

# 磁光四波混频实验平台

韩 瑞 武保剑 李述标 文 峰 李 智

(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** 设计一个测量光纤磁光(MO)效应和四波混频(FWM)的实验平台,具有较好的偏振控制性能,可分别采用自制的电磁偏振控制器(EMPC)和载纤螺绕环磁控装置控制输入光信号的偏振态(SOPs)和非线性光纤磁光耦合系数。实验测量了光纤四波混频闲频光功率对输入信号光偏振态椭圆率的依赖曲线,结果与理论分析一致。在此基础上,开展了连续导波光的磁光四波混频实验,测量了外加磁场对光纤四波混频闲频光功率的影响。

**关键词** 非线性光学;四波混频;磁光效应;偏振控制;高非线性光纤

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0705002

## Experimental Platform for Magneto-Optical Four Wave Mixing

Han Rui Wu Baojian Li Shubiao Wen Feng Li Zhi

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

**Abstract** An experimental platform of good polarization control performance is designed for the fiber magneto-optical (MO) effect and four wave mixing (FWM), in which the states of polarization (SOPs) of input optical signal and the MO coupling coefficient of nonlinear fibers are respectively controlled by a self-made electromagnetic polarization controller (EMPC) and a fiber-embedded toroidal coil. The dependency of fiber FWM idler power on the SOP ellipticity of input signal is measured and the experimental data are consistent with the theoretical results. And then, the MO-FWM experiment is implemented and the variation of fiber FWM idler power with the applied magnetic field is obtained.

**Key words** nonlinear optics; four wave mixing; magneto-optical effect; polarization control; high nonlinear fiber

**OCIS codes** 190.4380; 190.4370; 230.3810

## 1 引 言

四波混频(FWM)是一种由介质三阶非线性极化率引起的参量过程<sup>[1]</sup>,除用来实现参量放大<sup>[2]</sup>、波长转换<sup>[3,4]</sup>、相位共轭<sup>[5,6]</sup>等传统功能外,近年来,还被用于全光再生<sup>[7]</sup>、光学取样<sup>[8,9]</sup>、光逻辑门<sup>[10,11]</sup>等,在光学信号处理领域发挥着重要作用。将光纤的非线性效应与磁光(MO)效应相结合,也可以开发磁控的光纤非线性器件<sup>[12]</sup>。磁光效应是在磁场作用下具有磁矩的介质与导波光之间的相互作用<sup>[13]</sup>,利用磁光效应制成的法拉第反射镜、光学隔离器等光学器件已被广泛应用在光纤通信等领域。

磁光效应能够影响磁光介质中导波光的偏振态(SOPs),而四波混频效应又存在较强的偏振依赖性<sup>[14]</sup>,两者的结合会产生一些新的现象。Valerio Pruneri等<sup>[15,16]</sup>理论分析了磁光效应对光参量过程中相位匹配条件的影响,但没有开展相关的实验。最近,开展的基于普通高非线性光纤中四波混频效应的磁光参量整形实验表明,当加载到高非线性光纤上的磁场强度达到 $1.8 \times 10^{-2}$  T时,接收机的灵敏度提升了近 2 dB。

为进一步探索光纤非线性的磁控机理,更为直接地验证磁光四波混频(MO-FWM)效应,本文设计

**收稿日期:** 2011-12-15; **收到修改稿日期:** 2012-04-03

**基金项目:** 国家 973 计划(2011CB301703)和新世纪优秀人才计划(NECT-08-0092)资助课题。

**作者简介:** 韩 瑞(1985—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: harryuestc@gmail.com

**导师简介:** 武保剑(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

(通信联系人,中国光学学会会员号:S04011161S)

了连续光的磁光四波混频实验平台,该实验平台具有良好的偏振控制性能,对输入光的偏振态能够严格加以控制。首先利用该平台测试了四波混频效应对输入信号光偏振态的依赖特性,得到的实验数据与理论结果一致;在此基础上,通过载纤螺绕环装置测量了四波混频闲频光功率对外加磁场的依赖曲线,展示了磁光四波混频效应。

## 2 电磁偏振控制器

由于 FWM 过程具有偏振相关性,要准确反映磁光效应对 FWM 的影响,必须严格控制输入光的偏振态。这里主要考察了信号光椭圆率连续可调、方位角保持恒定的情况。实验中经常使用的三环式光纤偏振控制器(FPC),难以满足方位角恒定这一要求;国外公司的偏振控制仪虽满足要求,但价格过于昂贵。为此,利用磁光效应的偏振控制特性,并结合普通 FPC,制作了电磁偏振控制器(EMPC),其结构如图 1 所示。

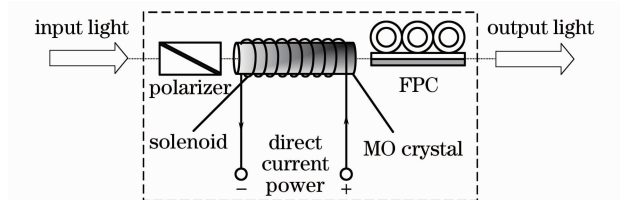


图 1 电磁偏振控制器结构图

Fig. 1 Structure of EMPC

该电磁偏振控制器主要由起偏器、磁光晶体、螺绕管和光纤偏振控制器组成。输入光经起偏器转化为线偏振光并入射到磁光晶体,在通电螺线管产生的外磁场作用下,磁光晶体中线偏振光的偏振面发生旋转,通电螺线管中电流大小不同,偏振面转过的角度也不同,当光纤偏振控制器处于某一特定状态

时,整个电磁偏振控制器的偏振控制效果如图 2 所示(测量结果)。可以发现,输出光偏振态与电磁偏振控制器的电流大小一一对应,其中椭圆率与电流大小呈近似线性的变化关系,同时方位角稳定在  $17^\circ \pm 1^\circ$  的范围内,基本满足实验要求。

上述测量过程中,EMPC 的输出端直接与偏振分析仪的输入端口相连,而在后续实验中 EMPC 的输出端应该重新连接到高非线性光纤的输入端,在此过程中应尽量减少光路的改动。为了保证实验的精度,对重新连接光路的过程进行了多次模拟,结果表明,偏振光斯托克斯参量的变化量能够控制在 1% 的水平。

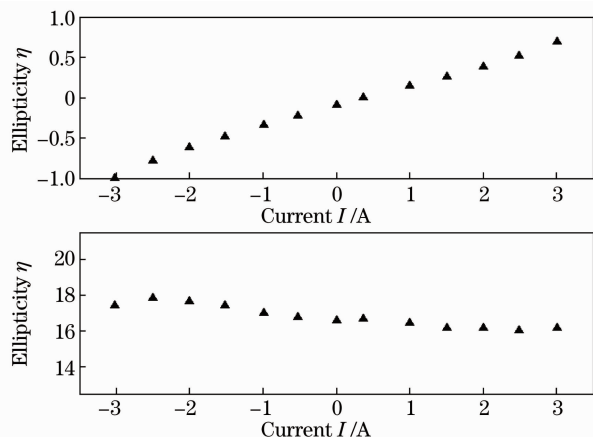


图 2 电磁偏振控制器的偏振控制效果

Fig. 2 Polarization control properties of EMPC

## 3 磁光四波混频实验平台

磁光四波混频实验系统如图 3 所示。信号光和抽运光的波长为  $\lambda_{\text{probe}} = 1552.53 \text{ nm}$  和  $\lambda_{\text{pump}} = 1554.14 \text{ nm}$ ,它们分别通过普通掺铒光纤放大器(EDFA)和可调高功率掺铒光纤放大器(tunable

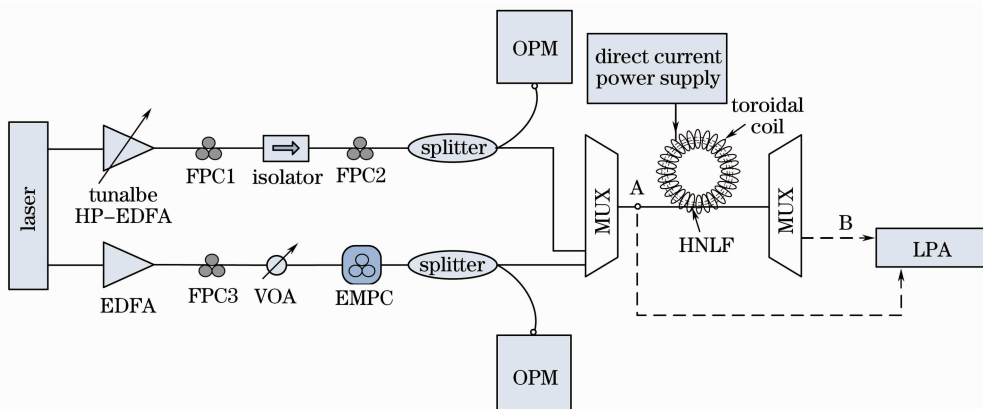


图 3 磁光四波混频实验平台示意图

Fig. 3 Experimental platform of MO-FWM

HP-EDFA)进行功率放大。信号光的偏振态由电磁偏振控制器进行控制,抽运光的偏振态则由FPC2调节。为了维持抽运光偏振态的稳定性,在FPC2前加入了偏振相关光隔离器。由于光隔离器和电磁偏振控制器中都存在偏振片,所以分别在两个元件前加入FPC1和FPC3,用来调节输入光偏振态以提高功率利用率。

由于电磁偏振控制器存在偏振相关损耗,同时为了减小信号光和抽运光功率扰动对实验结果的影响,采用光功率计(OPM)配合1:99及10:90光分路器对信号光和抽运光功率进行实时监控,并分别利用tunable HP-EDFA和可调衰减器(VOA)对功率大小进行调节,保证最终注入高非线性光纤(HNLF)的信号光功率稳定在 $(-1.39 \pm 0.01)$  dBm,抽运光功率稳定在 $(12.82 \pm 0.01)$  dBm。

由于高磁光系数的非线性光纤暂时无法获得,所以该系统目前使用长飞光纤光缆公司生产的普通高非线性光纤,厂家提供的光纤参数为:光纤长度 $L=505$  m,损耗约为2 dB,在1550 nm处其非线性系数 $\gamma=10$  W<sup>-1</sup>/km,HNLF色散曲线如图4所示。将上述HNLF盘绕在内径为92 mm的螺绕环中,该螺绕环在直流电源的驱动下可以产生最大为 $1.8 \times 10^{-2}$  T的磁场。信号光和抽运光在HNLF中发生四波混频效应,产生的闲频光经波分复用器(MUX)滤波后,由偏振分析仪(LPA)记录功率和偏振态信息,实验中采用Agilent 8509c型偏振分析仪,它可以在一段固定时间内自动记录多组测量数据,有助于减小测量误差。

## 4 实验结果

首先利用该系统测量了普通HNLF中四波混频效应对信号光偏振态的依赖性,此时暂不考虑磁场对HNLF的作用。实验分为两组,第一组利用FPC2将抽运光调节成与信号光偏振态椭圆主轴平行的线偏振光(平行入射情形),第二组利用FPC2将抽运光调节成与信号光偏振态椭圆主轴垂直的线偏振光(垂直入射情形)。信号光偏振态的椭圆率通过EMPC进行调节,并用偏振分析仪记录闲频光经

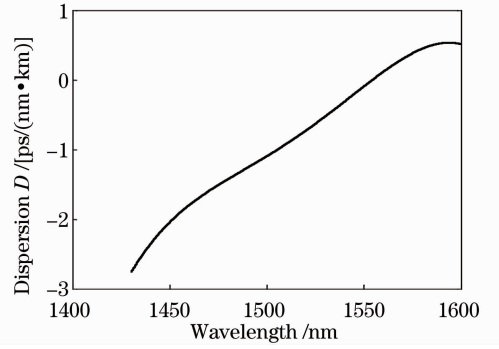


图4 HNLF的色散曲线

Fig. 4 Dispersion curve of HNLF

波分复用器后的功率和偏振态变化,实验结果如图5和图6所示。

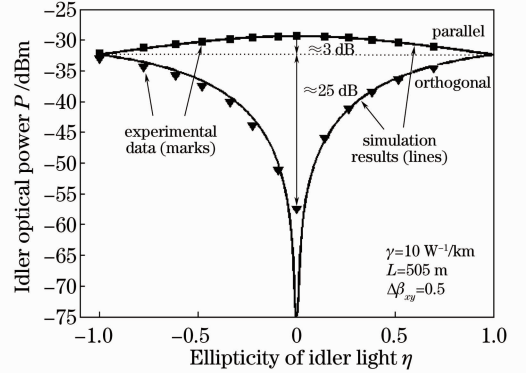


图5 闲频光功率随信号光椭圆率的变化曲线

Fig. 5 Dependences of idler optical power on the ellipticity of input signal light

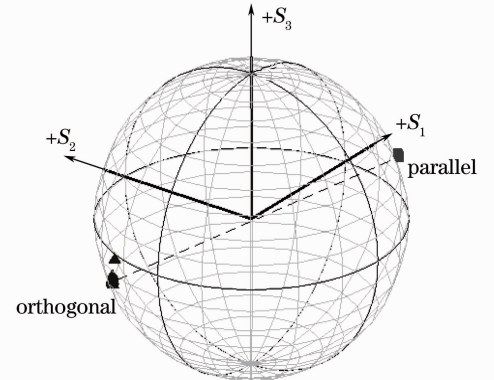


图6 闲频光偏振态

Fig. 6 SOPs of idler light

图5中同时给出的还有FWM过程的仿真结果,FWM过程可以由方程组描述为<sup>[17,18]</sup>

$$\frac{\partial A_{1p}}{\partial z} = i\gamma \left[ (|A_{1p}|^2 + \frac{2}{3}|A_{1\bar{p}}|^2)A_{1p} + \frac{1}{3}A_{1p}^*A_{1\bar{p}} \exp(-2i\Delta\beta_{p\bar{p}}z) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_{2p}}{\partial z} = i\gamma \left\{ (2|A_{1p}|^2 + \frac{2}{3}|A_{1\bar{p}}|^2)A_{2p} + \left[ \frac{2}{3}A_{1p}^*A_{1\bar{p}} \exp(-2i\Delta\beta_{p\bar{p}}z) + \frac{2}{3}A_{1p}A_{1\bar{p}}^* \right] A_{2\bar{p}} + \right.$$

$$\left[ A_{1p}^2 + \frac{1}{3} A_{1\bar{p}}^2 \exp(-2i\Delta\beta_{p\bar{p}}z) \right] \exp(-i\Delta\beta z) A_{3p}^* + \frac{2}{3} A_{1p} A_{1\bar{p}} \exp(-i\Delta\beta z) A_{3\bar{p}}^* \Big\}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_{3p}}{\partial z} = i\gamma \left\{ \left( 2 |A_{1p}|^2 + \frac{2}{3} |A_{1\bar{p}}|^2 \right) A_{3p} + \left[ \frac{2}{3} A_{1\bar{p}}^* A_{1p} + \frac{2}{3} A_{1\bar{p}} A_{1p}^* \exp(2i\Delta\beta_{p\bar{p}}z) \right] A_{3\bar{p}} + \left[ \frac{1}{3} A_{1\bar{p}}^2 \exp(2i\Delta\beta_{p\bar{p}}z) + A_{1p}^2 \right] \exp(-i\Delta\beta z) A_{2p}^* + \frac{2}{3} A_{1\bar{p}} A_{1p} \exp(-i\Delta\beta z) A_{2\bar{p}}^* \right\}, \quad (3)$$

式中  $A_{jp}$  的下标  $j = 1, 2, 3$  分别对应于抽运光、信号光和闲频光,  $p = x, y$  表示导波光在  $x, y$  方向的分量;  $\Delta\beta_{xy} = \Delta\beta_{yx}$  为线双折射参量;  $\gamma$  为光纤非线性系数;  $\Delta\beta$  为相位失配因子。在输入端边界条件确定的情况下, 可以利用 Matlab 的变步长龙格-库塔算法 (ODE45 函数) 对 (1)~(3) 式进行数值计算, 从而获得输出端信号光、抽运光以及闲频光的信息。

仿真计算中所使用的参数与实验条件保持一致, 输入光功率由光功率计直接读出, 其中信号光功率为  $-1.39$  dBm, 闲频光功率为  $12.82$  dBm; HNLF 使用厂家提供的参数, 光纤长度为  $505$  m, 损耗为  $2$  dB,  $\gamma = 10$  W<sup>-1</sup>/km, 光纤色散与图 4 保持一致; HNLF 的线双折射大小未知, 通过参数拟合的方法确定其取值为  $0.5$ 。

观察图 5 可以发现, 两组实验数据均与仿真结果吻合得很好, 说明实验数据是合理、可信的。需要指出的是, 在垂直入射情形下, 信号光椭圆率为 0 时的实验数据与仿真结果存在较大差异, 这是因为偏振分析仪的测量范围有限, 此时闲频光功率已经达到了其测量范围的下限。从图 5 还可以看出, 在平行入射和垂直入射两种情形下, 当信号光椭圆率等于 0 时 (对应线偏光), 闲频光功率分别取得最大值和最小值; 当信号光椭圆率等于  $\pm 1$  时 (对应圆偏光), 闲频光功率相等; 在信号光椭圆率从  $-1$  到  $+1$  变化的过程中, 两种情形所对应的闲频光功率分别改变了约  $3$  dB 和  $25$  dB, 信号光椭圆率变化对闲频光功率的影响在垂直入射情形下较为明显。

图 6 反映了闲频光偏振态的变化规律。在每一组实验中, 抽运光与信号光的方位角都保持恒定, 虽然信号光的椭圆率在  $[-1, +1]$  内发生改变, 但闲频光偏振态的变化非常微小; 而当抽运光与信号光的方位角发生改变时, 闲频光偏振态也随之发生较大的变化。

为了更有效地观察磁光四波混频效应, 提高 HNLF 中磁光效应和非线性效应的作用效果, 采用更长的高非线性光纤制作了新的载纤螺绕环, 光纤长度为  $1220$  m, 损耗约为  $2.7$  dB, 在  $1550$  nm 处其

$\gamma$  为  $10$  W<sup>-1</sup>/km, 新的色散曲线如图 7 所示。新螺绕环的内径为  $100$  mm, 其同样可以产生最大为  $1.8 \times 10^{-2}$  T 的磁场。

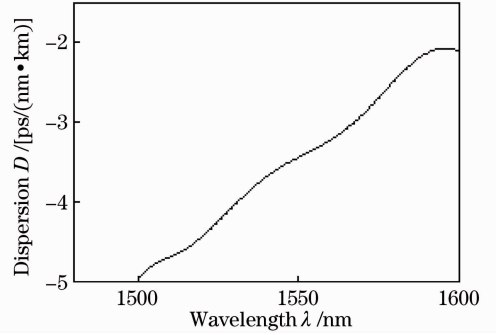


图 7 新 HNLF 的色散曲线

Fig. 7 Dispersion curve of new HNLF

采用与上述实验类似的方法测量了光纤 FWM 闲频光功率随磁场强度的变化。在此次实验过程中, 最终注入 HNLF 的信号光功率稳定在  $(0.07 \pm 0.01)$  dBm, 波长为  $1552.53$  nm, 抽运光功率稳定在  $(6.75 \pm 0.01)$  dBm, 波长为  $1554.14$  nm。实验表明, 在抽运光为线偏振光并与信号光偏振态方位角垂直的情形下, 当信号光椭圆率接近 0 时磁光效应对闲频光功率的影响最为明显。图 8 给出了信号光椭圆率等于  $0.1622$  时外加磁场对闲频光功率的影响。可以看出, 闲频光功率随磁感应强度的增加而增加, 在外加磁场的磁感应强度达到  $18$  mT 时, 闲频光功率增加了约  $2$  dB。

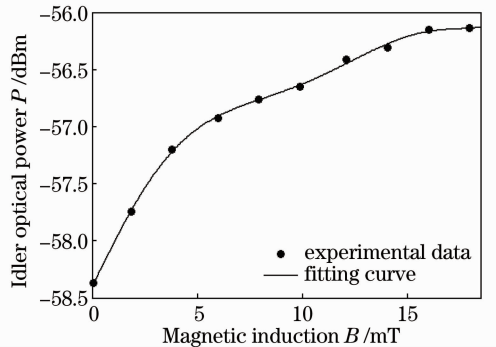


图 8 闲频光功率随外加磁场的变化

Fig. 8 Variation of idler power with applied magnetic field

## 5 结 论

设计并实现了磁光四波混频实验平台, 分别利用电磁偏振控制器实现对信号光偏振态的控制, 螺旋绕环磁控装置控制非线性光纤的磁光耦合系数, 可调光功率衰减器以及光功率计、分光器等来维持信号光和抽运光的功率稳定。在此实验平台上, 测量了四波混频效应对信号光偏振态的依赖特性, 所得实验数据与计算结果能很好地吻合。在此基础上, 研究了外加磁场对四波混频效应的影响, 在输入信号光偏振态方位角与抽运线偏振光垂直的情形下, 当信号光椭圆率在零点附近时, 磁光效应对四波混频过程的影响最为明显, 在外磁场的磁感应强度达到 18 mT 时, 闲频光功率增加了约 2 dB。

## 参 考 文 献

- 1 X. M. Liu. Theory and experiments for multiple four-wave-mixing processes with multi-frequency pumps in optical fibers[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(4): 043818
- 2 J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund *et al.*. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3): 506~520
- 3 Jianxin Ma, Jianjun Yu, Chongxiu Yu *et al.*. Wavelength conversion based on four-wave mixing in high-nonlinear dispersion shifted fiber using a dual-pump configuration[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(7): 2851~2858
- 4 Zhou Hui, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. All-optical wavelength conversion for orthogonal frequency division multiplexing optical signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 959~964  
周 慧, 董 泽, 曹子峥等. 正交频分复用信号的全光波长变换性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 959~964
- 5 J. Herrera, F. Ramos, J. Marti. Nonlinear distortion generated by DSF-based optical-phase conjugators in analog optical systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(9): 1688~1693
- 6 Jiang Zhiguo, Liu Jifang, Ma Lin *et al.*. Study on output characteristics of mutually pumped phase conjugation with multiple coupled interaction regions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1219001  
蒋治国, 刘继芳, 马 琳等. 多作用区互抽运相位共轭效应输出特性的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1219001
- 7 A. Bogris, D. Syvridis. Regenerative properties of a pump-modulated four-wave mixing scheme in dispersion-shifted fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 1892~1902
- 8 M. Westlund, P. A. Andrekson, H. Sunnerud *et al.*. High-performance optical-fiber-nonlinearity-based optical waveform

- monitoring [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2012~2022
- 9 Liu Yuanshan, Zhang Jianguo, Tang Dingkan *et al.*. Prototype of an optical sampling oscilloscope with subpicosecond temporal resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0107002  
刘元山, 张建国, 唐定康等. 亚皮秒级时间分辨率的光取样式波器实验样机[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0107002
- 10 Q. Lin, R. Jiang, C. F. Marki *et al.*. 40-Gb/s optical switching and wavelength multicasting in a two-pump parametric device[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2376~2378
- 11 Luo Xuan, Jiang Yang, Yu Jinlong *et al.*. Simultaneous optical signal dropping and cleaning by utilizing four wave mixing effects based optical logic gate in optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2524~2528  
罗 旋, 江 阳, 于晋龙等. 基于光纤中四波混频效应光逻辑门的信号同步提取与擦除[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2524~2528
- 12 Baojian Wu, Xiao Liu, Kun Qiu. Characteristics of magneto-optic fiber Bragg gratings for use in optical signal processing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(2): 165~171
- 13 Liu Gongqiang, Le Zhiqiang, Shen Defang. Magneto-optics[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2001. 29~35  
刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001. 29~35
- 14 Li Peili, Shi Weihua, Huang Dexiu *et al.*. Theoretical investigation of nearly degenerate four-wave mixing in semiconductor optical amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2864~2871  
李培丽, 施伟华, 黄德修等. 半导体光放大器中入射光偏振不平行近简并四波混频效应的理论研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2864~2871
- 15 V. Pruneri, S. Longhi. Optical parametric processes in isotropic third-order nonlinear media with magneto-optic properties[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(23): 1720~1722
- 16 S. Longhi, V. Pruneri. Modulational instability and four-wave mixing in anisotropic  $\chi(3)$  magneto-optic[J]. *J. Opt. A*, 2001, **3**(2): L5~L7
- 17 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 228  
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震红译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 228
- 18 Zhou Xiaojing, Wu Baojian, Wen Feng *et al.*. Nonlinear coupled-mode equations for guided optical waves in elliptically birefringent magneto-optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0719003  
周晓璟, 武保剑, 文 峰等. 椭圆双折射磁光光纤中导波光的非线性耦合模方程研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0719003

栏目编辑: 王晓琰