

非线性光纤萨尼亚克结构的磁控特性

王 卓, 武保剑, 文 峰, 周星宇, 邱 昆

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 推导了磁光非线性光纤萨尼亚克结构的传输矩阵,可用于分析光纤的双折射、磁光效应和非线性相移,偏振控制器状态以及整个光纤环总损耗对萨尼亚克透射率的影响。实验研究了萨尼亚克结构磁光调制和非线性光控光开关功能。在 0.0177 T 磁场作用下,磁光调制度可达 17.05 dB,理论分析与实验数据吻合。当时钟抽运控制信号的峰值功率为 28.2 dBm 时,光控光开关消光比可达 25.8 dB,进一步施加磁场可使开关消光比提升 0.7 dB。光控光萨尼亚克结构的磁场响应在一定程度上可以借助偏振控制状态进行等效分析。

关键词 光学器件; 光信号处理; 磁光器件; 传输矩阵; 光纤萨尼亚克结构; 光调制器; 光控光开关

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1023001

Magnetic Control Characteristics of Nonlinear Fiber Sagnac Structure

Wang Zhuo, Wu Baojian, Wen Feng, Zhou Xingyu, Qiu Kun

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications of the Ministry of Education,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract The transmission matrix of the magneto-optical (MO) nonlinear fiber Sagnac structure is deduced, which can be used to analyze the influences of fiber birefringence, MO effect, nonlinear phase shift, the polarization controller state and the total loss of the fiber loop on the transmittance of Sagnac. The MO modulation of Sagnac structure and functions of nonlinear optically-controlled-optical switch are experimentally investigated. The MO modulation degree can reach 17.05 dB under the applied magnetic field of 0.0177 T, which is in good agreement with the theoretical analysis. When the peak power of the clock pump control signal is 28.2 dBm, the extinction ratio of optically-controlled-optical switch can reach 25.8 dB. The extinction ratio of the switch can increase 0.7 dB by further applying the magnetic field. To some extent, the magnetic field response of the optically-controlled-optical Sagnac structure may be equally analyzed with the help of polarization control state.

Key words optical devices; optical signal processing; magneto-optical devices; transfer matrix; fiber Sagnac structure; optical modulator; optically-controlled-optical switch

OCIS codes 230.3810; 230.4320; 230.4110; 230.3750

1 引 言

萨尼亚克干涉结构中,相向传输的两路光信号的损耗及经过的光学路径完全相同,可以有效解决其他干涉结构因工艺误差而带来的干涉臂长度和损耗不相等的补偿问题。特别是采用光纤结构时,其还具有与输入光偏振无关、与光纤系统耦合损耗小等优势。因此,萨尼亚克干涉结构广泛应用于传感器^[1-3]、滤波器^[4-5]、光开关^[6-7]、光纤激光器^[8-9]、参数测量器件^[10-11]以及光调制器^[12-14]等光学器件中。在同一萨尼亚克结构中实现不同的功能,符合光信息处理器件的多功能集成发展趋势。

磁光(MO)萨尼亚克干涉结构是利用磁光效应改变萨尼亚克光纤环的透射率,从而实现光信号的磁光调制、磁光开关等功能。在萨尼亚克磁光调制方面,Kemmet 等^[13]通过在萨尼亚克光纤环中串联法拉第旋光镜并采用螺线管施加磁场的方式,实现了 500 Hz 的方波、三角波和正弦波磁光调制;Zu 等^[14]在萨尼亚克

收稿日期: 2017-05-02; 收到修改稿日期: 2017-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61671108,61505021)

作者简介: 王 卓(1990—),男,硕士研究生,主要从事光器件方面的研究。E-mail: wangzhuo20096@163.com

导师简介: 武保剑(1970—),男,博士,教授,主要从事光信号处理方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn(通信联系人)

环中串联磁流体并采用电磁铁施加磁场方式进行了磁光调制实验。本课题组将普通高非线性光纤(HNLF)置于螺绕环中作为磁光光纤串联在萨尼亚克环内部,测量了 HNLF 的费尔德常数^[10],并实现了温度不敏感的磁场测量^[15]。

本文以磁控光纤萨尼亚克干涉理论为基础,理论和实验研究了其磁光调制和非线性光控光开关功能,首次探索了萨尼亚克结构中磁场对非线性光控光开关性能的影响,并进行了理论分析。在 0.0177 T 磁场作用下,对连续光的磁光调制度可达 17.05 dB,理论结果与实验数据基本吻合。在光时钟抽运信号控制下,对归零(RZ)光信号的开关消光比可达 25.8 dB,进一步施加磁场可使消光比性能提升 0.7 dB。

2 磁控光纤萨尼亚克干涉理论

磁控光纤萨尼亚克干涉结构如图 1 所示(PD 表示光电二极管),主要包括:1)耦合器 1,采用 3 dB 耦合器耦合器分光比($\rho=0.5$)将端口 1 的输入光信号分波并将光纤环内的光信号干涉输出到端口 2;2)耦合器 2,用于将高功率抽运光信号耦合进萨尼亚克环,实现光控光开关功能;3)环内偏振控制器(PC),用来调整萨尼亚克环的工作状态;4)磁光 HNLF,提供非线性介质,并通过对其施加磁场来实现磁光控制。当光信号单元 1 输出连续光信号时,磁光萨尼亚克结构作为磁光调制器使用,此时忽略磁光 HNLF 的非线性效应,即光信号单元 2 无高功率抽运光信号输出。当光信号单元 1 输出 RZ 光信号时,光信号单元 2 输出相同数据率的高功率光时钟信号,两者在萨尼亚克环中发生交叉相位调制效应^[16],实现光控光开关功能,进一步施加磁场可使消光比性能提升。

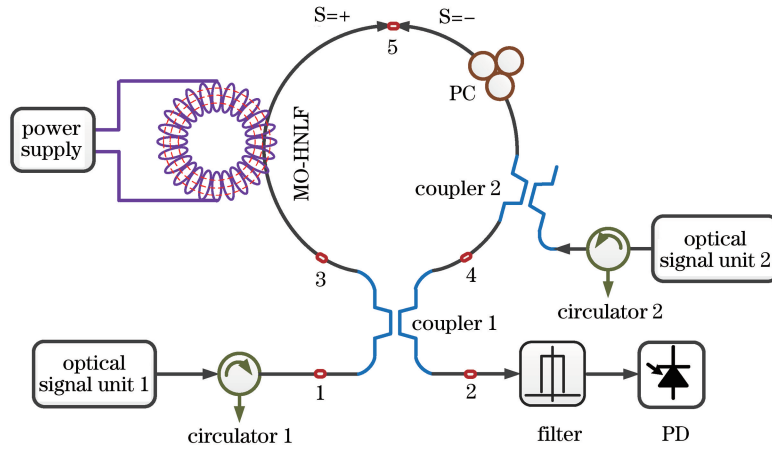


图 1 磁光萨尼亚克干涉结构示意图

Fig. 1 Illustration of the magneto-optical Sagnac interference structure

当光正交偏振信号由端口 1 输入到耦合器时,位置点 3 和 4 的光场为

$$\begin{bmatrix} E_{3,x}^+ \\ E_{3,y}^+ \\ E_{4,x}^- \\ E_{4,y}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\rho} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\rho} \\ j\sqrt{\rho} & 0 \\ 0 & j\sqrt{\rho} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{1,x}^{\text{in}} \\ E_{1,y}^{\text{in}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{cl}} \begin{bmatrix} E_{1,x}^{\text{in}} \\ E_{1,y}^{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{T}_{cl} 表示输入光信号首次经过耦合器的传输矩阵, $E_{i,p}^s$ 为相应位置处的场强($i=1,2,3,4,5$), $p=x, y$ 表示两个正交的偏振分量, s 是与传播方向或输入输出相关的量,取“ \pm ”分别表示沿顺时针和逆时针方向传输的光信号,或用 in 和 out 表示输入和输出的光信号, j 为虚数单位。

顺时针传输的光信号从位置点 3 经过磁光光纤到达位置点 5,逆时针传输的光信号从位置点 4 经过耦合器 2 和 PC 到达位置点 5,此时的光场为

$$\begin{bmatrix} E_{5,x}^+ \\ E_{5,y}^+ \\ E_{5,x}^- \\ E_{5,y}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 & 0 \\ C & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{3,x}^+ \\ E_{3,y}^+ \\ E_{4,x}^- \\ E_{4,y}^- \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{MP} \cdot \begin{bmatrix} E_{3,x}^+ \\ E_{3,y}^+ \\ E_{4,x}^- \\ E_{4,y}^- \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{T}_{MP} 为相应的传输矩阵。接下来,顺时针传输的光信号从位置点 5 经 PC 和耦合器 2 到达位置点 4,逆时针传输的光信号经磁光光纤到达位置点 3。位置点 3 和位置点 4 的光场为

$$\begin{bmatrix} E_{3,x}^- \\ E_{3,y}^- \\ E_{4,x}^+ \\ E_{4,y}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & A' & B' \\ 0 & 0 & C' & D' \\ E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{5,x}^+ \\ E_{5,y}^+ \\ E_{5,x}^- \\ E_{5,y}^- \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{PM} \begin{bmatrix} E_{5,x}^+ \\ E_{5,y}^+ \\ E_{5,x}^- \\ E_{5,y}^- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中相应的传输矩阵用 \mathbf{T}_{PM} 表示。更具体地,(2)和(3)式中, $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix}$ 分别表示光信号顺时针和逆时针通过磁光光纤的传输矩阵; $\begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} E' & 0 \\ 0 & F' \end{bmatrix}$ 分别表示顺时针和逆时针通过 PC 与耦合器 2 的传输矩阵。

经过上述传输过程的光信号会再次经过耦合器 1 干涉输出到端口 2,最终的透射输出光场为

$$\begin{bmatrix} E_{2,x}^{\text{out}} \\ E_{2,y}^{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\sqrt{\rho} & 0 & \sqrt{1-\rho} & 0 \\ 0 & j\sqrt{\rho} & 0 & \sqrt{1-\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{3,x}^- \\ E_{3,y}^- \\ E_{4,x}^+ \\ E_{4,y}^+ \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{e2} \begin{bmatrix} E_{3,x}^- \\ E_{3,y}^- \\ E_{4,x}^+ \\ E_{4,y}^+ \end{bmatrix}, \quad (4)$$

或者表示为

$$\begin{bmatrix} E_{2,x}^{\text{out}} \\ E_{2,y}^{\text{out}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{e2} \cdot \mathbf{T}_{PM} \cdot \mathbf{T}_{MP} \cdot \mathbf{T}_{cl} \begin{bmatrix} E_{1,x}^{\text{in}} \\ E_{1,y}^{\text{in}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{MO-S} \cdot \begin{bmatrix} E_{1,x}^{\text{in}} \\ E_{1,y}^{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{T}_{MO-S} 为总的传输矩阵,具体表示为

$$\mathbf{T}_{MO-S} = \begin{bmatrix} -A'E'\rho + AE(1-\rho) & -B'F'\rho + BE(1-\rho) \\ -C'E'\rho + CF(1-\rho) & -D'F'\rho + DF(1-\rho) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在萨尼亚克结构中,光信号经过 PC 和耦合器 2 的传输过程总是线性的,相应的传输矩阵元素之间满足关系: $E' = E^*$, $F' = F^*$ 。偏振控制器是通过对偏振控制器内部光纤施加应力(引起光纤双折射效应)来改变光的偏振态的,其矩阵元^[15]可表示为 $E = A_1 \exp\left(-\frac{j\Delta\beta_{PC}L_{PC}}{2}\right)$, $F = A_1 \exp\left(\frac{j\Delta\beta_{PC}L_{PC}}{2}\right)$, 其中 $\Delta\beta_{PC} = \frac{2\pi \cdot \Delta n_{PC}}{\lambda}$ 为偏振控制器的双折射, Δn_{PC} 为双折射系数; A_1 为 PC 和耦合器 2 导致的光场衰减系数; L_{PC} 为偏振控制器内的光纤长度。

当光信号单元 2 有高功率抽运光输出时,磁光光纤的非线性效应不可忽略,磁光光纤双折射、磁光效应和非线性交叉相位调制对光场复包络的影响可由磁光非线性耦合模方程进行计算^[17]

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{l,p}}{\partial z} = & -j \frac{s\Delta\beta}{2} E_{l,p} + \kappa_{l,p} E_{l,\bar{p}} \exp(-js\Delta\beta z) + \\ & j\gamma \left[2 |E_{j,p}|^2 E_{l,p} + \frac{2}{3} |E_{j,\bar{p}}|^2 E_{l,p} + \frac{2}{3} E_{j,p} E_{j,\bar{p}}^* E_{l,\bar{p}} + \frac{2}{3} E_{j,\bar{p}} E_{j,p}^* E_{l,p} \exp(-2js\Delta\beta z) \right], \quad (7) \end{aligned}$$

式中下标 l, i 分别表示输入光信号和抽运光时钟信号; p 取 x 或 y 分量, \bar{p} 表征着和 p 不同的偏振分量; γ 表示 HNLF 的非线性系数; $\Delta\beta$ 表示线性双折射; s 为与偏振相关的量, $s=1$ 表示 $p=x$, $s=-1$ 表示 $p=y$ 。光纤非线性的引入使方程的具体求解过程十分复杂。

对应于磁光调制情形,不考虑光纤非线性,即光信号单元 2 中无高功率抽运光输出,只计及磁光光纤的磁光效应和固有的双折射影响,则(2)和(3)式中的相应矩阵元素满足关系: $A' = A^*$, $B' = -B$, $C' = -C$,

$D' = D^*$, 其中^[18] $A = A_2 [\cos(\kappa L_F) - j(\Delta\beta_F)/(2\kappa)\sin(\kappa L_F)]$, $B = -A_2\kappa_m/\kappa\sin(\kappa L_F)$, $C = A_2\kappa_m/\kappa\sin(\kappa L_F)$, $D = A_2 [\cos(\kappa L_F) + j(\Delta\beta_F)/(2\kappa)\sin(\kappa L_F)]$, 式中 κ_m 为磁光光纤的磁光耦合系数, 它等于光纤费尔德常数 V_B 与磁感应强度的乘积; $\kappa = \sqrt{(\Delta\beta_F^2)/4 + \kappa_m^2}$ 为磁光系数, $\Delta\beta_F = (2\pi \cdot \Delta n_F)/\lambda$ 为磁光光纤的双折射, λ 为波长, Δn_F 为磁光光纤的双折射系数; A_2 为磁光光纤引起的光场衰减系数; L_F 为磁光光纤长度。

3 磁光调制功能

由(5)和(6)式可知,对于磁光调制情形,使用 3 dB 耦合器的磁光萨尼亚克结构的透射率为

$$T = \frac{|E_{2,x}^{out}|^2 + |E_{2,y}^{out}|^2}{|E_{1,x}^{in}|^2 + |E_{1,y}^{in}|^2} = F_a \left\{ 1 - \left[\cos(\kappa L_F) \cos\left(\frac{\Delta\beta_{PC} L_{PC}}{2}\right) - \frac{\Delta\beta_F}{2\kappa} \sin(\kappa L_F) \sin\left(\frac{\Delta\beta_{PC} L_{PC}}{2}\right) \right]^2 \right\}, \quad (8)$$

式中 $F_a = (A_1 A_2)^2$ 为整个萨尼亚克光纤环的光功率损耗。由(8)式可知,磁光萨尼亚克结构光透射率可通过调节偏振控制器双折射 $\Delta\beta_{PC}$ 和磁感应强度进行改变。本研究中,偏振控制器用于调整萨尼亚克结构的初始工作状态,在此基础上施加不同磁场改变连续光的透射率,从而实现磁光调制功能。

3.1 透射率的磁场依赖特性

由(8)式可知,磁光萨尼亚克调制器的透射率是 $\Delta\beta_{PC} L_{PC}$ 的周期函数,周期为 2π 。图 2 给出了不施加磁场时透射率 T 随 $\Delta\beta_{PC} L_{PC}$ 的变化曲线,计算参数为 $L_F = 500$ m, $\Delta\beta_F = 0.03$ m⁻¹, $F_a = -6.83$ dB。由图 2 可以看出,在透射率变化周期内存在一个极大值点和一个极小值点,它们分别对应于透射光的“开”和“关”状态。理论和实验研究表明,当偏振控制器状态处于透射率的极小值点附近时,透射率对磁感应强度变化最为敏感。因此,为了执行磁光调制功能,应首先调节萨尼亚克光纤环中的偏振控制器,使透射光功率尽可能小。

在图 2 的极小值点附近取 $\Delta\beta_{PC} L_{PC} = 3.88$, 计算不同损耗(F_a)情形下透射率随磁感应强度的变化曲线,如图 3 所示,其中 $V_B = 0.09$ rad/(T · m)^[10]。可以看出,损耗的变化会使透射率曲线整体上下平移,平移大小与 F_a 的变化量一致。可见,磁光萨尼亚克调制器的透射率随磁场的变化特性主要取决于偏振控制器的初始状态和萨尼亚克光纤环的总损耗,它们分别影响磁场敏感性和透射功率曲线的上下平移特性。

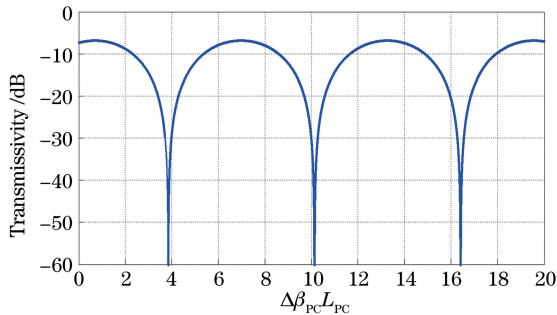


图 2 偏振控制器状态对光透射率的影响

Fig. 2 Effect of polarization controller state on transmissivity

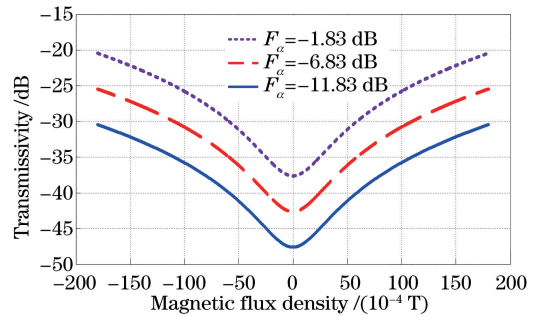


图 3 总损耗对光透射率曲线的平移作用

Fig. 3 Phorogenesis of the total loss on the optical transmissivity curve

3.2 磁光调制实验

实验中,光信号单元 1 产生一个波长为 1554.13 nm、功率为 0.26 dBm 的连续光,然后注入磁光萨尼亚克光纤环中。磁光调制器的总损耗 $F_a = -6.83$ dB,实验采用的磁光光纤参数与图 2 的计算参数相同,如表 1 所示。螺绕环在磁光光纤中产生的磁感应强度与所加载的电流基本上成线性关系。

表 1 HNLF 的参数

Table 1 Parameters of the HNLF

Parameter	Value
Fiber length L	500 m
Total loss	2.5 dB
Nonlinear coefficient γ	10 W ⁻¹ · km ⁻¹
Zero dispersion wavelength λ_0	1556 nm
Dispersion slope at λ_0	0.016 ps · nm ⁻² · km ⁻¹

在不存在磁场的情形下,调整光纤环内的偏振控制器来补偿磁光光纤的双折射效应,使磁光萨尼亚克结构的透射光处于“关”状态。此时,最小透射光功率为 -42.5 dBm,对应于 $\Delta\beta_{PC}L_{PC}=3.88$ 。不改变偏振控制器状态,对磁光光纤施加磁场,透射光功率的磁场依赖性如图4所示,理论曲线与实验数据一致。因透射光功率变化与磁场方向无关,因此实验中只采集了磁场大于零方向的数据。实验结果表明,当磁场的磁感应强度为 0.0177 T时,透射光功率为 -25.6 dBm,磁光调制器的消光比可达 17.05 dB。

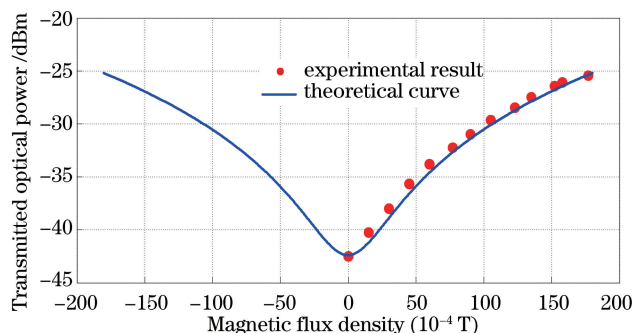


图4 磁光调制实验数据与理论曲线

Fig. 4 Experimental data and theoretical curve for the magneto-optical modulator

3.3 动态磁光调制特性

为了分析磁光调制器的动态调制特性,对螺绕环施加一个 100 Hz的方波脉冲电压信号,并将随时间变化的调制电压进行离散傅里叶变换,计算出螺绕环中不同频率分量的驱动电流大小和磁感应强度。然后根据(8)式计算各个频率分量的透射光功率(P_T)和光脉冲波形,如图5所示。其中输入光功率 $P_{in} = 0.25$ dBm,螺绕环线圈的电阻和电感分别为 $R=3.6$ Ω 和 $L=15.2$ mH,其他参数与上文一致。

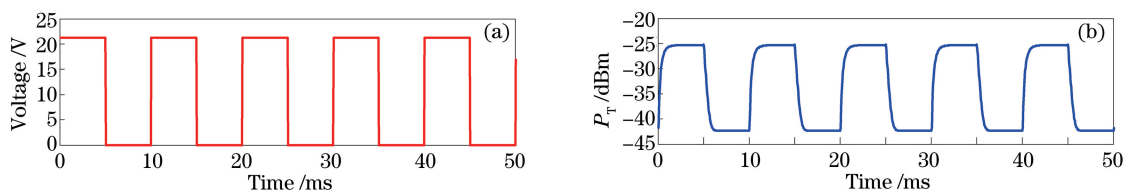


图5 动态磁光调制特性。(a)方波电压驱动信号;(b)透射光脉冲信号

Fig. 5 Dynamic characteristics of magneto-optical modulation. (a) Voltage drive signal with square wave; (b) transmission optical pulse signal

由图5可以看出,螺绕环线圈阻抗的频率依赖特性会导致输出脉冲信号的上升沿和下降沿形状发生畸变。研究表明,磁光调制的数据率越大,脉冲畸变越严重。因此,这种基于磁光光纤的萨尼亚克调制器的最大调制频率通常在 500 Hz左右^[10]。

4 非线性光控光开关实验

由上述分析可知,萨尼亚克干涉结构中采用磁光光纤,通过施加沿光纤方向的磁场引起法拉第磁光效应,使导波光模式发生转换。当光纤存在双折射时,模式转换作用会打破萨尼亚克干涉结构的全反射特性,即实现透射光的磁光调制功能。另一种打破萨尼亚克干涉结构全反射特性的方式是引入非对称相移。本研究利用光纤的交叉相位调制非线性效应,采用时钟抽运的光控光方式引入非对称相移。

将光信号单元1输出的 10 Gbit/s伪随机光RZ信号(信号光波长为 1554.13 nm)和光信号单元2输出的高功率 10 GHz光时钟信号(抽运光波长为 1557.36 nm)分别通过耦合器1和耦合器2输入到磁控萨尼亚克结构中。输入到端口1的光信号峰值功率为 5 dBm(平均功率为 1.48 dBm),光脉冲宽度为 44.4 ps,消光比为 20.28 dB。

先关闭抽运光时钟信号,调节偏振控制器使透射光信号功率最小,即萨尼亚克结构处于完全反射状态,此时透射光峰值功率为 -39.27 dBm(平均功率为 -42.79 dBm)。然后,保持偏振控制器状态不变,通过耦

合器 2 注入一个峰值功率为 28.2 dBm 的时钟抽运信号,此时透射光峰值功率增加 25.8 dB。输入的 RZ 光信号及其透射信号眼图如图 6 所示,因为交叉调制效应会导致输入光信号频谱展宽,因此在时域上透射光脉冲宽度被压缩至 21.9 ps;同时,光信号的消光比劣化了 3.38 dB。

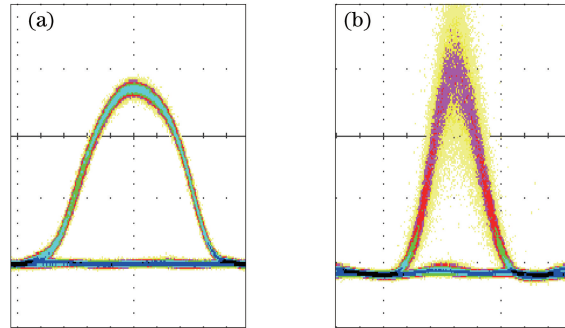


图 6 光控光开关的透射和输出光信号眼图。(a)输入光信号;(b)透射光信号

Fig. 6 Eye diagrams of input and output optical signals in optically-controlled-optical switch.

(a) Input optical signal; (b) transmission optical signal

在上述实验基础上,通过螺绕环对磁光 HNLF 施加磁场,透射光功率会略有增加,如图 7 所示。当磁感应强度为 0.0177 T 时光控光开关的透射光功率可提升 0.7 dB。

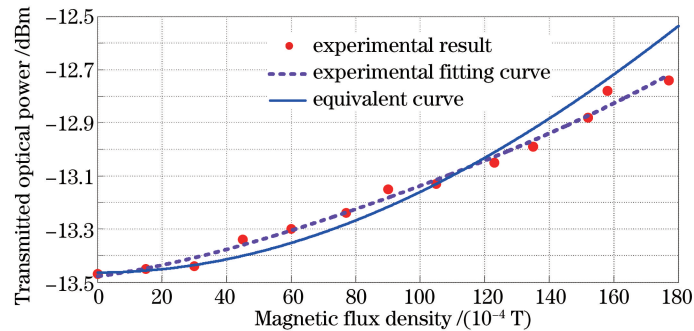


图 7 磁场对光控光开关透射性能的影响

Fig. 7 Effect of magnetic field on transmission performance of optically-controlled-optical switch

磁光非线性耦合模方程可直观地解释磁场对于非线性效应的影响,即磁场改变了光纤中导波光的本征偏振模式,而交叉相位调制和四波混频等光纤非线性效应又具有偏振依赖性。具体地讲,在有双折射的非线性光纤中,施加磁场导致模式转换,引起光纤中导波光的两个偏振分量发生变化,或者说磁场改变了导波光的椭圆偏振特性;而抽运光与信号光之间的交叉相位调制又具有光强依赖性,从而导致信号光相位同时依赖于磁场和抽运光强。

磁场对非线性光控光开关工作性能的影响机理,具体可通过求解磁光非线性耦合模方程来得到。因为求解过程异常复杂,所以本研究采用磁光调制理论结果等效处理,旨在从打破萨尼亚克干涉结构全反射特性角度考察两者之间的变化趋势和差异。下面用磁光调制的理论公式[(8)式]来近似说明光控光开关性能的磁场依赖性,用偏振控制器状态来模拟交叉相位调制对萨尼亚克结构透射率的影响。具体处理过程是:不加磁场时,根据光时钟抽运导致的光脉冲峰值透射率大小(-13.47 dBm)拟合出偏振控制器的状态为 $\Delta\beta_{PC}L_{PC}=4.7$;然后,根据(8)式计算出透射光功率随磁感应强度变化的理论曲线,如图 7 所示。图 7 表明,这种“用偏振控制器状态来模拟交叉相位调制”的等效处理方法,大体上可以反映透射光功率对磁场的依赖趋势,它们的差异正是磁场与非线性之间耦合的结果。总体而言,交叉相位调制的存在会降低磁场的敏感性。

5 结 论

根据磁光光纤的非互易性和偏振控制器的互易特性,详细推导了由磁光非线性光纤组成的萨尼亚克结

构的透射率公式。通过适当调节偏振控制器初始状态完成了对连续光的磁光调制实验,0.0177 T 磁场作用下的磁光调制度可达 17.05 dB,理论分析与实验结果吻合得很好。在磁光调制基础上,通过引入光时钟抽运信号,开展了光控光开关实验。当抽运光脉冲的峰值功率为 28.2 dBm 时,光控光开关的消光比可达 25.8 dB,进一步施加磁场,其消光比性能可提升 0.7 dB。采用偏振控制器等效方法简化分析了光控光萨尼亚克光开关的磁场依赖性,计算结果与实验数据基本吻合。

参 考 文 献

- [1] Zu Peng, Xiang Wanghua, Bai Yangbo, *et al.* A novel fiber Sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806005.
祖鹏, 向望华, 白杨博, 等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806005.
- [2] Giraldi M, Fernandes C, Ferreira M, *et al.* Fiber loop mirror sensors interrogated and multiplexed by OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2580-2584.
- [3] Liu Shuo, Yang Yuanhong, Chen Yuxuan. Phase interrogation algorithm with high resolution for hybrid Sagnac interferometers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1005006.
刘硕, 杨远洪, 陈宇轩. 混合 Sagnac 干涉仪高分辨率相位解调算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1005006.
- [4] Qiao G R, Cao Z G, Wang R, *et al.* Theory and experiment of flat-top all-fiber comb filter based on two high birefringence fiber Sagnac loop filters[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(12): 2836-2839.
- [5] Shi Nuannuan, Gu Yiyang, Hu Jingjing, *et al.* Study of the tunable optical comb filter based on Sagnac interferometer loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0306001.
石暖暖, 谷一英, 胡晶晶, 等. 基于 Sagnac 环可调谐光梳状滤波器特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0306001.
- [6] Liu Jianguo, Kai Guiyun, Xue Lifang, *et al.* A all-optical switching based on highly nonlinear photonic crystal fiber Sagnac loop mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2): 941-946.
刘建国, 开贵云, 薛力芳, 等. 基于高非线性光子晶体光纤 Sagnac 环形镜的全光开关[J]. *物理学报*, 2007, 56(2): 941-946.
- [7] Kemmet S, Mina M, Weber R J. Sagnac interferometric switch utilizing Faraday rotation[J]. *Jouranal of Applied Physics*, 2009, 105(7): 07E702.
- [8] Ma X W, Luo S J, Chen D. Switchable and tunable thulium-doped fiber laser incorporating a Sagnac loop mirror[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(20): 4382-4385.
- [9] Wang P H, Tang Y B, Peng H L, *et al.* A long cavity passive mode-locking fiber laser with the reflective non-linear optical loop mirror[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(2): 122-127.
- [10] Li Zhi, Wu Baojian, Wen Feng. Measurement of Verdet constant for magneto-optical fiber based on Sagnac interferometer[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2013, 44(2): 26-28.
李智, 武保剑, 文峰. 基于光纤 Sagnac 干涉结构的磁光光纤费尔德常数测量[J]. *磁性材料与器件*, 2013, 44(2): 26-28.
- [11] Zheng Xiangliang, Sun Quanshe, Han Zhong, *et al.* Fiber length measurement method based on Sagnac interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106003.
郑祥亮, 孙权社, 韩忠, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106003.
- [12] Yu A, Siddiqui A S. Optical modulators using fiber optic Sagnac interferometers[J]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 1994, 141(1): 1-7.
- [13] Kemmet S, Mina M, Weber R J. Fiber-based magneto-optic Sagnac optical modulator [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(10): 4892-4894.
- [14] Zu P, Chan C, Siang L. Magneto-optic fiber Sagnac modulator based on magnetic fluids[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1425-1427.
- [15] Wen Feng, Wu Baojian, Li Zhi, *et al.* Temperature-insensitive magnetic-field measurement using all-fiber Sagnac interferometers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 153-157.
文峰, 武保剑, 李智, 等. 基于全光纤萨格纳克干涉仪的温度不敏感磁场测量[J]. *物理学报*, 2013, 62(13): 153-157.
- [16] Bogoni A, Scaffardi M, Ghelfi P, *et al.* Nonlinear optical loop mirrors: investigation solution and experimental validation for undesirable counterpropagating effects in all-optical signal processing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 1115-1123.
- [17] Wen F, Wu B J, Li S B, *et al.* Magneto-optical four-wave mixing in fibers: theory and experiment[C]. *Anaheim: Optical Fiber Communication Conference & Exposition & the National Fiber Optic Engineers Conference*, 2013: JTH2A.
- [18] Wen F, Wu B, Luo T. All-fiber magneto-optic Sagnac interferometer[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3123-3127.