

# 椭圆双折射磁光光纤中导波光的非线性耦合模方程研究

周晓璟 武保剑 文峰 李智

(电子科技大学通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要** 根据磁光光纤的椭圆双折射特性,提出了导波光脉冲演化的本征型和非本征型非线性耦合模方程,分析了非线性效应和椭圆双折射对光脉冲传播行为的影响。通过分析光脉冲的自相位调制特性,得到了磁光光纤等效非线性系数与本征椭圆偏振光椭圆率的关系,磁光光纤中自相位调制引起的最大非线性相移会随着外加磁场的增加而减小,从而揭示了非线性光学器件的磁控机理。研究表明,本征型非线性耦合模方程对分步傅里叶算法的适应性最好;对于线偏振光入射情形,增加磁场有助于减弱光纤非线性的偏振依赖性。在光通信领域中,可应用于对光纤非线性效应的控制。

**关键词** 非线性光学;磁光光纤;分步傅里叶算法;椭圆双折射

中图分类号 O437; TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0719003

## Nonlinear Coupled-Mode Equations for Guided Optical Waves in Elliptically Birefringent Magneto-Optical Fibers

Zhou Xiaojing Wu Baojian Wen Feng Li Zhi

(College of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract** According to the elliptical birefringence in magneto-optic (MO) fiber, the eigen and non-eigen nonlinear coupled-mode equations for guided optical waves are put forward, which are used for analyzing nonlinear effects and elliptical birefringence in MO fiber. The relation between the equivalent nonlinear coefficient and the ellipticity of eigen elliptical polarized light is deduced for self-phase modulation (SPM) case. The maximum nonlinear phase shift of SPM will decline with the increase of magnetic field, and then reveals the mechanism of magnetically controlled nonlinear optical devices. Our calculation results show that the eigen nonlinear couple-mode equations are especially applicable for split-step Fourier method, and the polarization dependence of nonlinearity reduces under large applied magnetic field for input linearly polarized light. The findings can apply to the control of nonlinear effects in optical communication field.

**Key words** nonlinear optics; magneto-optic fiber; modified split-step Fourier method; magnetic circular birefringence

**OCIS codes** 190.4370; 230.2240; 070.4340

## 1 引言

光纤非线性在光纤通信、光信息处理等领域已广泛涉及<sup>[1~4]</sup>。与此同时,具有磁光效应的非线性

器件也受到人们的关注,用于开发新型的磁光光纤光栅智能器件<sup>[5]</sup>。在光纤内掺杂某些稀土元素可获得具有高磁光效应的磁光光纤(如掺铽光纤

收稿日期: 2011-02-14; 收到修改稿日期: 2011-03-07

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z216)、国家 973 计划(2011CB301703)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-2008)资助课题

作者简介: 周晓璟(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤非线性方面的研究。E-mail: qingqin3723@gmail.com

导师简介: 武保剑(1970—),男,博士,教授,主要从事光纤通信及磁光光学器件等方面的研究。

E-mail: bjwu@uestc.edu.cn(中国光学学会会员号: S040111641S)

等)<sup>[6,7]</sup>,使光纤型磁可调光子信息处理器件的开发成为可能<sup>[8]</sup>。相对于磁光光纤光栅而言,磁光光纤中导波光的非线性效应更容易考察。最近开展了基于磁光光纤中四波混频的参量整形实验,当加载到高非线性光纤上的磁感应强度达到 0.017T 时可使接收机的灵敏度再提升 2 dB(详细的工作将另文发表)。然而,要从理论上揭示磁光效应对光纤非线性的影响却不是一件容易的事情,目前只能针对单一光波长的情形进行研究<sup>[9]</sup>。

分析光纤非线性的理论工具主要是耦合模理论,将非线性效应进行微扰处理。本文将把磁光效应和光纤非线性效应都视为微扰,从直角坐标系下的磁光光纤非线性耦合模方程出发,通过坐标变换得到椭圆坐标系下的磁光光纤非线性耦合模方程。分析表明,磁光光纤中自相位调制引起的最大非线性相移会随着外加磁场的增加而减小,相应的等效

非线性系数可用解析式表达。另一方面,采用分步傅里叶算法,对椭圆坐标系下本征型、非本征型非线性耦合模方程进行了数值模拟计算,表明本征型非线性耦合模方程具有最好的适应性。研究表明,对于线偏振光入射情形,增加磁场有助于减弱光纤非线性的偏振依赖性。

## 2 椭圆偏振光的磁光非线性耦合模方程

根据在磁光光纤中导波光的耦合模理论,将光场表示为

$$E_j(z, t) = A_j(z, t) \exp[i(\beta_0 z - \omega_0 t)],$$

式中  $A_j(z, t)$  表示光场的复包络,  $\beta_0$  为光载波参考频率  $\omega_0$  对应的传播常数。在直角坐标系下,磁光非线性光纤中光场的慢变复包络演化方程为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial A_x}{\partial z} + \beta_{1x} \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i\beta_{2x}}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_x = i\gamma(|A_x|^2 + \frac{2}{3}|A_y|^2)A_x + \frac{i\gamma}{3} A_x^* A_y^2 \exp(-2i\Delta\beta z) - \kappa_m \exp(-i\Delta\beta z) A_y \\ \frac{\partial A_y}{\partial z} + \beta_{1y} \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i\beta_{2y}}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_y = i\gamma(|A_y|^2 + \frac{2}{3}|A_x|^2)A_y + \frac{i\gamma}{3} A_y^* A_x^2 \exp(2i\Delta\beta z) + \kappa_m \exp(i\Delta\beta z) A_x \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为光纤损耗系数;  $\beta_{1x,y}$  和  $\beta_{2x,y}$  分别为  $x, y$  偏振光的群速度倒数和群速度色散;  $\Delta\beta = \beta_{0x} - \beta_{0y} = 2k_0 \Delta n_b$ ,  $\Delta n_b$  为线双折射参量;  $\gamma$  为光纤非线性系数;  $\kappa_m = V_B B = k_0 \Delta n_m$  为磁光耦合系数,即单位长度的法拉第旋转角,  $V_B$  为韦尔代常数,  $B$  为磁感应强度,  $\Delta n_m$  为磁圆双折射参量。

由于光纤线双折射和磁圆双折射的联合作用,磁光光纤成为椭圆双折射光纤。采用椭圆坐标系,必然有助于简化非线性耦合模方程,使磁光效应与光纤非线性之间的物理联系更加清晰。任意偏振光都可表示为左旋和右旋椭圆偏振光的叠加,通过左、右旋椭圆偏振光与线偏振光单位矢量之间的关系  $e_R = \frac{\hat{x} - i\hat{y}}{\sqrt{1 + \eta^2}}$  和  $e_L = \frac{\hat{x} + i\hat{y}}{\sqrt{1 + \eta^2}}$  以及它们分量之间的变换关系  $A_R = \frac{A_x \exp(i\Delta\beta z/2) + i\eta A_y \exp(-i\Delta\beta z/2)}{\sqrt{1 + \eta^2}}$  和  $A_L = \frac{\eta A_x \exp(i\Delta\beta z/2) - iA_y \exp(-i\Delta\beta z/2)}{\sqrt{1 + \eta^2}}$ , 可得到椭圆率为  $\eta$  的椭圆坐标系下导波光的非线性耦合模方程:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial}{\partial z} + \hat{D}_R \right] A_R &= \frac{i\gamma}{(1 + \eta^2)^2} \left[ \left( \eta^4 + \frac{2}{3}\eta^2 + 1 \right) |A_R|^2 A_R + \frac{4}{3}\eta(1 - \eta^2) |A_R|^2 A_L + \right. \\ & 2 \left( \frac{1}{3}\eta^4 + 2\eta^2 + \frac{1}{3} \right) |A_L|^2 A_R - \frac{2}{3}\eta(1 - \eta^2) |A_L|^2 A_L + \frac{2}{3}\eta(1 - \eta^2) A_R^2 A_L^* - \\ & \left. \frac{1}{3}(1 - \eta^2)^2 A_L^2 A_R^* \right] + \hat{D}_{RL} A_L, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial}{\partial z} + \hat{D}_L \right] A_L &= \frac{i\gamma}{(1 + \eta^2)^2} \left[ \left( \eta^4 + \frac{2}{3}\eta^2 + 1 \right) |A_L|^2 A_L - \frac{4}{3}\eta(1 - \eta^2) |A_L|^2 A_R + \right. \\ & 2 \left( \frac{1}{3}\eta^4 + 2\eta^2 + \frac{1}{3} \right) |A_R|^2 A_L + \frac{2}{3}\eta(1 - \eta^2) |A_R|^2 A_R - \\ & \left. \frac{2}{3}\eta(1 - \eta^2) A_L^2 A_R^* - \frac{1}{3}(1 - \eta^2)^2 A_R^2 A_L^* \right] + \hat{D}_{LR} A_R, \end{aligned} \quad (3)$$

式中算子  $\hat{D}_R$  和  $\hat{D}_L$  表示为

$$\hat{D}_R A_R = \frac{\beta_{1x} + \eta^2 \beta_{1y}}{1 + \eta^2} \cdot \frac{\partial A_R}{\partial t} + \frac{i(\beta_{2x} + \eta^2 \beta_{2y})}{2(1 + \eta^2)} \cdot \frac{\partial^2 A_R}{\partial t^2} - \frac{(1 - \eta^2)}{(1 + \eta^2)} \frac{i\Delta\beta}{2} A_R - \frac{2i\eta}{(1 + \eta^2)} \kappa_m A_R + \frac{\alpha}{2} A_R, \quad (4)$$

$$\hat{D}_L A_L = \frac{\eta^2 \beta_{1x} + \beta_{1y}}{1 + \eta^2} \cdot \frac{\partial A_L}{\partial t} + \frac{i(\eta^2 \beta_{2x} + \beta_{2y})}{2(1 + \eta^2)} \cdot \frac{\partial^2 A_L}{\partial t^2} + \frac{(1 - \eta^2)}{(1 + \eta^2)} \frac{i\Delta\beta}{2} A_L + \frac{2i\eta}{(1 + \eta^2)} \kappa_m A_L + \frac{\alpha}{2} A_L, \quad (5)$$

(4)式和(5)式右边第1项和第2项分别表示在椭圆坐标系下的群速度及群速度色散；第3项为线双折射；第4项为磁圆双折射；最后一项为光纤的衰减。而算子  $\hat{D}_{RL}$  和  $\hat{D}_{LR}$  表示右旋/左旋椭圆偏振光之间的互耦合算子，即

$$\hat{D}_{RL} A_L = i\kappa A_L - \frac{\eta}{1 + \eta^2} (\beta_{1x} - \beta_{1y}) \frac{\partial A_L}{\partial t} - \frac{i\eta}{2(1 + \eta^2)} (\beta_{2x} - \beta_{2y}) \frac{\partial^2 A_L}{\partial t^2}, \quad (6)$$

$$\hat{D}_{LR} A_R = i\kappa A_R - \frac{\eta}{1 + \eta^2} (\beta_{1x} - \beta_{1y}) \frac{\partial A_R}{\partial t} + \frac{i\eta}{2(1 + \eta^2)} (\beta_{2x} - \beta_{2y}) \frac{\partial^2 A_R}{\partial t^2}, \quad (7)$$

式中  $\kappa = \frac{\eta\Delta\beta - (1 - \eta^2)\kappa_m}{(1 + \eta^2)}$  为偏振模转换系数。(2)

式和(3)式表示了椭圆坐标系下的群速度及群速度色散、非线性效应和磁光效应等因素对导波光传播特性的影响。

本文主要研究磁光效应对光纤非线性效应的控制特性，为简单起见，忽略衰减、群速度及群速度色散对光脉冲的影响。在这种情形下， $\hat{D}_{RL} = \hat{D}_{LR} = i\kappa$ 。当不考虑非线性效应时，若  $\kappa = 0$ ，则椭圆率为  $\bar{\eta} = -r_B + \sqrt{r_B^2 + 1}$  的左、右旋椭圆偏振光不发生耦合，或者说它们是磁光光纤的本征偏振态，其中参量  $r_B = \frac{\Delta\beta}{(2\kappa_m)}$  表示线圆双折射比。因此，称  $\kappa = 0$  时的非线性耦合模方程是本征型的，否则称之为非本征型的非线性耦合模方程。对于本征型非线性耦合模方程，(2)式和(3)式中的  $\eta$  应由  $\bar{\eta}$  代替，且  $\hat{D}_R = -\hat{D}_L = -i\Delta\beta_c$ ，其中  $\Delta\beta_c = \frac{\Delta\beta}{2} \left[ \frac{(1 - \bar{\eta}^2)}{(1 + \bar{\eta}^2)} + \frac{2\bar{\eta}}{r_B(1 + \bar{\eta}^2)} \right]$ 。

### 3 本征椭圆偏振光的自相位调制

本征型非线性耦合模方程对应的椭圆坐标系椭圆率  $\eta$  与磁光光纤中本征椭圆偏振光的椭圆率一致，即  $\eta = \bar{\eta}$ ，它取决于线圆双折射比  $r_B$ 。对于掺铽磁光光纤<sup>[10]</sup>，实验室中可达到的最大磁圆双折射  $\Delta n_m \approx 10^{-5}$ 。下面以本征的右旋偏振光为例分析磁光光纤中的自相位调制 (SPM) 特性。需指出的是，采用修正的分步傅里叶算法数值计算表明，当一个本征椭圆偏振光注入到磁光非线性光纤时，光脉冲在非线演化过程中所产生的正交偏振光分量引起的交叉相位调制完全可以忽略。此时本征型的非线性耦合模方程简化为

$$\frac{\partial \bar{A}_R}{\partial z} = i\gamma^* |\bar{A}_R|^2 \bar{A}_R, \quad (8)$$

式中  $\bar{A}_R(z, t) = A_R(z, t) \exp(i\Delta\beta_c z)$ ， $\gamma^* = \gamma(\bar{\eta}^4 + 2\bar{\eta}^2/3 + 1)/(1 + \bar{\eta}^2)^2$  为等效非线性系数。由(8)式可解得

$$A_R(z, t) = A_R(0, t) \exp[i\gamma^* |A_R(0, t)|^2 z + i\Delta\beta_c z], \quad (9)$$

指数函数  $\exp(\cdot)$  中第1项为非线性相移  $\phi_{NL} = \gamma^* |A_R(0, t)|^2 z$  的贡献，第2项与椭圆双折射相联系。以输入峰值功率为  $P_{0R}$ ，1/e 半宽为  $T_0$  的高斯脉冲为例，分析最大非线性相移  $\phi_{max} = \gamma^* P_{0R} L$  随椭圆率  $\bar{\eta}$  的变化规律，如图1所示，其中输出光脉冲的多峰频谱结构与最大非线性相移  $\phi_{max}$  有关， $L$  为光纤长度。其中  $\phi_{max} \approx (M - 1/2)\pi$ ， $P_{0R} = 1$  W， $T_0 = 10$  ps， $\lambda_0 = 1550$  nm， $\Delta n_b = 10^{-7}$ ， $\gamma = 190$  W<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup>， $L = 100$  m。由图1可以看出，随着  $\bar{\eta}$  的增加，最大非线性相移和等效非线性系数减小，输出脉冲频谱的峰值个数  $M$  从7个减少到5个，从而可揭示磁可调特性对光纤非线性效应的影响，这种特性在基于频谱展宽的光脉冲整形和波长转换等方面具有应用潜力<sup>[11~13]</sup>。自相位调制引起的高斯脉冲频谱展宽因子为<sup>[14]</sup>

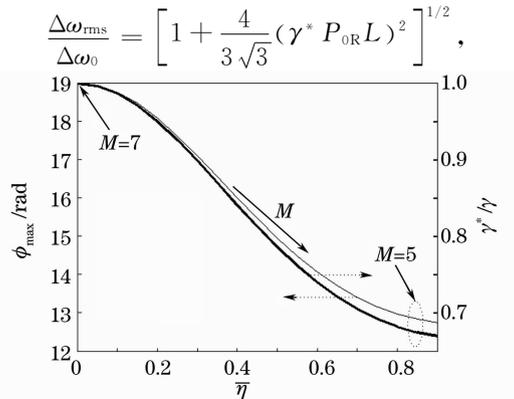


图1 最大非线性相移  $\phi_{max}$  随椭圆率  $\bar{\eta}$  的变化规律  
Fig. 1 Variation of the maximum nonlinear phase shift  $\phi_{max}$  with the eigen ellipticity  $\bar{\eta}$

式中  $\Delta\omega_0$  是脉冲的初始均方根谱宽,即幅度下降到  $1/e$  处的半宽度,  $\Delta\omega_{rms}$  为均方根谱宽。

### 4 磁光非线性耦合模方程的分步傅里叶计算

分步傅里叶算法已在诸多光通信仿真软件中广泛应用,它是将整段光纤分成若干个小的子区间  $\Delta z$ ,光场从一个子区间传播到下一个子区间<sup>[15]</sup>,传输过程中色散项和非线性效应分别起作用,从而数值求解光纤非线性薛定谔方程。然而,在采用分步傅里叶算法处理含有磁光效应的非线性方程时需要注意选择步长  $\Delta z$  的取值以保持算法的精度,同时还应考虑线圆双折射对步长的要求。

图 2 给出了线偏振高斯光脉冲  $A_x(0, T) = \sqrt{P_{0x}} \exp(-T^2/2T_0^2)$  入射时输出脉冲频谱的峰值功率曲线。其中  $P_{0x} = 0.5 \text{ W}$ ,  $T_0 = 10 \text{ ps}$ ,  $\Delta n_b = 10^{-7}$ ,  $r_B = 1.0$ ,  $L = 30 \text{ m}$ ,  $\gamma = 190 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 。原则上讲,对于给定的输入光脉冲和磁光非线性光纤参数,输出的脉冲频谱不应该随  $\kappa$  的取值发生变化,因为  $\kappa$  的改变仅仅意味着表达非线性耦合模方程的坐标系不同。由图 2 可以看出,数值计算结果明显依赖于步长  $\Delta z$  和偏振模转换系数  $\kappa$ ,  $\Delta z$  越小,数值计算的精度越高;尤其是当  $\kappa = 0$  即  $\eta = \bar{\eta}$  时,无论  $\Delta z$  的取值大小,总能得到预期的结果,即本征型磁光非线性耦合方程对分步傅里叶算法的适应性最好。对于非本征型的磁光非线性耦合模方程,步长  $\Delta z$  越小,计算结果越接近本征型磁光非线性耦合方程的结果。

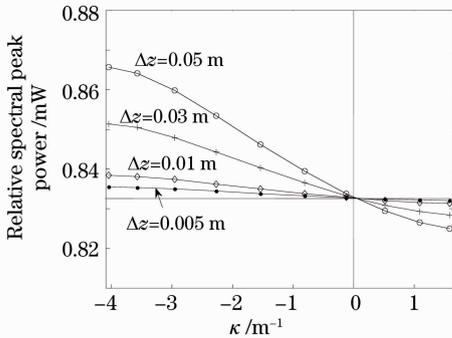


图 2 输出光脉冲的频谱峰值功率对偏振转换系数  $\kappa$  的依赖性

Fig. 2 Dependence of relative spectral peak power on polarization conversion factor  $\kappa$

### 5 入射线偏振光的磁控非线性特性

下面采用本征型的非线性耦合模方程对线偏振高斯光脉冲入射情形进行分步傅里叶计算,其中线偏

振光被分解为左、右旋椭圆偏振光的叠加。图 3 给出了  $x$  线偏振光入射时光纤输出脉冲的相对频谱峰值功率随磁光耦合系数  $\kappa_m$  的变化曲线,可以明显看出外加磁场对输出脉冲频谱的影响,从而有望实现磁控光脉冲整形功能。其中  $P_{0x} = 0.5 \text{ W}$ ,  $T_0 = 10 \text{ ps}$ ,  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ,  $\Delta n_b = 10^{-7}$ ,  $\gamma = 190 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $T_w = 200 \text{ ps}$ ,  $\Delta z = 1550 \text{ nm}$ 。当  $\kappa_m$  取值约在  $2 \text{ rad/m}$  时,输出脉冲的频谱峰值功率最大;当磁圆双折射远远大于线双折射( $r_B$  接近于 0)时,脉冲频谱的磁控作为减弱,磁光非线性光纤趋于各向同性(图 4 给出了线偏振光以不同方位角  $\theta$  入射时输出脉冲的频谱峰值功率变化),该特性与旋转光纤的作用类似<sup>[16]</sup>,并具有磁可调的优点。

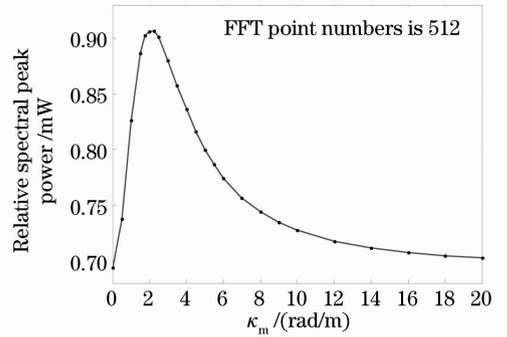


图 3 相对频谱峰值功率随磁光耦合系数  $\kappa_m$  的变化  
Fig. 3 Variation of relative spectral peak power with MO coupling coefficient  $\kappa_m$

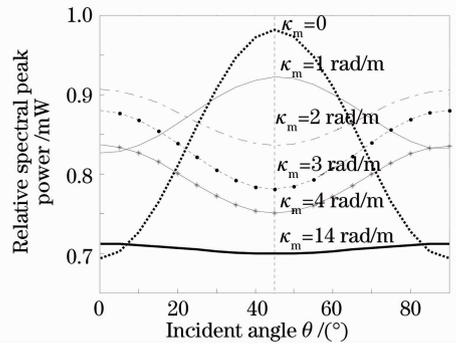


图 4 相对频谱峰值功率随线偏振光入射角  $\theta$  的变化  
Fig. 4 Variation of relative spectral peak power with incident angle  $\theta$  of the linearly polarized light

### 6 结 论

根据磁光光纤中的椭圆双折射特性,推导了导波光脉冲演化的本征型和非本征型非线性耦合模方程,分析了非线性效应、磁圆双折射和线双折射对光脉冲传播行为的影响。研究表明,本征型非线性耦合模方程对分步傅里叶算法的适应性最好。分析了光脉冲的自相位调制特性,得到了磁光光纤等效非

线性系数与本征椭圆偏振光椭圆率的关系;通过解析解和修正分步傅里叶计算表明,自相位调制引起的最大非线性相移会随着外加磁场的增加而减小,从而揭示了非线性光学器件的磁控机理。另外,对于线偏振光入射情形,增加磁场可减弱光纤非线性的偏振依赖性。

最后,在已开展的基于磁光光纤中四波混频的参量整形实验中,在外加磁场的控制下可有效地提高接收机的灵敏度。由此,本文的研究可为实现磁可控的光信息处理器件提供理论基础,若需在理论上分析实验结果,可在此基础上另行推导两个输入光脉冲的磁光非线性光纤耦合模方程。

### 参 考 文 献

- M. J. Holmes, D. L. Williams, R. J. Manning. Highly nonlinear optical fiber for all optical processing applications[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(9): 1045~1047
- Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Experimental study of wavelength conversion at various modulation formats based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1327~1332  
董建绩, 张新亮, 黄德修. 基于半导体光放大器四波混频效应的多种调制格式的波长转换实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1327~1332
- Yang Hongwu, Sun Junqiang, Du Qiuqiao. All-optical frequency up-conversion utilizing high nonlinear fiber in radio over fiber system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1448~1453  
杨洪武, 孙军强, 杜秋皎. 光纤无线通信系统中用高非线性光纤实现全光频率上转换[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1448~1453
- Du Jianxin. Degenerate four-wave-mixing noise in dispersion managed wavelength-division-multiplexed system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2361~2367  
杜建新. 色散管理波分复用系统中的简并四波混频噪声[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2361~2367
- 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
- Wu Baojian, Lu Xin, Qiu Kun. Magneto-optic fiber gratings useful for dynamic dispersion management and tunable comb filtering [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(6): 067803
- Toshihiko Yoshino. Theory for the Faraday effect in optical fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(9): 1856~1860
- Wu Baojian, Liu Xiao, Qiu Kun. Characteristics of magneto-optic fiber Bragg gratings for use in optical signal [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(2): 165~171
- Zhou Xiaojing, Wu Baojian. Analysis of nonlinear propagating characteristics of optical pulses in magneto-optic fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1862~1866  
周晓璟, 武保剑. 磁光光纤中光脉冲的非线性传播特性研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1862~1866
- L. Sun, S. Jiang, J. Marcianti. Compact all-fiber optical Faraday components using 65-wt%-terbium-doped fiber with a record Verdet constant of  $-32 \text{ rad}/(\text{Tm})$  [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12191~12196
- Jiang Yuntao, Luo Hang, Yuan Peng *et al.*. An all-optical pulse shaper based on nonlinear optical loop mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1239~1242  
蒋运涛, 罗 航, 袁 鹏 等. 基于光纤环形镜的全光脉冲整形器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1239~1242
- Guo Ailin, Yang Qingwei, Zhang Fuling *et al.*. Spectrum shaping of chirped pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1582~1585  
郭爱林, 杨庆伟, 张福领 等. 啁啾脉冲的光谱整形 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1582~1585
- Qu Kenan, Zhang Weigang, Liu Zhuolin *et al.*. Dispersion compensation in ultra-short optical pulse compressing system and transmitting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 449~453  
屈柯楠, 张伟刚, 刘卓琳 等. 超短光脉冲压缩系统和传输系统的色散补偿 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 449~453
- G. P. Agrawal. Principle and Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenghong Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003  
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 2003
- Thiab R. Taha. Numerical simulation of the nonlinear Schrödinger equation [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1990, **32**(3): 309~312
- Wang Yong, Xu Changqing. Characterization of spun fibers with millimeter spin periods [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(10): 3841~3851