

文章编号:1004-4213(2010)06-0972-5

磁光光纤光栅滤波器的全光时钟提取性能研究*

魏锦哲,武保剑,文峰

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室,成都 611731)

摘要:研究了磁光耦合强度对磁光光纤布喇格光栅中模式转换光反射光谱特性的影响.根据磁光耦合模理论并结合光纤布喇格光栅的传播特性,数值分析了磁光光纤布喇格光栅的磁控特性,得到了 3 dB 带宽可调的滤波器.采用级联磁光光纤布喇格光栅构造磁控梳状滤波器,实现了 40 Gbps 归零数据信号的全光时钟提取仿真,分析了时钟信号的抖动性能与磁光耦合参量的关系.

关键词:全光时钟提取;磁光光纤布喇格光栅;可调梳状滤波器

中图分类号:O482.54; TN929.11

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103906.0972

0 引言

全光时钟提取是全光(Re-amplification、Re-shaping、Re-timing, 3R)再生器及高速时分复用(Optical Time Division Multiplexing, OTDM)通信系统的关键技术.目前,全光时钟提取的方案主要有:基于锁模激光器^[1]、分布反馈式(Distributed feedback, DFB)激光器^[2]、锁相环^[3]、光纤非线性^[4]、法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)滤波器^[5-6]等方案.其中,基于 F-P 滤波器的光时钟提取方案,因具有结构简单、捕获时间短等特点而受到广泛的关注^[5],并已在实验上实现速率为 40Gbps 的全光时钟提取^[6].

本文研究一种具有磁控功能的新型滤波器——磁光光纤布喇格光栅(Magneto-optic Fiber Bragg Grating, MFBG),可通过在光纤 Bragg 光栅中掺入稀土元素或在钇铁石榴石(Yttrium Iron Garnet, YIG)光纤上写入光栅等方法获得的^[7].在外加磁场作用下,水平射入 MFBG 的线偏振光由于磁光法拉第效应而发生偏振模式转换,导致在 MFBG 垂直方向上的模式转换光的反射光谱中存在两条关于 Bragg 波长对称的尖锐线状谱^[8],可利用该谱线实现滤波功能.由于尖锐谱线的位置和透射窗口大小与磁光耦合参量密切相关.因此,外加磁场对 MFBG 滤波器的可控特性,可通过研究磁光耦合参量对 MFBG 滤波特性的影响加以分析.采用磁控的方式,可对 MFBG 进行动态、灵活的调节,从而实现

灵活受控的光时钟提取.在分析 MFBG 梳状滤波性能基础上,设计了采用级联 MFBG 构造的磁控滤波器,采用 OpticSystem6.0 仿真软件,对速率为 40 Gbps 归零(Return to Zero, RZ)数据信号进行了全光时钟提取仿真实验,获得了质量较高的时钟信号.

1 MFBG 的磁控特性

MFBG 是一种具有磁光效应的光栅波导结构,具有比传统光栅更加丰富的光信息处理功能^[9].在外加磁场作用下,法拉第效应使 MFBG 中同一传播方向上(z 轴)的导波光发生偏振模式转换,导致 MFBG 中存在与输入光同偏振(x 轴)和发生偏振模式转换(y 轴)的相互正交的两束透射导波光以及两束反射导波光. MFBG 存在的 4 种导波光中,发生偏振模式转换的反射导波光(y 偏振反射导波光)是本文研究的重点.根据磁光耦合模理论,其复振幅可表示为^[8]

$$A_y^-(0) = -i \frac{\kappa_g}{2S_+} (E_p^2 - 1) (A_{0x} + iA_{0y}) + i \frac{\kappa_g}{2S_-} (E_n^2 - 1) (A_{0x} - iA_{0y}) \quad (1)$$

式中, $S_+ = (\delta + \kappa_m + q_+) - (\delta + \kappa_m - q_+)E_p^2$, 其中磁光耦合参量 $\kappa_m = VB$, V 和 B 分别为费尔德常量和磁场强度. $S_- = (\delta - \kappa_m + q_-) - (\delta - \kappa_m - q_-)E_n^2$, $E_n = \exp(iq_-L)$, $E_p = \exp(iq_+L)$, $q_{\pm} = \sqrt{(\delta \pm \kappa_m)^2 - \kappa_g^2}$, 光栅耦合参量 $\kappa_g = k_0 \delta n > 0$, 失谐因子 $\delta = (\omega - \omega_B) \bar{n} / c$, A_{0x} 、 A_{0y} 分别为入射光在 x 轴和 y 轴方向上的复振幅.

MFBG 参量设置为:平均折射率 $\bar{n} = 1.5$, Bragg 波长 $\lambda_B = 1550$ nm, 光栅长度 $L = 1.6$ cm, 光栅折射

* 国家高技术研究发展计划(2009AA01Z216)和新世纪优秀人才计划资助

Tel: 028-61830268

Email: weijinzhe@uestc.edu.cn

收稿日期: 2009-07-23

修回日期: 2010-01-05

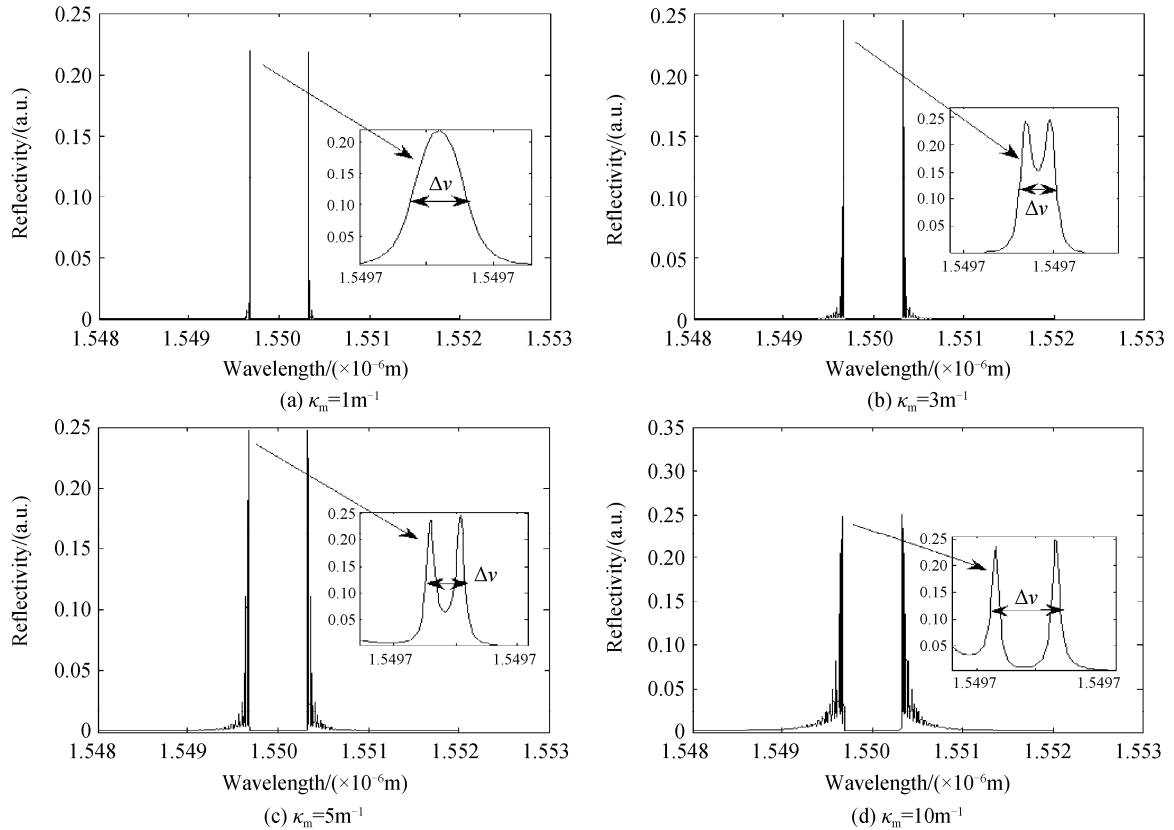


图1 磁光耦合参量对 MFBG 模式转换光的反射光谱的影响

Fig.1 Variations of reflection spectra of polarization-mode converted lights in MFBG on magneto-optical coupling parameters

率变化 $\delta n = 3.0675 \times 10^{-4}$. 改变外加磁场大小,可调节磁光耦合参量 κ_m . 对于只有一个线偏振光入射的情形,不妨设边界条件 $A_{0x} = 1$ 和 $A_{0y} = 0$; κ_m 取不同值时所得 $A_y^- (0)$ 的反射率 R_y 如图 1.

由图 1 可看出,1) y 偏振导波光的反射谱中均存在两条关于 Bragg 波长对称的尖锐线状谱,可用于实现 MFBG 滤波功能;2) 随着磁光耦合参量 κ_m 的增加,尖锐谱线旁瓣数量增加,这将会影响 MFBG 的滤波性能,该问题可通过切趾的方法加以消除;3) 从尖锐谱线的局部放大图可以看出,随着磁光耦合参量 κ_m 增加,谱线的尖峰由平坦逐渐裂化,最终完全分裂成两个峰. 尖锐谱线尖峰的裂变会严重影响到 MFBG 的滤波性能. 因此,磁光耦合参量 κ_m 必须在一定范围内调节,才能充分发挥 MFBG 的磁控滤波特性. 由图 1 知, κ_m 的优化范围是 $0 < \kappa_m < 3 \text{ m}^{-1}$.

在 κ_m 的优化范围内,针对 R_y 存在的两条尖锐线状谱,分析尖锐谱线的 3 dB 带宽 $\Delta\nu$ 与两尖锐谱线的频率间隔 Δf 对 κ_m 的依赖关系,从而揭示出 MFBG 的磁控特性,如图 2.

由图 2(a) 可以看出,在优化的 κ_m 范围内,3 dB 带宽 $\Delta\nu$ 随着 κ_m 的增加呈递增趋势. 而图 2(b) 显示,两尖锐谱线的频率间隔 Δf 变化存在两个阶段: 1) 当 $1.3 \text{ m}^{-1} < \kappa_m < 3 \text{ m}^{-1}$ 时, Δf 随着 κ_m 的增大而

减小; 2) $0 < \kappa_m < 1.3 \text{ m}^{-1}$ 时 Δf 基本上保持不变, κ_m 的调节便只影响到 $\Delta\nu$, 利用该特性可实现 MFBG 的可调滤波功能. 此外,由 $\Delta\nu$ 和 Δf 对 κ_m 的依赖关系可知, $\Delta\nu$ 与 Δf 之间是相互制约的,因此在选取优化的 κ_m 值时,需综合考虑这两个参量.

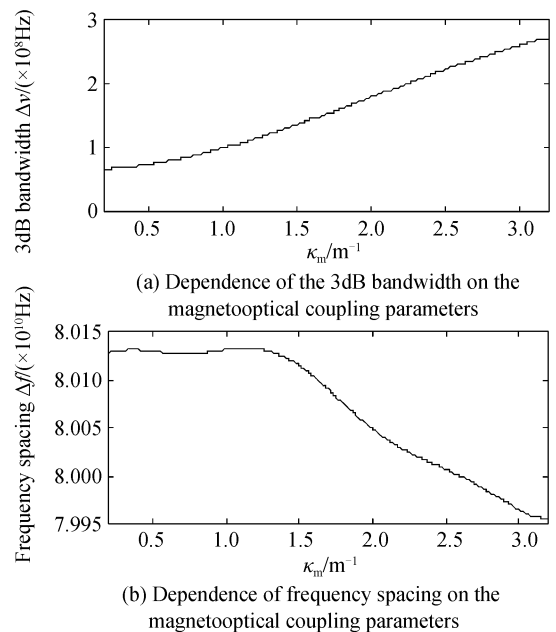


图2 MFBG 的磁控特性

Fig.2 The magnetic control characteristics of MFBG

2 MFBG 滤波器的抖动性能分析

分析可知, MFBG 滤波器能够实现与 F-P 滤波器类似的滤波功能. MFBG 滤波器作为一种新型的可调无源滤波器件, 其滤波性能可借助于 F-P 滤波器的研究方法, 加以定性分析. 图 3 给出了相同梳状谱线间隔和谱线带宽条件下 MFBG 与 F-P 的频谱曲线(分别对应于实线和虚线). 由图 3 可看出, MFBG 具有更宽的平顶带宽, 其尖锐谱线(实线)的上升沿与下降沿均比 F-P 的谱线(虚线)陡峭.

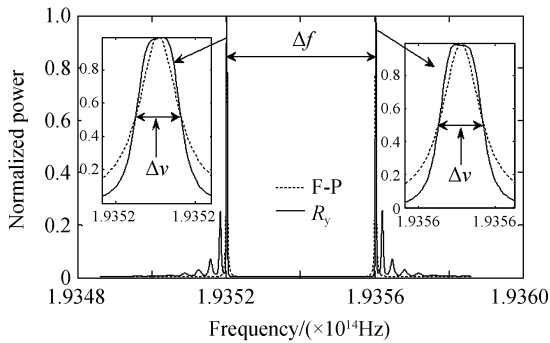


图 3 MFBG 与 F-P 传输特性的比较

Fig. 3 The transmission characteristics between MFBG and F-P filter

因此, 借助于 F-P 滤波器的抖动性能公式^[5]和 F-P 滤波器精细度 Q 影响公式为

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{\frac{3}{2} - R - \frac{R^2}{2} - \frac{1}{2} \frac{(1-R^2)(1-R)^2}{1+R^2}} \\ Q = \frac{\Delta f}{\Delta \nu} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \end{cases} \quad (2)$$

经过简化式(2), MFBG 滤波器产生的时钟信号归一化抖动均方根(Normalized RMS Amplitude Jitter)为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{Q} \sqrt{\frac{\pi^2}{Q^2} + 4} - \frac{\pi^2}{Q^2} - \frac{\pi^2}{2Q^2 + \pi^2}} \quad (3)$$

式中, $Q = \Delta f / \Delta \nu$ 是 MFBG 滤波器的品质函数, 由磁光耦合参量 κ_m 唯一的决定. 在同样的 MFBG 参量条件下, MFBG 滤波器产生的时钟信号抖动均方根如图 4. 可知, 在 $0 < \kappa_m < 3 \text{ m}^{-1}$ 范围内, MFBG 滤

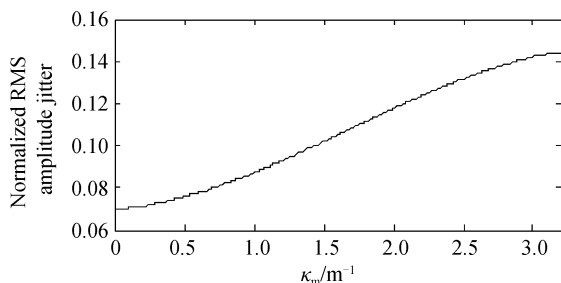


图 4 磁光耦合参量与归一化幅度抖动均方根关系

Fig. 4 Impacts of the magneto-optical coupling parameters on normalized rms amplitude jitter

波器产生时钟信号幅度抖动 σ 随着磁光耦合参量 κ_m 的增大而增大. 可以理解为: 随着磁光耦合参量 κ_m 的增加, MFBG 的 3 dB 带宽 $\Delta \nu$ 变宽, 这将导致更多的噪音通过滤波器, 降低了信噪比. 因此, 要得到高质量的时钟, 需要选用优化的磁光耦合参量 κ_m 值来控制 MFBG 的滤波功能.

3 MFBG 的全光时钟提取

由于每段 MFBG 有且只有 2 条尖锐谱线, 故采用中心波长不同的三段 MFBG 来制作 MFBG 梳状滤波器, 对应的 Bragg 波长分别为 1 550.64 nm、1 549.36 nm(与 1 550 nm 的频率间隔为 $\Delta f = 80 \text{ GHz}$)和 1 549.68 nm(与 1 550 nm 的频率间隔为 $\Delta f = 40 \text{ GHz}$), 所得的 MFBG 滤波器归一化频谱曲线如图 5.

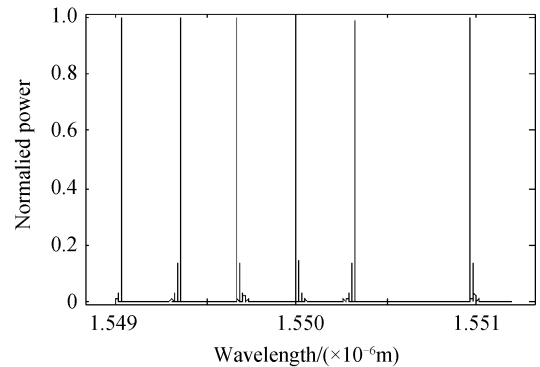


图 5 MFBG 归一化传输曲线

Fig. 5 The normalized transmission curve of MFBGs

在 OptiSystem6.0 平台上, 使用该 MFBG 滤波器对速率为 40 Gbps 的 RZ 码数据光信号进行了时钟提取仿真实验, 提取的光时钟信号频谱如图 6, 其中优化的磁光耦合参量 $\kappa_m = 1 \text{ m}^{-1}$, 对于掺铽光纤^[10], $V \approx 2.5 \times 10^{-4} \text{ rad}/(\text{Gs} \cdot \text{m})$, 对应的磁场为 $B = 4 335.5 \text{ Gs}$. 由图 6 可直观看出, 由于 MFBG 滤波器滤除了信号的连续谱成分, 而表示时钟信息的离散谱完全通过 MFBG 滤波器的窗口, 时钟信息得到有效的提取.

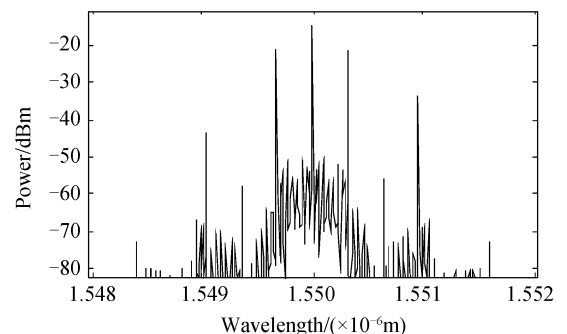


图 6 MFBG 滤波器所提取的光时钟信号频谱

Fig. 6 The extracted clock signal spectra after MFBGs

改变磁光耦合参量 κ_m 大小, 会影响所提取时钟

信号的质量:在优化点 $\kappa_m = 1 \text{ m}^{-1}$ 处可以得到质量较好的 40 Gbps 时钟信号,但随着工作点偏离 1 m^{-1} ,时钟信号的峰值抖动增加、质量下降.因此,采用磁控方式进行全光时钟提取时,选取优化的 κ_m 对于得到质量较好的时钟信号质量是至关重要的.

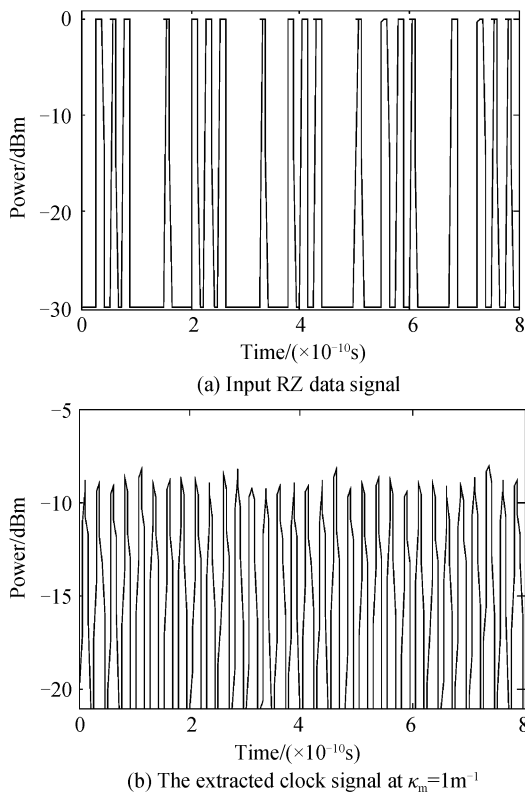


图7 MFBG 滤波器所提取的时钟信号时域

Fig. 7 The extracted clock signal after MFBGs

总之,采用 MFBG 滤波器不仅可以实现光时钟的提取功能,同时通过改变外加磁场动态调节滤波器带宽,进一步改善时钟信号的质量.

4 结论

利用 MFBG 中偏振模转换导波光反射谱中存在的两条尖锐谱线,研究了 MFBG 在外加磁场下的工作特性,给出了磁光耦合参量 κ_m 的优化范围.在此基础上,研究了尖锐谱线的 3 dB 带宽 $\Delta\nu$ 和两峰频率间隔 Δf 对磁光耦合参量 κ_m 的依赖关系,并借助于 F-P 滤波器的性能公式分析了 MFBG 的滤波性能,即产生光时钟信号的均方根抖动与磁光耦合

参量 κ_m 的依赖关系.最后,采用三段 MFBG 制作的梳状滤波器,在 OptiSystem6.0 平台上进行了 RZ 码数据光信号的全光时钟提取仿真实验,表明了 MFBG 滤波器可以采用磁控的方式实现灵活动态的光时钟提取.

参考文献

- [1] VLACHOS K, THEOPHILOPOULOS G, HATZIEFREEMIDIS A, *et al.* 30 Gb/s all-optical clock recovery circuit [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(6):705-707.
- [2] WU Tong, QIU Kun. Investigation on all-optical clock recovery from RZ-format data at 64 Gbit/s by using a two-section index coupled DFB laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1393-1396.
武同,邱昆.基于双区折射率耦合 DFB 激光器实现 64Gbit/s 归零编码数据全光时钟恢复研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1393-1396.
- [3] HU Zhao-yang, NISHIMURA K, CHOU Hsu-Feng, *et al.* 40 Gb/s optical packet clock recovery with simultaneous reshaping using a traveling-wave electroabsorption modulator-based ring oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(12):2640-2642.
- [4] SU Yi-kai, WANG Li-jun, AGARWAL A, *et al.* Wavelength-tunable all-optical clock recovery using a fiber-optic parametric oscillator [J]. *Optics Communications*, 2000, **184**(1):151-156.
- [5] ZHOU Xiang, LU Chao, SHUM Ping, *et al.* A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Perot filter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(5):603-613.
- [6] TANG Guang-qiang, YU Jin-long, WANG Yao-tian, *et al.* 40 GHz all-optical clock extraction using a Fabry-Perot filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10):1853-1857.
汤广强,于晋龙,王耀天,等.基于法布里-珀罗滤波器的 40 GHz 全光时钟提取实验 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1853-1857.
- [7] MAO Tze-chen, CHEN Jyh-chen, HU Chao-chang. Effect of the pulling rate on the quality of cerium-substituted YIG single-crystal fibers by LHPG [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, **296**(1):110-116.
- [8] WU Bao-Jian, LIU Xiao, QIU Kun. Characteristics of magneto-optic fiber Bragg gratings for use in optical signal processing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(2):165-171.
- [9] 武保剑.微波磁光理论与磁光信号处理 [M]. 四川:电子科技大学出版社,2009:190.
- [10] ARCE-DIEGO J L, LOPEZ-RUISANCHEZ R, LOPEZ-HIGUERA J M. Fiber Bragg grating as an optical filter tuned by a magnetic field [J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(9):603-605.

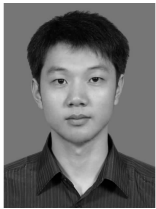
Performance of Magneto-optic Fiber Bragg Grating Filters for All-Optical Clock Extraction

WEI Jin-zhe, WU Bao-jian, WEN Feng

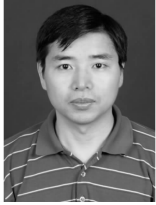
(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The reflection spectra of polarization-mode converted light in Magneto-optic Fiber Bragg Gratings (MFBGs) dependent on the magneto-optical coupling intensity is investigated. According to the magneto-optic coupled-mode theory combined with the propagation property of fiber Bragg grating, the magnetic control characteristics of the MFBGs are analyzed numerically. The 3 dB bandwidth tunable filter is obtained by adjusting the magneto-optical coupling intensity. The clock extraction of 40 Gbps RZ data signal by utilizing the comb filtering of MFBGs under bias magnetic fields is simulated and the jitter performance of the MFBGs is also analyzed.

Key words: All-optical clock extraction; Magneto-optic fiber Bragg grating (MFBG); Tunable comb filter



WEI Jin-zhe was born in 1984. He is currently working towards the M. S. degree, and his research interests focus on fiber Bragg gratings and its applications to all-optical signal processing technologies.



WU Bao-jian was born in 1970. He is a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on optical devices, optical fiber communications, optical information processing, etc.