

基于 Sagnac 环可调谐光梳状滤波器特性研究

石暖暖 谷一英 胡晶晶 胡 墅 康子建 韩秀友 赵明山

(大连理工大学物理与光电工程学院光子技术研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要 提出了一种基于 Sagnac 环干涉结构的光梳状滤波器。该结构利用保偏光纤双折射效应产生梳状滤波响应,通过控制 Sagnac 环内相位调制器的驱动信号实现光学滤波器陷波深度与滤波波长的独立调谐。利用 Jones 矩阵对所提出的 Sagnac 环光滤波器的滤波响应函数进行研究,通过分析得到光滤波器的陷波深度和滤波波长分别与射频信号和直流偏压之间的关系。在此基础上构建实验链路,验证了系统的理论分析,实现了光滤波器陷波深度在 0 dB~30 dB 范围内的灵活控制;通过设置直流偏压在 0~12 V 范围内变化,实现了光滤波器滤波波长在一个自由光谱范围(0.5 nm)内的连续可调,波长调谐效率为 0.043 nm/V。

关键词 光纤光学;可调光滤波器;Sagnac 环形镜;双折射效应;Jones 矩阵

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0306001

Study of the Tunable Optical Comb Filter Based on Sagnac Interferometer Loop

Shi Nuannuan Gu Yiyi Hu Jingjing Hu Shu Kang Zijian

Han Xiuyou Zhao Mingshan

(Photonics Research Center, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract An optical comb filter based on the Sagnac ring loop is proposed. The comb filter response function is generated on the basis of the birefringent effect of the polarization maintaining fiber (PMF) within the loop. By utilizing the radio frequency (RF) signal along with the direct current (DC) to drive the phase modulator (PM) inserted in the Sagnac loop mirror, the independent tunings of the notch depth and filtering wavelength are realized. The response function of the proposed Sagnac filter is expressed theoretically with Jones matrix, and the effects of the optical filter notch depth and filtering wavelength on RF signal and the DC bias are analyzed. Based on the analysis results, the experimental link is set up to verify the theory. The results show that the tunable range of the notch depth from 0 dB to 30 dB is achieved. Besides, the filtering wavelength influenced by the DC from 0 to 12 V is continuously adjustable in the free spectral range (FSR) of 0.5 nm, and the wavelength tuning efficiency is 0.043 nm/V.

Key words fiber optics; tunable optical filter; Sagnac loop mirror; birefringent effect; Jones matrix

OCIS codes 060.1810; 060.2310; 060.2420; 060.4510

1 引言

随着信息技术的快速发展,人们对于信息服务速率的要求越来越高,对骨干传输网要求的提高,促

使现代光纤通信技术向着高速率、大带宽、长距离传输的方向发展。为了充分利用光纤的带宽资源,采用波分复用/解复用(WDM)技术增加单光纤链路

收稿日期: 2013-09-16; **收到修改稿日期**: 2013-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(60807015)、辽宁省自然科学基金(20102020)、中央高校基本科研业务费专项资金(DUT13JB01, DUT13RC204)

作者简介: 石暖暖(1986—),女,博士研究生,主要从事微波光子学及光子学技术处理微波信号等方面的研究。

E-mail: shinuannuan@163.com

导师简介: 赵明山(1960—),男,教授,主要从事光子集成芯片与功能器件以及基于微波光子学的专用通信新技术等方面的研究。E-mail: mszhao@dlut.edu.cn(通信联系人)

的波长数量,节约铺设光纤和中继器的数量,从而降低通信成本。可调谐光滤波器,通过对中心滤波波长的实时调谐,实现对所需光波长的选择性通过,是光纤通信系统中多波长选择单元和波长地址路由等单元中的关键器件之一。

目前,国内外对可调谐光滤波技术的研究主要基于以下几种类型:法布里-珀罗(F-P)干涉型^[1-2]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉型^[1,3-4]、光纤布拉格光栅(FBG)^[1,5]、阵列波导光栅(AWG)^[6]以及 Sagnac 干涉型^[2,7-11]等。其中,F-P 干涉型滤波器精度及稳定性较好,但波长可调谐速度较慢,插入损耗大^[1]。M-Z 干涉型滤波器选波位置准确,但其选波精细度小,易受外界环境影响。FBG 型具有强的偏振无关性,但其实现可调谐的手段较为复杂,选波位置和精度控制的实现较为困难。AWG 受偏振、温度等因素影响较大,同时需要与光纤进行耦合^[11]。基于 Sagnac 环干涉滤波器^[4,7-8,12-14]由于其结构简单、输入偏振无关等优点受到广泛的研究。其中采用半导体光放大器(SOA)^[4]或光子晶体光纤等高折射率光纤^[7]搭建 Sagnac 干涉型光滤波器需要对干涉环内部进行偏振相关控制,同时对滤波波长的调谐的精度和速度要求较高,因此使得该结构的复杂性、调节精度和控制难度大大增加。相位调制器作为高双折射调制器可实现可调谐光滤波^[8,13,15],采用偏振控制器可实现干涉环内光偏振特性的控制,但滤波器

的陷波滤波深度以及滤波特性的稳定性会受到影响。

本文提出了一种基于保偏光纤双折射效应的 Sagnac 环光梳状滤波器,采用保偏扰偏器代替传统的偏振控制器,实现对干涉环内偏振特性的高精度稳定性控制,此种滤波器具有结构简单、输入偏振无关、多波长信道选通、良好的光谱特性以及滤波波长与陷波深度单独调谐的优点。采用 Jones 矩阵对光梳状滤波器透射端的滤波响应函数进行理论研究,并分析得到光滤波器的陷波深度、自由光谱范围(FSR, R_{fs})和波长偏移量的理论表达式;通过实验数据分析得到光滤波器陷波深度随射频(RF)信号的变化从而实现了对光滤波器滤波深度在 0 dB~30 dB 范围内的连续可调;通过改变直流(DC)偏压实现光滤波器滤波波长在一个自由光谱范围内的连续可调,实现了不同波长的实时选通。

2 系统结构及原理

Sagnac 环光滤波器的结构如图 1 所示,它由环形器、3 dB 耦合器、扰偏器和相位调制器构成。为了保证返回光耦合器处产生良好的干涉效果,Sagnac 环内的所有光纤连接都采用保偏光纤实现。其中 Sagnac 环内扰偏器是采用保偏光纤的快轴与慢轴重新熔接而成,作用是使通过光的偏振态产生 90° 的旋转。

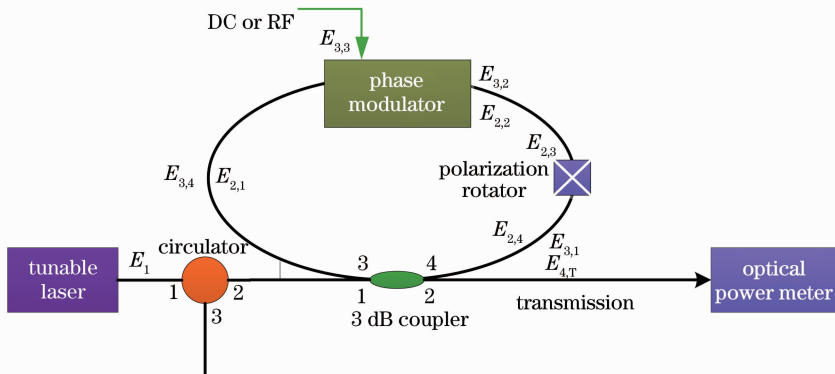


图 1 Sagnac 环光滤波器的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the Sagnac loop filter

2.1 Sagnac 环光滤波器滤波响应研究

入射光 E_1 从光环形器 1 端输入,经 3 dB 耦合器后分成沿相反方向传输的两束光 $E_{2,1}$ 和 $E_{3,1}$ 。其中沿顺时针方向传输的光 $E_{2,1}$ 经由 1 端口正向进入相位调制器,经过信号驱动产生一定的附加相位后从 2 端口输出,并经过扰偏器使光 $E_{2,3}$ 的偏振态旋转 90°;同时,沿逆时针方向传输的光 $E_{3,1}$ 经过扰偏

器(同样光偏振态产生 90° 的旋转)后,经由 2 端反向进入相位调制器,经过信号驱动产生一定附加相位的光 $E_{3,3}$ 从 1 端口输出。经过 Sagnac 环后的返回光 $E_{2,4}$ 和 $E_{3,4}$ 在 3 dB 耦合器处再次合路后分别从 3 dB 耦合器的 2 端与环形器的 3 端输出。根据 Jones 矩阵理论,系统的透射端输出信号光场 $E_{4,T}$ 可以表示为^[2,11]

$$\mathbf{E}_{4,T} = \sqrt{\kappa}\mathbf{M}_c \mathbf{T} \sqrt{\kappa}\mathbf{E}_{in} + \sqrt{1-\kappa}\mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{M}_{cc} \sqrt{1-\kappa}\mathbf{H}\mathbf{E}_{in}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} E_{in,x} \\ E_{in,y} \end{bmatrix}$ 为入射光的光场矢量, $\kappa=0.5$ 为 3 dB 耦合器的分光比,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \exp\left[j\left(\frac{\pi}{2}\right)\right] & 0 \\ 0 & \exp\left[j\left(\frac{\pi}{2}\right)\right] \end{bmatrix}$$

为 3 dB 耦合器交叉传输的相位延迟矩阵, $\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 和 $\mathbf{M}_{cc} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ 为光沿顺时针与逆时针方向分别经过扰偏器的坐标旋转矩阵,

$$\mathbf{T} = \exp(-j\phi_{PM}) \begin{bmatrix} \exp(-j\tau_{PM}/2) & 0 \\ 0 & \exp(j\tau_{PM}/2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\phi_x) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Delta\phi_y) \end{bmatrix}$$

为相位调制器的传输矩阵。其中 $\phi_{PM} = \frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{\lambda} (n_{TM} + n_{TE})L_{PM}$ 为平均相移量, $\tau_{PM} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{PM} L_{PM}$ 为偏振相关相移量, n_{TM}, n_{TE} 为铌酸锂晶体 TM 和 TE 模式的折射率, Δn_{PM} 为铌酸锂晶体 TM 和 TE 模式的折射率差, L_{PM} 为铌酸锂晶体的长度, λ 为光波长。相位调制器的两个半波电压 $V_{\pi, TM}$ 和 $V_{\pi, TE}$ 由极化矢量中 γ_{33}, γ_{13} 决定, 对于沿 z 轴切割的铌酸锂晶体 $V_{\pi, TE} \approx 3V_{\pi, TM}^{[13]}$ 。因此 $\Delta\phi_x \approx \frac{1}{3}\Delta\phi_y = \frac{\pi}{V_{\pi, TM}}V$ 。

将上述关系式代入(1)式进行整理, 可得

$$P[\lambda, V(t)] = P_{in}\alpha[0.5 - 0.5\cos(\Delta\phi_{in} + \Delta\phi_{DC} + \Delta\phi_{RF})], \quad (2)$$

(2)式经过整理, 得到输出光功率的表达式为

$$P(\lambda, V_{DC}, V_{RF}) = \frac{1}{2}P_{in}\alpha[1 - \gamma_{RF}\cos(\Delta\phi_{in} + \Delta\phi_{DC})], \quad (3)$$

式中 $P_{in} = \frac{E_{in}^2}{2}$ 为输入光的光功率, α 为系统总的损耗, 其中包括链路中各个光无源器件的连接损耗、插入损耗以及偏振相关损耗等; $\Delta\phi_{in} = \frac{2\pi|\Delta n_f L_f - \Delta n_{PM} L_{PM}|}{\lambda}$ 为双折射效应引入的固有相移量, Δn_f 为保偏光纤的快慢轴的折射率差, L_f 为相位调制器左右两端的保偏光纤距离相位调制器中央的长度差。 $\Delta\phi_{DC} = \pi V_{DC} \left(\frac{1}{V_{\pi, DC, TM}} - \frac{1}{V_{\pi, DC, TE}} \right)$ 为直流偏置电压驱动时不同偏振模式的光沿相反方向进

入相位调制器产生的相位差。 $\Delta\phi_{RF} = \gamma_1 \cos(\omega t) - \gamma_2 \cos[\omega(t + \tau)]$, 为射频驱动时不同偏振模式的光沿相反方向进入相调制器产生的瞬时相位差, $\gamma_1 = \frac{\pi V_{RF}}{V_{\pi, RF, TM}}$ 为顺时针光沿调制器 TM 模式传输的正向

调制效率; $\gamma_2 = \frac{\pi V_{RF}}{V_{\pi, RF, TE}}$ 为逆时针光沿调制器 TE 模式传输的反向调制效率, 其中 V_{RF} 为射频功率的电压幅度, $V_{\pi, RF, TM}$ 为顺时针传输光经过调制器 TM 模式的半波电压, $V_{\pi, RF, TE}$ 为逆时针传输光经过调制器 TE 模式的半波电压。 $\gamma_{RF} \approx J_0(\gamma_1)J_0(\gamma_2)$ 为总的调制幅度, $J_0(\gamma_1)$ 和 $J_0(\gamma_2)$ 为第一类 0 阶贝塞尔函数值。

2.2 Sangac 环光滤波器可调谐研究

基于 Sangac 环干涉型光滤波器的归一化滤波曲线示意图如图 2 所示, 由(3)式分析可得, 陷波深度 (ND, d_N) 为光功率的最大值与最小值之比, 其表达式为

$$d_N = 10\lg\left(\frac{1 + \gamma_{RF}}{1 - \gamma_{RF}}\right), \quad (4)$$

由光谱范围为(3)式中 $\Delta\phi_{in}$ 产生 2π 相移量对应的中心滤波波长差, 表达式为

$$R_{fs} = \frac{\lambda_0^2}{|\Delta n_f L_f - \Delta n_{PM} L_{PM}|}, \quad (5)$$

滤波波长偏移量 ($\Delta\lambda_{shift}$) 为因直流偏置电压的变化使滤波中心波长产生的偏移, 即(3)式中 $\Delta\phi_{in} + \Delta\phi_{DC} = (2n+1)\pi$, 表达式为

$$\Delta\lambda_{shift} = \frac{R_{fs}}{2\pi} \Delta\phi_{DC}. \quad (6)$$

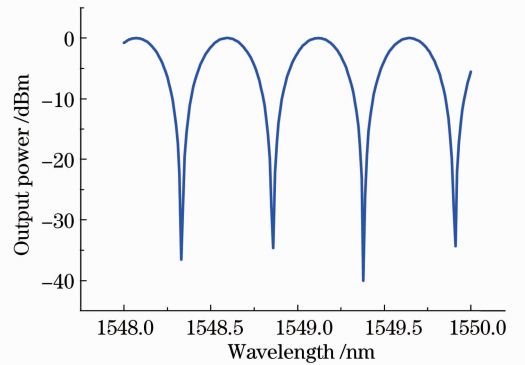


图 2 Sagnac 环光滤波器的归一化滤波曲线示意图
Fig. 2 Normalized filtering curve diagram of the Sagnac loop filter

3 实验结果与分析

根据图 1 构建实验系统, 实验中所使用的光源

为可调谐激光器,其输出波长范围设定为 1548~1550 nm,波长间隔为 0.01 nm,输入光滤波器的平均光功率为 2.3 dBm,Sagnac 环滤波器中插入保偏光纤的长度差 L_i 为 1.5 m。光由 3 dB 耦合器进入 Sagnac 干涉型光滤波器产生梳状滤波响应曲线,采用光功率计对光滤波器透射端光功率进行探测。

3.1 陷波深度可调谐研究实验结果分析

实验通过调节射频信号驱动相位调制器分析射频信号的功率和频率对光滤波器陷波深度的影响,实验结果如图 3、4 所示。

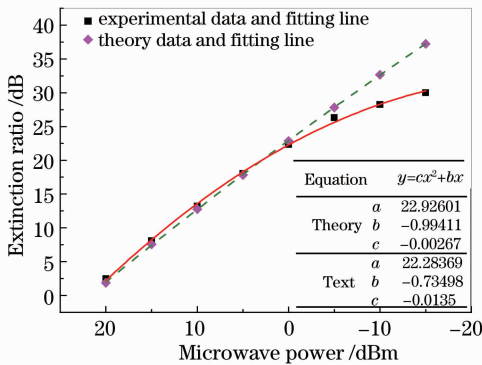


图 3 光滤波器陷波深度随射频功率变化

Fig. 3 Notch depth of the filter changing with RF power

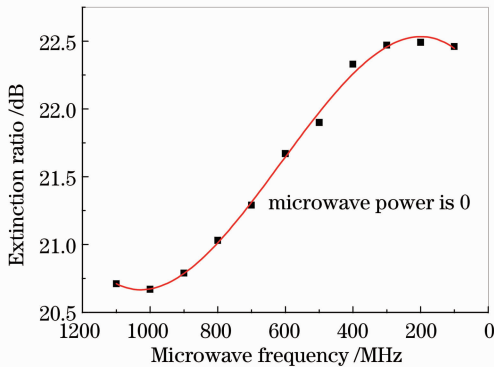


图 4 光滤波器陷波深度随射频频率变化

Fig. 4 Notch depth changing with RF frequency

图 3 为射频频率为 100 MHz,无直流偏置情况下光滤波器透射端滤波陷波深度随射频功率的变化。实验结果显示,当射频功率由 20 dBm 降低至 -15 dBm 的过程中,透射端光谱的陷波深度由 2.5 dB 增加至 30 dB。对数据点进行多项式拟合,得到光滤波器陷波深度随射频功率变化曲线。从图 3 中可以看出,在射频信号功率大于 -5 dBm 时,实验拟合曲线与理论曲线基本重合;在射频功率小于 -5 dBm 时,实验拟合曲线与理论曲线产生的误差增加,这是由于在实际功率较小的微波信号驱动下,随着系统陷波深度的增加,光耦合器及扰偏器的制作工艺偏差

使得输出信号不能够实现完全干涉相消,其对陷波深度所带来的影响无法忽略,因此在低射频功率时,实验拟合曲线与理论曲线两者之间的误差较大,可达 7 dB。同时,自由光谱范围保持 0.5 nm 不变,这与理论计算值 0.52 nm[按照(5)式]基本一致。

图 4 为射频功率为 0、无直流偏压情况下射频信号的频率由 1100 MHz 减小到 100 MHz 时,透射端输出滤波曲线陷波深度的变化情况。随着射频频率的减小,光滤波器陷波深度增加 1.6 dB,这是由于反向传输的效率随着频率的增加而降低造成;同时,输出光谱的自由光谱范围保持 0.5 nm 不变。

由图 3、4 实验结果的分析可以得到:射频功率是影响光滤波器陷波深度的主要因素。根据实际应用要求,通过对驱动射频信号功率的调整实现对光滤波器滤波深度的灵活控制。

3.2 滤波波长可调谐研究实验结果分析

在光滤波器滤波波长可调谐实验中,采用线性电源为相位调制器提供直流驱动电压,通过对光滤波器透射端滤波响应曲线的分析得到滤波波长偏移与直流偏置电压之间的函数关系。

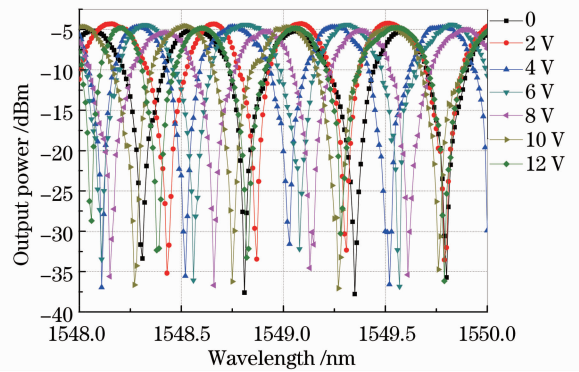


图 5 不同直流电压滤波器输出功率随波长变化

Fig. 5 Output power of filter changing with the wavelength in different direct biases

图 5 给出在不同直流偏压下光滤波器透射端光功率随波长的变化。从光谱图中显示,直流偏压变化(0~12 V)时,光滤波器的陷波深度高达 32 dB、自由光谱范围保持为 0.5 nm,但滤波波长实现了在一个自由光谱范围内的连续可调。

对图 5 的实验数据进一步分析,得到了在一个自由光谱范围内光滤波器滤波波长随直流偏压的变化。如图 6 所示,对实验数据拟合,得到滤波波长与直流偏压的一次线性表达式,其拟合线的斜率为 0.043 nm/V(即:直流电压每变化 1 V,波长变化 0.043 nm)与理论线表达式比较(斜率为 0.042 nm/V),直流偏压变化

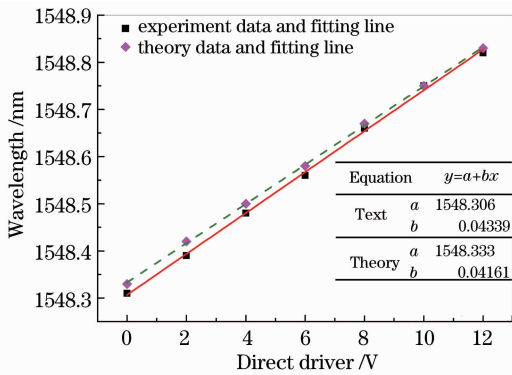


图6 滤波器滤波波长变化随直流偏压的变化
Fig. 6 Filtering wavelength changing with the direct driver

12 V时(实现一个自由光谱范围的调谐),波长偏移误差的绝对值为 0.01 nm。因此,通过对相位调制器直流驱动电压的精确控制,可以实现光滤波器中心滤波波长的调谐。

4 结 论

构建了一种基于 Sagnac 干涉结构的光梳状滤波器,从理论分析与实验测试两方面分别研究了射频驱动信号与直流偏置电压对光梳状滤波器透射谱的影响。实验通过调整射频驱动信号实现光滤波器陷波深度从 0 dB~30 dB 的灵活控制;控制直流驱动电压(0~12 V),在保证陷波深度为 32 dB 的情况下实现了光滤波器滤波波长在一个自由光谱范围内的连续可调,波长偏移最大误差仅为 0.01 nm,因此实现了高精度的波长选通。该系统实现了陷波深度与滤波波长的单独调谐、结构简单、控制灵活,在未来的 WDM 光网络系统与光测试系统中具有广泛的应用前景。

参考文献

- Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg grating [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405003.
曹莹,顾铮先. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405003.
- Michael Menard, Andrew G Kirk. Integrated Fabry-Perot comb filter for optical space switching [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(5): 768-774.

- Huang Yonglin, Li Jie, Ma Xiurong. High extinction ratio Mach-Zehnder interferometer filter and implementation of single-channel optical switch [J]. Opt Commun, 2003, 222(5): 191-195.
- Li Shule, Shao Jiafeng, Shen Qishun, *et al.*. Multiwavelength fiber ring laser with selectable grid spacing [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1802-1806.
李抒乐,邵加峰,沈启舜,等. 间隔可调多波长光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1802-1806.
- L Navniz, N F Guler. A novel technique for optical dense comb filters using sampled fiber Bragg grating [J]. Optical Fiber Technology, 2008, 14(2): 114-118.
- M P Fok, K L Lee, C Shu. Waveband-switchable SOA ring laser constructed with a phase modulator loop mirror filter [J]. Photon Technol Lett, 2005, 17(7): 1393-1395.
- Chen Zhiyong, Hao Xiaolong, Zheng Yanmin, *et al.*. Large-angle polarization-independent broadband filters based on silicon photonic crystal slabs [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305002.
陈志勇,郝小龙,郑彦敏,等. 大角度偏振无关硅膜光子晶体宽带滤波器[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305002.
- Li Hengwen, Jiang Yang, Xu Jing, *et al.*. Optical millimeter-wave sub-carrier generation based on optical parametric loop mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006005.
李恒文,江阳,徐静,等. 基于光纤参量环形镜的光毫米波副载波产生[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006005.
- Jinjin Guo, Yuanhong Yang, Gangding Peng. Analysis of polarization-independent tunable optical comb filter by cascading MZI and phase modulating Sagnac loop [J]. Opt Commun, 2011, 284(21): 5144-5147.
- E H W Chan, R A Minasian. Sagnac-loop-based equivalent negative tap photonic notch filter [J]. Photon Technol Lett, 2005, 17(8): 1740-1742.
- Zhang Hailiang, Tang Ming, Xie Yiwei, *et al.*. Programmable bandwidth-tunable and wavelength-variable fiber grating filter [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706011.
张海亮,唐明,谢意维,等. 可编程带宽波长独立可调光纤光栅滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706011.
- Qiao Guorong. The Comb Filter Based on High Birefringence Fiber and Its Application in Fiber Laser [D]. Hefei: Anhui University, 2012. 19-21.
乔国荣. 基于高双折射光纤的梳状滤波器及其在光纤激光器中的应用[D]. 合肥: 安徽大学, 2012. 19-21.
- Lilin Yi, Weisheng Hu, Yi Dong. A polarization-independent subnanosecond 2×2 multicast-capable optical switch using a Sagnac interferometer [J]. Photon Technol Lett, 2008, 8(20): 539-541.
- Le Nguyen Binh, Nguyen Duc Nhan. Phase modulator birefringence effect on multibound soliton formation in an active mode-locked fiber laser [J]. J Opt Soc Am B, 2012, 29(10): 2646-2658.
- Xiao Yueyu, He Sailing. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 346-350.
肖悦媛,何赛灵. 一种级联马赫-曾德尔滤波器设计的新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 346-350.

栏目编辑: 王晓琪