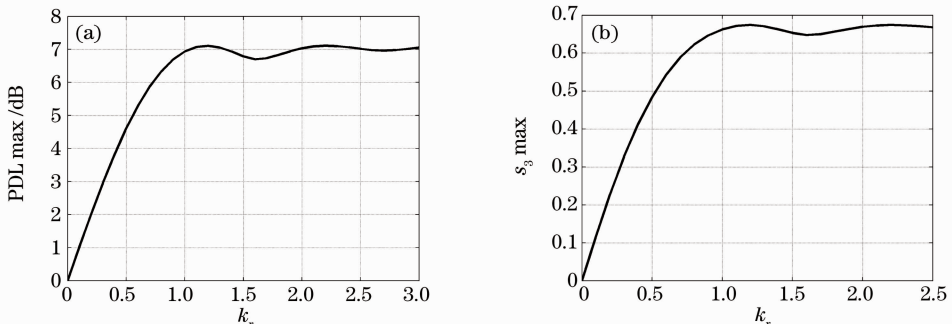

 图 6 (a)PDL 峰值和(b) s_3 峰值随磁场变化

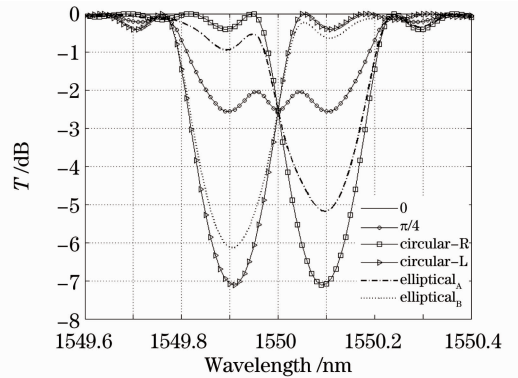
 Fig. 6 Maximum of PDL (a) and maximum s_3 (b) versus magnetic field


图 5 不同偏振态入射后的传输谱

Fig. 5 Transmission spectrum with different input SOPs 在磁场较小的情况下,PDL 与磁场大小单调递增,并且随着磁场的增大,PDL 值逐渐饱和。PDL 峰值与磁场关系如图 6(a)所示。结果表明:在一定的测量范围之内,PDL 随磁场强度单调递增关系,逐渐增大磁场,PDL 进入非线性区,最后趋于饱和。 s_3 峰值也具有类似的特性,如图 6(b)所示。因此在单调递增区域,可以利用传输光的偏振相关特性实现对磁场的测量。磁场测量的动态范围和灵敏度都取

决于光栅结构和材料。

Kersey 等^[9]提出的基于光纤光栅的检测方法是利用干涉检测方法检测由磁致圆双折射引起的光栅中心波长的漂移,但当磁场相对较小时,如图 1(c),(d)所示,当 $k_r \in [0 \sim 0.8]$,磁场的增加并没有使透射谱发生明显的变化,因为此时 T_R 和 T_L 的谱非常接近,由于波长位移很小且测量器件的分辨率有限,导致在光栅透射幅度响应中很难察觉到磁场的影响,只有当磁场进一步增加时,透射谱才会发生明显分裂,并且在分裂的初期,这两个波瓣间距也并不是左旋、右旋透射峰的间距。只有当磁场足够大时,透射谱的波瓣间距才和 T_R 和 T_L 峰值间距一致。图 7 为通过数值仿真计算得到总透射谱波瓣峰值间距 $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 和本征模峰值间距 $\Delta\lambda_{R-L}$ 随相对磁场 k_r 的变化,在上述仿真所用光栅参数下,当 k_r 的值小于 1.5 时,总传输谱只表现出一个主瓣,两个模式难以分辨,即 $\Delta\lambda_{\text{peak}}=0$;而当 k_r 大于 1.5 以后,波长间隔明显,并且 $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 的值围绕着 $\Delta\lambda_{R-L}$ 上下波动,最后在 $k_r = 3.5$ 以后随磁场的增加基本与 $\Delta\lambda_{R-L}$ 一致。从这个比较中可以看出,只有当磁场相对大时,才存在波长间隔与磁场的线性关系,而当磁场相对较小时,无法通过透射谱幅度察觉到磁场的变化,这时就可以通过测量 PDL 或 s_3 值达到对外界磁场监测的目的。

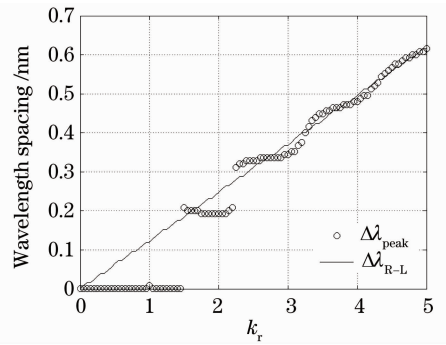


图 7 本征模峰值间距 $\Delta\lambda_{R-L}$ 以及总透射谱波瓣峰值间距 $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 与磁场的关系

Fig. 7 Evolution of $\Delta\lambda_{R-L}$ and $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ as function of magnetic field

为了提高灵敏度,可以采用掺杂稀土的 FBG^[13], 或用 YIG 等高磁光特性的材料制作光纤^[14], 并在此基础上刻制光栅。Bi-YIG 和纯 YIG 材料的一级磁光系数分别为 $f_1 = 2.88 \times 10^{-8}$ (m/A) 和 $f_1 = 2.44 \times 10^{-9}$ (m/A)^[16]。分别仿真比较了这两种材料的测量曲线,如图 8 所示,如果以单调递增范围作为测量范围,当 $L=6$ mm,折射率调制系数 $\delta n = 0.6 \times 10^{-4}$ 时, Bi-YIG 与 YIG 材料利用 PDL 峰值的测量范围分别约为 4500 (A/m) 和 50000 (A/m) 量级,利用 s_3 峰值的测量范围分别约为 6000 (A/m) 和 65000 (A/m) 量级。

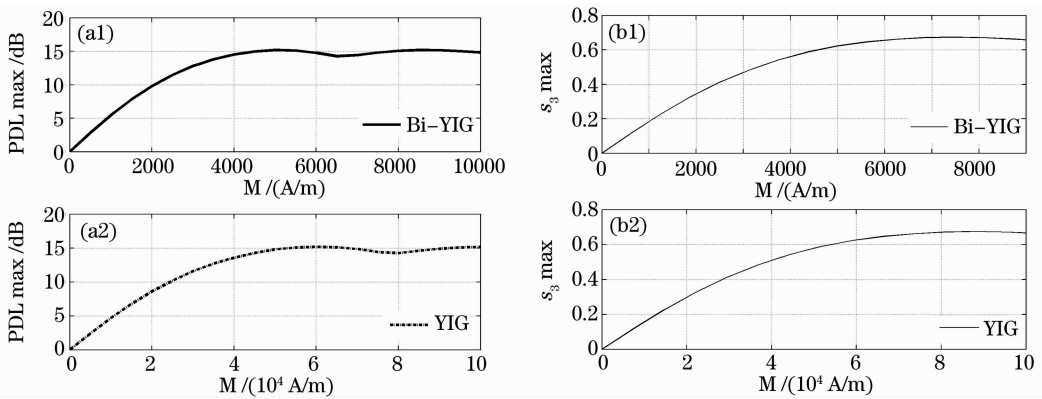


图 8 Bi-YIG 与 YIG 材料的(a1),(a2) PDL 峰值与(b1),(b2) s_3 峰值测量曲线

Fig. 8 Maximum of PDL (a1), (a2) and maximum s_3 (b1), (b2) of the fiber fabricated by Bi-YIG and YIG

5 结 论

详细分析了圆双折射光栅中光的传输特性以及偏振特性。利用圆坐标系和笛卡儿坐标系之间的坐标转换,得到了圆双折射光栅中传输光的琼斯矩阵。利用琼斯矩阵,讨论了磁场强度、光栅长度和入射光偏振态对传输特性和偏振特性的影响。分析表明,

入射线偏振光,透射谱随磁场变化发生分裂,透射光偏振态随磁场变化,并且是波长的函数;入射圆偏振光时,透射谱随磁场漂移,偏振态不变;入射椭圆偏振光时,传输特性类似圆偏振入射,而偏振特性类似线偏振入射。同时偏振相关损耗以及第三斯托克斯参量与磁场强度在一定范围内存在单调递增关系,

由此实现对磁场的监测,克服了单纯依赖波长漂移方法而不能涉及小磁场部分的缺陷。通过改变光栅材料和物理参量,可以得到不同的灵敏度和测量范围。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 2 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamental and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 3 J. Lim, Q. Yang, B. E. Jones *et al.*. Strain and temperature sensors using multimode optical fiber Bragg gratings and correlation signal processing [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2002, **52**(4): 622~627
- 4 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of the cross sensitivity of magnetic field sensor with phase-shifted grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1020~1025
冯 奎, 朱 勇, 苏 洋等. 相移光栅磁场传感方案交叉敏感分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1020~1025
- 5 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei *et al.*. Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 686~691
王 静, 冯德军, 隋青美等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 686~691
- 6 A. M. Smith. Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(1): 52~56
- 7 H. Okamura. Fiber-optic magnetic sensor utilizing the Lorentz force[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**: 1558~1560
- 8 Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian *et al.*. Research on optical current transformer based on the fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 949~953
熊燕玲, 赵 洪, 张 剑等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 949~953
- 9 A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe [C]. Proc. SPIC, Tenth International Conference on Optical Fiber Sensors, 1994, **2360**(9): 53~56
- 10 J. L. Arce, J. M. Lopez-Higuera, M. A. Muriel. A new tunable optical filter based on the faraday effect on a Bragg grating[C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1996, **2**(18-21): 307~308
- 11 Qiu Kun, Wu Baojian, Wen Feng. Nonlinear propagation of circularly polarized light in magneto-optic fiber Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1726~1730
邱 昆, 武保剑, 文 峰. 磁光纤 Bragg 光栅中圆偏振光的非线性传输特性[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1726~1730
- 12 C. Caucheteur, S. Bette, M. Wuilpart *et al.*. Transverse force sensor exploiting the birefringence effect in uniform fibre Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2007, **6585**: 65850C1-12
- 13 C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina. Transverse strain measurements using the birefringence effect in fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 2007, **19**(13): 966~968
- 14 Qian Jingren. Principles for geometrically distinguishing circular-birefringence fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 884~887
钱景仁. 圆双折射光纤的几何判别原理[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 884~887
- 15 B. J. Wu, Y. Yang, K. Qiu. Magneto-optic fiber Bragg gratings with application to high-resolution magnetic field sensors [J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2008, **6**(4): 423~425
- 16 Yang Ying, Qiu Kun, Wu Baojian. Research on sensitivity and dynamic range of magnetic field sensor based on magneto-optic fiber Bragg gratings [J]. *Optical Communication Technology*, 2009, **33**(2): 48~50
杨 颖, 邱 昆, 武保剑. 磁光纤光栅传感器灵敏度及动态范围研究[J]. *光通信技术*, 2009, **33**(2): 48~50
- 17 B. Wu, X. Liu, K. Qiu. Characteristics of magneto-optic fiber Bragg gratings for use in optical signal processing[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(2): 165~171