第 29 卷 第 9 期
2009 年 9 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 29, No. 9
September, 2009

文章编号：0253-2239(2009)09-2534-06

基于半导体光放大器的通带与阻带相互切换的全光微波滤波器

徐恩明 张新亮 周俐娜 张 羽 黄德修

（华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室，湖北 武汉 430074）

摘要 为了满足光纤射频链路和相位阵列天线应用要求，提出并实验验证了基于半导体光放大器(SOA)的全光微波滤波器，该结构利用 SOA 的放大自发辐射的交叉增益调制(XGM)原理，可以实现通带和阻带的相互切换。它是基于由 SOA 和可调谐窄带光学滤波器构成的光纤延时环，利用 SOA 的放大自发辐射谱的交叉增益调制产生负系数。当可调谐窄带光学滤波器的中心波长对准激光器的波长时，可获得一个高 Q 的带通滤波器频率响应；当可调谐窄带光学滤波器的中心波长偏离激光器波长一定量时，可获得陷波宽度较窄和通带相对较平的陷波滤波器频率响应。此结构通过调节可调谐窄带滤波器的中心波长可实现高 Q 与通带相对较平的陷波频率响应的切换。

关键词 光学器件；微波光子滤波器；交叉增益调制；半导体光放大器；放大自发辐射

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS20092909.2534

All-Optical SOA-Based Microwave Filter with Passband and Stopband Interchanged

Xu Enming Zhang Xinliang Zhou Lina Zhang Yu Huang Dexiu

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Institute of Opto Electronic scienceand Engineering Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei* 470074, *China*)

Abstract In order to satisfy the applications requirement in fiber-radio links and phased array antennas, a novel microwave photonic filter with passband and stopband interchanged is proposed and demonstrated. The filter is based on a recirculating delay line loop with a semiconductor optical amplifier (SOA) followed by a tunable narrowband optical filter. The negative tap is generated by using the wavelength conversion employing the cross-gain modulation of the amplified spontaneous emission spectrum of the SOA. When the central wavelength of the optical filter is aligned with the laser wavelength, a microwave bandpass filter is obtained. On the other hand, when the optical filter detunes from the laser wavelength a little, a narrow notch filter with flat passband is realized. The structure can be operated as a high Q or notch filter with flat passband by tuning the central wavelength of the optical filter.

Keywords optical device; microwave photonic filter; cross-gain modulation(XGM); semiconductor optical amplifier (SOA); amplified spontaneous emission(ASE)

1 引 言

近年来，用光学方法实现用于处理微波和射频信号的高性能滤波器已经引起了广泛关注。相对于传统纯电的射频电路，微波光子学滤波器具有很多优点，比如损耗低，集成度高，带宽宽，可调谐，抗电磁干扰，和重构性比较好等，目前已经出现了大量用光学方法实现微波滤波的结构[1,2]。其中衡量微波滤波器性能的重要指标之一就是 Q 值的大小，由于有限冲击响应(FIR)滤波器的 Q 值和信号路数相关，通过提高信号路数来提高 Q 值无疑会增加器件成本。而无限冲击响应(IIR)滤波器在激光相干时间小于最小延时时间的情况下(即光域非相干的情

收稿日期：2008-11-28；**收到修改稿日期**：2008-12-05

作者简介：徐恩明(1980—)，男，博士研究生，主要从事微波光子学方面的研究。E-mail：enmingxu@gmail.com

导师简介：张新亮(1971—)，男，教授，博士生导师，主要从事下一代光通信网络中高速光传输和高速全光信号处理中的关键技术以及关键光电子/光子集成器件等方面的研究。

况下)，用较少的器件可以实现高 Q 值[3~6]。另外，用于实现微波相消干涉的陷波滤波器也是微波滤波器的重要研究方向之一，在光纤射频链路和相位阵列天线等一些应用中，陷波滤波器是一个关键器件。因为微波光纤光学系统不但携带了有用的信号，而且还携带了无用的干涉信号，用陷波滤波器就可以滤除这些信号。已经报道的许多陷波滤波器大都是基于两路信号的方案[7~10]，它们存在一些缺点，比如：从通带到阻带的变化过程比较缓慢，通带也不平坦，导致所需通带中的频率产生损耗，因而在一些干涉抑制作用中损害了有用的信息。这些缺点使之在干涉抑制应用中受到限制。已经有人提出了一些通带平坦的陷波滤波器的实现方案[11~13]，但它们需要复杂的平衡探测或额外的电器件，比如两个探测器、加减器和电滤波器等，成本相对较高。另外有文献报道了通带和阻带可相互切换且通带平坦的陷波滤波器[14]实现方案，这种结构需要两个激光器和特殊设计的 2×1 电光调制器，无疑也增加了器件的成本。

本文提出并验证了一种新型微波滤波器结构，这种结构可实现通带比较平坦的陷波滤波，且在通带和阻带之间可以相互切换。该滤波器是由半导体光放大器(SOA)和其后连接一个可调谐窄带光学滤波器构成的光纤延时环，是基于对 SOA 的放大自发辐射(ASE)的交叉增益调制(XGM)来工作的，而不需要额外的探测光[15~20]。当可调谐光学滤波器的中心波长对准抽运光的波长时，可获得高 Q 的带通滤波器响应。而当可调谐光学滤波器的中心波长偏离抽运光的波长一定量时，通带和阻带可自由切换，并且得到了通带比较平坦的陷波滤波器。

2　基本原理

全光微波滤波器的结构示意图如图 1 所示，用相干时间小于环的延时时间的激光作为抽运光，以使此结构的微波滤波器工作在非相干区域。激光输出光被扫频的微波驱动的电光调制器所调制，把微波调制到光波上面，在光域内实现微波信号处理。调制的信号光首先被掺铒光纤放大器(EDFA)放大，EDFA 后面接有一个衰减器 A_1 用来调节输入到光纤延时环的信号光能量以及直通信号光能量，从而可以控制滤波器的响应特性。光学滤波器 T_1 用来滤除 EDFA 所产生的放大自发辐射噪声。经过 T_1 的信号光被耦合器分成两路，一路直接进入光电探测器，另一路则进入光纤延时环对信号光进行延时放大。

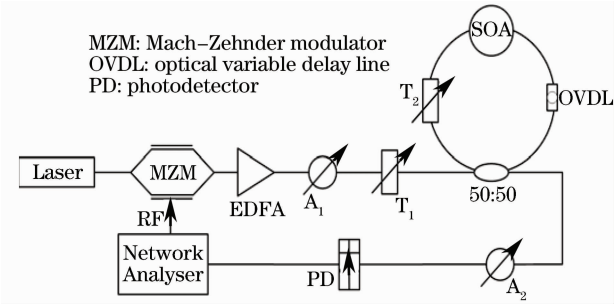

图 1　全光微波滤波器的结构示意图

Fig. 1　The schematic scheme of the all-optical microwave photonic filter

当调制的信号光到达 SOA 时，在被 SOA 放大的同时，也将调制 SOA 的 ASE 谱。当置于 SOA 后的可调谐窄带光学滤波器 T_2 的中心波长对准激光器的波长时，SOA 只用作放大器，T_2 可滤除 SOA 的噪声。调制的信号光通过 T_2 后，又被耦合器分成两部分，一部分作为第二路进入探测器，而另一部分则又进入光纤延时环进行延时放大，这样不断循环往复，获得一系列延时相等的信号光。这些具有相同延时的各路信号光在耦合器进行合波，在光域内是非相干的，是光强度的相加，而微波是相干的，因而微波相干叠加。从而获得一个高 Q 带通正系数的微波滤波频率响应。本课题组的周俐娜[21]已经对此结构的 Q 值作了具体的分析。

而当可调谐光滤波器 T_2 相对输入信号光有一定的失谐时，从 T_2 输出的 ASE 信号上就携带上了输入信号上的反向信息，如图 2 所示。转换信号光到达耦合器时，也被耦合器分成两部分，一部分进入探测器，而另一部分则又进入光纤延时环。当再次到达 SOA 时，由于转换信号光比较弱，对 SOA 的 ASE 的再次调制作用比较弱，放大作用占主导地位。放大的转换信号光到达耦合器时，又被耦合器分成两部分，一部分进入探测器，而另一部分则又进入光纤延时环进行延时放大，这样重复上述循环过程。具有相同延时的各路转换信号光在耦合器的输出实现微波信号的叠加，从而实现相应的微波滤波频率响应。

转换信号光在环内不断延时放大并在耦合器的输出叠加在一起，形成一个带通负系数的滤波器响应。而经过滤波器 T_1 的信号光直接进入到光电探测器的第一路信号形成的是一个全通响应。由于信号进入光电探测器之前已在耦合器的输出相叠加，而不是进入光电探测器之后在电域内叠加，所以总滤波器的响应是一个全通响应减去一个带通滤波器

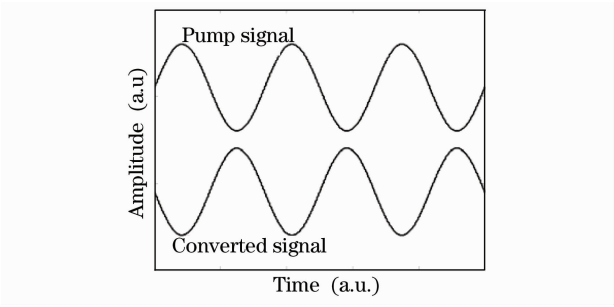

图 2 微波信号在 SOA 的输入和输出的转换信号的相位相差 180°

Fig. 2 The pump signal and the converted signal are out of phase

的响应。因而全通响应和带通负系数的滤波器响应的组合形成一个平通带陷波滤波器的响应。然而，可调谐窄带光学滤波器 T_2 的通带不平，而是类似高斯形状，当可调谐窄带光学滤波器 T_2 的中心波长偏离抽运光波长一点时，在抽运光波长处的信号不能全部被滤除，所以形成了在不同波长处的信号同时在光纤延时环内循环往复地延时放大并在耦合器的输出相叠加，因而，形成两个系数不同的带通滤波器响应。由于不同波长处信号具有 π 的相移，所以不同波长处的各路信号光强度在耦合器相减，总滤波器的频率响应可以看作是两个不同波长处的带通响应的相减，造成了所形成的陷波滤波器的通带不平。

抽运光波长处的信号光在光纤延时环内不断延时放大并在耦合器的输出相叠加所形成的频率响应的函数表达式可表示为

$$H_1(z)=\kappa+\frac{(1-\kappa)^2R_1gz^{-1}}{1-R_1\kappa gz^{-1}},\qquad(1)$$

其中 R_1 表示抽运光经过滤波器 T_2 后剩余的光强与经过滤波器 T_2 之前的光强的比值，κ 为耦合器的耦合比，g 为 SOA 的增益，$z=\exp(j2\pi fT)$，f 为微波的频率。$T=\frac{nL}{c}$ 为相应于 L 的延时时间，用于决定滤波器的通带频率。n 为光纤的折射率，c 为真空中的光的速度。

从(1)式可以看出，带通滤波器的响应特性和 R_1，κ，g 相关，通带带宽的宽度可以通过调节 SOA 的电流来调节。

转换信号光在光纤环内不断延时放大并在耦合器的输出相叠加所形成的带通负系数的频率响应的表达式为

$$H_2(z)=-\frac{(1-\kappa)^2R_2(g-\Delta g)z^{-1}}{1-R_2\kappa(g-\Delta g)z^{-1}},\qquad(2)$$

其中 R_2 表示转换信号光经过滤波器 T_2 后剩余的光强与经过滤波器 T_2 之前的光强的比值，Δg 是不同波长处的信号同时在光纤延时环内循环所形成两个系数不同的带通频率响应的增益差。

当可调谐窄带光学滤波器 T_2 的中心波长偏离抽运光的波长一点时，抽运光信号和转换信号同时在光纤延时环内循环所形成的总滤波器的频率响应的表达式为

$$H(z)=\kappa+\frac{(1-\kappa)^2R_1gz^{-1}}{1-R_1\kappa gz^{-1}}-\frac{(1-\kappa)^2R_2(g-\Delta g)z^{-1}}{1-R_2\kappa(g-\Delta g)z^{-1}},\qquad(3)$$

从(3)式可以看出光学滤波器 T_2 所引起的不同的损耗 R_1 和 R_2，SOA 的增益 g 和不同波长处的增益差 Δg 以及耦合器的耦合比 κ 决定了总滤波器的频率响应特性。如果 SOA 的电流固定不变，调节窄带光学滤波器 T_2 的中心波长将导致不同的光学滤波器的损耗和不同的增益差，从而导致具有不同滤波特性的频率响应。如果抽运光被完全滤除，那么(3)式中的 R_1 为零，表示总滤波器的频率响应是一个全通频率响应减去一个带通频率响应，这种条件下将得到平通带的陷波滤波器，如图 3 所示。

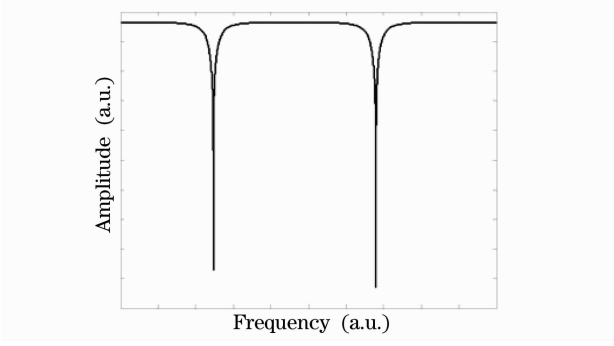

图 3 平通带陷波滤波器

Fig. 3 Microwave notch filter with flat passband

当可调谐窄带光学滤波器 T_2 的中心波长偏离抽运光的波长一点时，由于在激光波长处的信号没有被完全滤除，R_1 不为零，表示总滤波器的频率响应是一个正系数带通频率响应和一个负系数带通频率响应的差，所以造成陷波滤波器的通带不平，如图 4 所示。通带不平的程度随着 R_1 的变化而变化，随着 R_1 的变大，频率响应曲线按照 $A\rightarrow B\rightarrow C$ 的顺序变化，通带的平坦度变差。当正系数信号能量和负系数信号能量相等的时候，即

$$\kappa+\frac{(1-\kappa)^2R_1g}{1-R_1\kappa g}=\frac{(1-\kappa)^2R_2(g-\Delta g)}{1-R_2\kappa(g-\Delta g)},$$

此时可得到抑制比较高和陷波宽度比较窄的滤波器

频率响应。

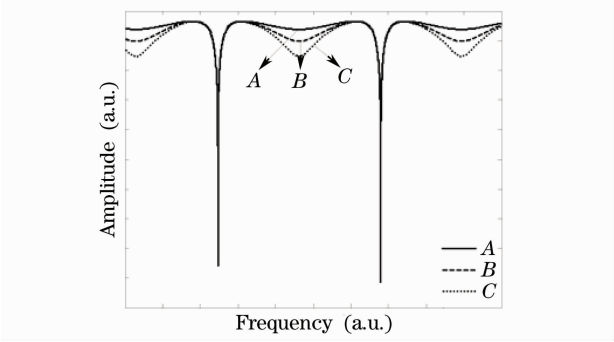

图 4　通带平坦度随着 R_1 的变大而变差

Fig. 4　The passband flatness is changing with the R_1

环的总长度决定了光纤延时环的延时时间，相应也决定了自由谱宽($1/T$)，也就决定了滤波器的通带或陷波频率的位置，因此，可以通过调节延时环的延时时间来调节滤波器的通带频率或陷波滤波器的陷波频率。所以，在光纤延时环内加一个可调的光学延时器可实现滤波器的频率可调。

当光滤波器 T_2 的中心波长固定不变，也可以通过调节抽运光的波长来达到通带和阻带的相互切换。当抽运光和滤波器 T_2 的中心波长对准时，可获得高 Q 的带通滤波频率响应；当抽运光偏离滤波器 T_2 时，这时可获得通带和阻带发生切换的陷波频率响应。

3　实验结果

全光微波滤波器结构的实验装置如图 1 所示。线宽为 500 kHz 的可调谐超结构光栅半导体激光器作光源，输出波长可以调节，在实验中，把波长设定在 1563.12 nm。激光器发出的光被微波扫频网络分析仪驱动的马赫-曾德尔调制器调制，偏置电压偏置在马赫-曾德尔调制器调制曲线的线性部分。调制信号光首先被 EDFA 所放大，EDFA 后面的衰减器 A_1 用来控制输入到光纤延时环的信号光能量以及直通信号光能量，从而可以控制滤波器的响应特性。3 dB 带宽为 1 nm 的可调谐光学滤波器 T_1 用来滤除 EDFA 所产生的噪声。经过光滤波器 T_1 的调制信号光被一个耦合比为 50∶50 的耦合器分成两路。光纤延时环内的 SOA 用作光放大器，一个 3 dB带宽 0.3 nm 的可调谐光学滤波器 T_2 用来滤除 SOA 的噪声或提取转换信号光。输出光信号由一个光电探测器接收探测，衰减器 A_2 用来保护探测器，频率响应由网络分析仪探测分析。首先把可调光学延时器置于零，当光滤波器 T_2 的中心波长对准抽运光的波长，SOA 的电流调至 140 mA 时，得到了一个高 Q 的带通频率响应，理论计算和实验测量频率响应如图 5(a)所示，自由谱宽(FSR)为 23.2 MHz，3 dB 带宽为 0.12 MHz，因而，其 Q 值为 193；另一方面，当光学滤波器 T_2 的中心波长调至 1562.88 nm，偏离抽运光的波长 0.24 nm 时，SOA 的电流调至 70 mA 时，通带和阻带发生了切换，获得了通带相对比较平坦，抑制比较大的陷波滤波器响应，理论计算和实验测量频率响应如图 5(b)所示。滤波器的陷波抑制比大约为 30 dB，3 dB 带宽为 42.48 kHz。从图 5(b)可以看出，陷波滤波器响应的通带不平，那是因为抽运光波长处的信号光没有被光学滤波器 T_2 完全滤除。为了完全滤除抽运光波长处的信号光，光滤波器 T_2 必须有较高的抑制比且偏离较大，但所得到的微波陷波的抑制比和陷波宽度将变的很差。为得到抑制比较高和陷波宽度较窄的滤波器频率响应，必须满足正系数的带通的信号能量和负系数带通的信号能量相等。所以，

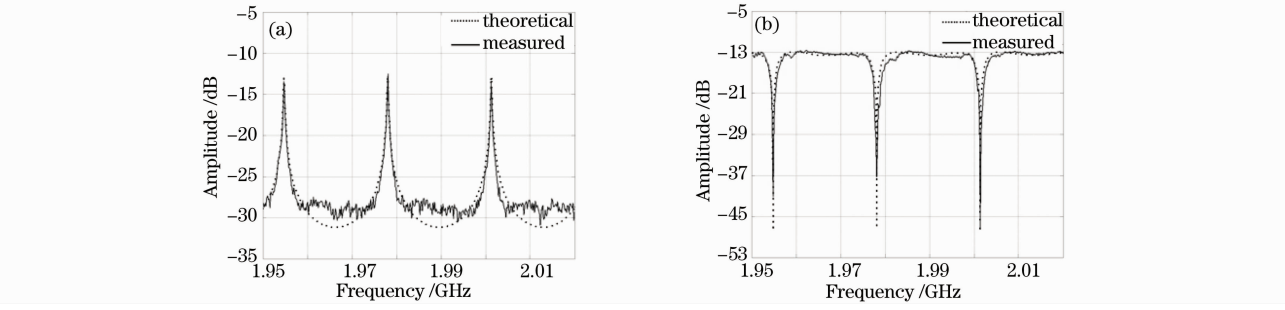

图 5　可调的光学延时器置于零时，理论计算和实验测量滤波器频率响应曲线图(a)可调谐滤波器 T_2 的中心波长对准抽运光波长(b)可调谐滤波器 T_2 的中心波长偏离抽运光波长 0.24 nm

Fig. 5　The theoretical and measured frequency responses for the OVDL is set zero(a) The central wavelength of the optical filter T_2 is aligned with the pump wavelength(b) The central wavelength of the optical filter T_2 detunes from the pump wavelength 0.24 nm

为尽量满足上述条件，光滤波器 T_2 的中心波长不能偏离太大，所以在现有光滤波器的情况下无法实现通带较平而又保持抑制比和陷波宽度较窄的滤波器频率响应。从图 5 可以看出，通过调节光学滤波器 T_2 的中心波长，实现了通带和阻带的相互切换。

为了验证滤波器的可调性，我们把光学延时器的延时增大 250 ps，这时的 FSR 为 23.07 MHz，通带或陷波的频率位置向左移了大约 15.4 MHz。理论计算和实验测量结果如图 6 所示。

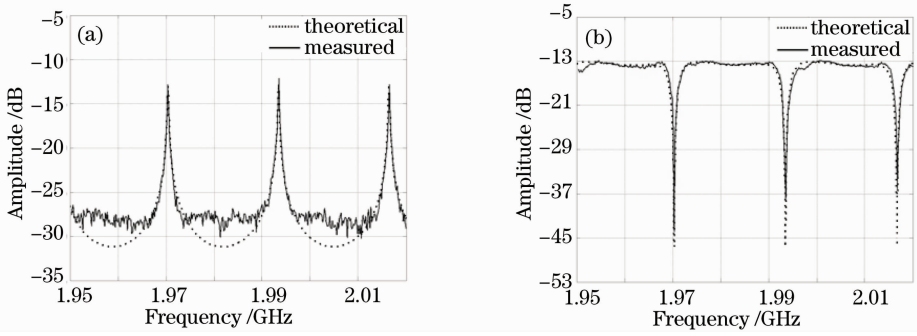

图 6 可调的光学延时器增大 250 ps 时，理论计算和实验测量滤波器频率响应曲线图(a)可调谐滤波器 T_2 的中心波长对准抽运光波长(b)可调谐滤波器 T_2 的中心波长偏离抽运光波长 0.24 nm

Fig. 6 The theoretical and measured frequency responses for the OVDL increasing 250 ps (a) The central wavelength of the optical filter T_2 is aligned with the pump wavelength (b) The central wavelength of the optical filter T_2 detunes from the pump wavelength 0.24 nm

4 结 论

提出并实验验证了基于 SOA 的全光微波滤波器，它是基于一个包含 SOA 和其后连接一个可调谐窄带光学滤波器的光纤延时环结构，利用 SOA 的放大自发辐射的 XGM 原理，实现了通带和阻带的相互切换。当可调谐窄带光学滤波器的中心波长对准激光器的波长时，可获得一个高 Q 的带通滤波器频率响应；当可调谐窄带光学滤波器的中心波长偏离激光器波长一定量时，可获得陷波宽度较窄和通带相对较平的陷波滤波器频率响应，陷波滤波器的通带不太平坦是由于可调谐窄带光学滤波器没有把抽运光波长处的信号完全滤除。通过调节可调的光学延时器可实现滤波器通带或陷波频率的可调。滤波器的通带和阻带的相互切换也可以通过调节激光器波长来实现。

参 考 文 献

1 Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. *J. Lightwave. Technol.*, 2006, **24**(1): 201～229

2 Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006. **54**(2): 832～846

3 Chan E H W, Minasian R A. Reflective amplified recirculating delay line Bandpass filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(6): 1141～1146

4 You N S, Minasian R A. Novel photonic recursive signal processor with reduced phase-induced intensity noise[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(7): 2588～2563

5 Hunter D B, Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals using an active-fiber Bragg-grating-pair structure[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1997, **45**(8): 1463～1466

6 You N S, Minasian R A. All-optical photonic signal processors with negative coefficients[J]. *J. Lightwave. Technol.*, 2004, **22**(12): 2739～2742

7 Kim T Y, Oh C K, Kim S J *et al.*. Tunable photonic microwave notch filter with negative coefficient based on polarization modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Letter.*, 2007, **12**(15): 907～909

8 Oh C K, Kim T Y, Baek S H, Park C S. Photonic microwave notch filter using cross polarization modulation in highly nonlinear fiber and polarization-dependent optical delay in high birefringence fiber[J]. *Opt. Express.*, 2006, **14**(15): 6628～6633

9 Chan E H W, Minasian R A. Novel All-optical RF notch filters with equivalent negative tap response [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5): 1370～1372

10 ChanE H W, Minasian R A. Photonic notch filter without optical coherence limitations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(7): 1811～1817

11 Chan E H W, Minasian R A. Remodulation based coherence-free photonic notch filter with wide passband[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(11): 641～642

12 MinasianR A, Alameh K E, Chan E H W *et al.*. Photonics-based interference mitigation filters[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2001, **49**(10): 1894～1899

13 Chan E H W, Minasian R A. Harmonic suppressed photonic microwave filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(12): 3150～3154

14 Chan E H W. All-optical reconfigurable microwave photonic signal processor[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2008, **50**(8): 1989～1991

15 Yi X K, Fang W, Ng J H *et al.*. Tunable microwave filter design using wavelength conversion technique and high dispersion time

delays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8): 857～859

16 Liu D M, Ng J H, Lu C. Wavelength conversion based on cross-gain modulation of ASE spectrum of SOA[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9): 1222～1224

17 Rong Zheng, Kamal Alameh, Yong Tak Lee *et al*.. Multitap coherence-free photonic RF filter employing semiconductor optical amplifier [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(5): 1103～1105

18 Ye Yabin, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi *et al*.. Chirp performance of converted signal in wavelength conversion based on cross2gain modulation in SOA[J]. *Acta Optica Sinica.*, 2002, **22**(4): 436～440
叶亚斌，郑小平，张汉一 等，基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的波长转换啁啾特性的分析[J]. 光学学报，2002, **22**(4): 436～440

19 Wang Fa qiang, Zhao Yu, Zhu qing, Theoretical study of extinction ration of wavelength converted optical signals based on SOA-XGM[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1495～1499
王发强，赵　宇，朱竹青，基于半导体光放大器一交叉增益调制波长转换器消光比特性的研究[J]. 中国激光，2004, **31**(12): 1495～1499

20 Dai Kehui, Zhang Xinliang, XU Fan。Actively mode locked fiber ring laser based on cross gain modulation effect of semiconductor optical ampl if ier [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2006, **33**(3): 293～297
戴科辉，张新亮，徐　帆. 基于半导体光放大器交叉增益调制效应的主动锁模光纤激光器[J]. 中国激光，2006, **33**(3): 293～297

21 Zhou Lina, Zhang Xinliang, Xu Enming *et al*.. Q value analysis of a one-order IIR microwave photonic filter based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(2): 1036～1041
周俐娜，张新亮，徐恩明 等. 基于半导体光放大器的一阶 IIR 微波光子学滤波器及其品质因素分析[J]. 物理学报，2009, **58**(2): 1036～1041