

# 基于光滤波法的高速调制信号快慢光研究

王甫\*, 何志坚

北京航天控制仪器研究所, 北京 100039

**摘要** 高速调制信号的慢光技术在未来高速光通信和光信号处理等领域具有重要的应用前景。基于光滤波法,提出了半导体光放大器(SOA)与带通滤波器串联的结构,实现了高速调制正弦信号和归零伪随机码(RZ-PRBS)脉冲信号动态可调时延的关键技术。对于正弦信号,当调制频率为 5 GHz 信号光经过光滤波结构时,改变 SOA 的注入电流,能够实现 40%和-10%的基频相对延时量;对于 RZ-PRBS 光脉冲信号,波长为 1549.735 nm(1550.525 nm),脉宽为 100 ps 的光脉冲信号入射滤波结构,改变 SOA 的注入电流,实现脉冲包络 44.6 ps(96.3 ps)的可调延时。实验数据表明,利用所提出的光滤波结构,通过改变 SOA 的注入电流,能够实现高速调制信号的可调延时。在精确控制 SOA 注入电流的情况下,该光滤波结构可用于光通信中的信号同步和比特量级的信号处理。

**关键词** 非线性光学; 半导体光放大器; 快光; 慢光

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1006006

## Superluminal and Slow Light of High-Bit Rate Modulation Signals Based on Light Filtering

Wang Fu\*, He Zhijian

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China

**Abstract** The slow light technology of high-bit rate modulation signals has potential applications in the fields of optical communications of the future and optical signal processing. A key technique of high-bit rate modulated sinusoidal signal and return to zero pseudo-random bit sequences (RZ-PRBS) pulse signal dynamic adjustable delay is achieved via the structure of semiconductor optical amplifiers (SOA) cascaded band-pass filter based on light filtering. For the high-bit rate sinusoidal signal, when the 5 GHz signal propagates through the cascaded system, the fundamental harmonic fractional delay of 40% and -10% can be achieved by altering the SOA injection current, respectively. For a RZ-PRBS optical sequence, 44.6 ps (96.3 ps) advance (delay) can be achieved by tuning the injection current at the wavelength of 1549.735 nm (1550.525 nm). Experimental data shows that the proposed optical filter structure can realize the adjustable delay of high-bit rate modulation signal by changing the injection current of SOA. In the case of precisely controlling the SOA injection current, the optical filter structure can be used for signal synchronization and bit-by-bit signal processing in a communication system.

**Key words** nonlinear optics; semiconductor optical amplifiers; superluminal light; slow light

**OCIS codes** 190.4360; 250.5980; 230.4320

## 1 引言

全光集成同步回路有望成为未来高速光通信和光信号处理系统的重要组成部分。相比于电学方法,其避免了繁琐的光电转换装置,同时拥有高速数据传输和处理的潜力<sup>[1]</sup>。在光分组交换网络中,实现比特量级的位同步对于光信号处理器而言至关重

要<sup>[2]</sup>。此外,位同步技术在实现位处理和全光 3R(再放大、再定时、再整形)再生中不可或缺<sup>[3]</sup>。快慢光技术是位处理的关键技术,对于高速光通信系统而言,如何控制在一个比特时间内快速、准确、高精度的光可调延迟是研究的难点,这一问题备受研究者关注。当前快慢光技术的实现原理有多种<sup>[4-10]</sup>,主要包括电磁诱导透明(EIT)慢光、受激布里渊

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-05-19; 录用日期: 2018-06-12

基金项目: 航天科技集团钱学森青年创新基金

\* E-mail: 12118409@bjtu.edu.cn

(SBS)慢光、受激拉曼(SRS)慢光、光子晶体波导慢光、结构慢光和相干布居振荡慢光(CPOs)等。上述方法中,相干布居振荡慢光凭借在常温固体材料中易于实现快慢光,且不需要精确的激光波长等优势而备受关注。然而,最早相干布居振荡慢光实验在红宝石晶体<sup>[11]</sup>和紫翠玉晶体<sup>[12]</sup>中产生,其传输的信号调制频率分别局限于 100 Hz 和 1 kHz,研究表明,其工作带宽受到了载流子寿命的限制。随后半导体光放大器(SOA)中产生的快慢光得以广泛研究,但受限于其几百皮秒的载流子恢复时间,其工作带宽仍被限制在百 MHz 量级<sup>[13-15]</sup>。

当前的光通信系统中,单通道比特速率已超过 40 Gb/s,因此高工作带宽和长时间延迟的快慢光技术急需实现。研究报道指出,有两种方案能够提升 SOA 中快慢光的工作带宽。Xue 等<sup>[16]</sup>基于探测器前光滤波的方案,利用调制频率为 19 GHz 的正弦信号实现了最大 150° 相移,对应于延迟带宽积(DBP)为 0.41;Berger 等<sup>[17]</sup>通过上转换相干布居振荡(UP-CPO)技术,实现了射频频率为 35 GHz 正弦调制信号,以及 89 ps 的电控可调延时。上述两种方案仅针对正弦信号,且 Berger 等<sup>[17]</sup>实现可调延时的信号频率不同于输入信号的新调制频率。

本文将采用带通滤波器与 SOA 级联的光滤波方案,分别实现调制频率为 5 GHz 正弦信号和脉冲脉宽为 100 ps,周期为  $2^7 - 1$ ,RZ-PRBS 信号的可调

延时。对于正弦信号,实验完成最大基频相对延时量(FHFD)为 0.40;对于 RZ-PRBS 信号,通过调节 SOA 的抽运电流,能够实现 96.3 ps 的时间延迟和 44.6 ps 的时间超前。

## 2 实验原理

图 1 为高速调制信号快慢光的测量原理,其由可调谐激光器(TLD)、铌酸锂调制器、增益钳制掺铒光纤放大器(GC-EDFA)、脉冲波形发生器(PPG)、InPhenix 公司研制的 SOA 及其后级联的带通滤波器(BPF),以及一些无源器件组成。SOA 的小信号增益可达 31 dB,1545~1560 nm 带宽范围内最大饱和输出功率为 12 dBm,其最大注入电流为 510 mA,并带有自动温控装置确保 SOA 的工作温度稳定。利用电滤波器对 PPG 产生的电脉冲方波信号整形,并对其进行编码,通过铌酸锂调制器对可调谐激光器(TLD,波长范围为 1525~1575 nm)输出激光进行外部调制,得到 RZ-PRBS 光脉冲信号或正弦信号,经过 GC-EDFA 放大后,由分光比为 99:1 的光耦合器 1 分束,功率为 1% 的光束进入到光功率计(PM),对输入的光功率进行实时监测,功率为 99% 的光束进入到 SOA 并与 BPF 形成串联结构,此后再经过分光比为 50:50 的光耦合器 2,将光束分成两束,分别进入光谱仪(OSA)和示波器(OSC)中,对输出的光谱和波形进行实时分析。

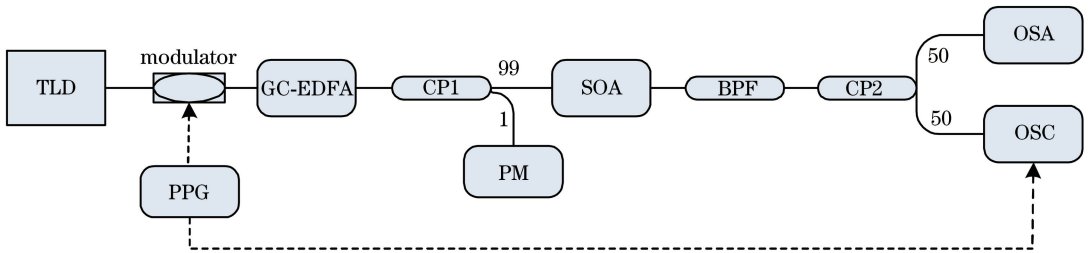


图 1 基于光滤波法的高速调制信号的快慢光原理图

Fig. 1 Schematic of superluminal and slow light of high-bit-rate modulation signals based on optical filtering

图 2 为带通滤波器的透射光谱,其 3 dB 带宽为 0.64 nm(波长范围为 1549.82~1550.46 nm),20 dB 带宽为 1.0 nm(波长范围为 1549.64~1550.64 nm)。快慢光效应主要取决于 SOA 的工作区域、带通滤波器的中心波长和调谐激光器(TLD)的可调波长。

当可调激光器出射的激光中心波长位于带通滤波器的通带内时,两个边带同时被 SOA 放大,进入示波器检测波形。两个边带由线宽增强因子引入的时间延迟量将会相互抵消,此时相位的改变量主要

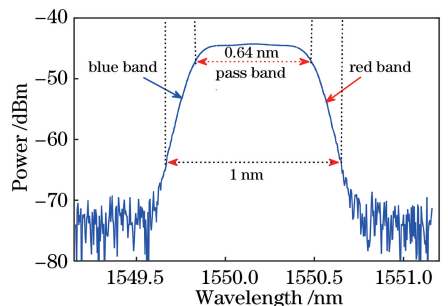


图 2 带通滤波器的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectrum of the band-pass filter

源自 SOA 传输过程中引起的相位延迟。当激光的中心波长处于滤波器的蓝移边带或红移边带内,即中心波长为 1549.64 ~ 1549.82 nm 或 1550.46 ~ 1550.64 nm 时,探测光的蓝色边带或红色边带部分将会被带通滤波器抑制,其另一个边带和载波受到抑制作用影响较小。将中心波长分别为

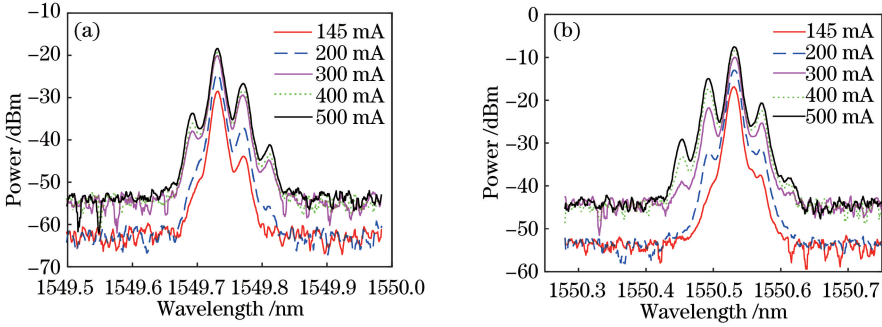


图 3 不同抑制及抽运电流情况下探测光的光谱。(a)抑制蓝移边带;(b)抑制红移边带

Fig. 3 Spectra of probe light with different pump currents and inhibition.

(a) Blue sideband blocked; (b) red sideband blocked

对于正弦信号在有源介质中传输,不能通过选择特殊参考点的方式来评价快慢光效应,需要一个统一的评价标准来评估正弦信号的快慢光,文献[18]提出了一种新的基于信号光的相位特性变化的测量方法,能够准确的描述正弦信号在有源介质中的快慢光效应,也可以解决由于参考点选择带来的测量问题。

FHFD 可以通过参考光和探测光的基频相位差来定义,表示为<sup>[18]</sup>

$$F_{\text{HFD}} = [\varphi_{\text{probe}}^1(\delta) - \varphi_{\text{ref}}^1(\delta)]/2\pi. \quad (1)$$

采用参考光和探测光的基频相位差来评价正弦波信号入射到有源介质的快慢光效应。

对于光脉冲信号,因实验过程中存在背景光,通过优化脉冲信号的快慢光延时度量方法<sup>[19]</sup>得到脉冲信号包络群延时的评价公式为

$$\tau_{\text{pulse}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t[p_{\text{out}}(t) - p_{\text{out\_bg}}]dt}{\int_{-\infty}^{\infty} [p_{\text{out}}(t) - p_{\text{out\_bg}}]dt} - \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t[p_{\text{in}}(t) - p_{\text{in\_bg}}]dt}{\int_{-\infty}^{\infty} [p_{\text{in}}(t) - p_{\text{in\_bg}}]dt}, \quad (2)$$

式中  $p_{\text{in}}(t)$  和  $p_{\text{out}}(t)$  分别为输入和输出信号光功率,  $p_{\text{in\_bg}}$  和  $p_{\text{out\_bg}}$  分别为输入和输出背景光功率,利用(2)式能够得到脉冲光经过滤波结构后的延迟时间。

脉冲信号的相对延时量可以用延时带宽积  $D_{\text{BP}}$  来表示:

1549.735 nm和 1550.525 nm、峰值功率为 1 mW 的正弦信号注入光滤波结构后的光谱如图 3 所示,可以看出,注入光中心波长处于带通滤波器蓝色边带或红色边带时,随着抽运电流的增加,激发态载离子的浓度将会增加,致使探测光的光谱得到展宽,探测光的边带也会因 BPF 的滤波作用而受到抑制。

$$D_{\text{BP}} = \frac{\tau_{\text{pulse}}}{T}, \quad (3)$$

式中  $T$  为脉冲的宽度,  $D_{\text{BP}}$  为针对脉冲型信号慢光相对延时量的评价方法,对应正弦调制信号的基频相对延时量  $F_{\text{HFD}}$ 。

### 3 实验与分析

将 SOA 注入电流为 145 mA 时,经过光滤波结构输出的信号光作为参考光;将 SOA 其他不同注入电流时,经过光滤波结构输出的信号光作为探测光。研究在不同注入电流或滤波状态等情况下,探测光和参考光的相位延迟的变化。

#### 3.1 高速调制正弦信号快慢光

图 4 所示为中心波长处于 BPF 不同边带内,在两种 SOA 注入电流情况下,示波器探测到探测光与参考光的波形。图 4(a) 为中心波长为 1549.735 nm 的信号光在 SOA 注入电流分别为 145 mA 与 500 mA 时,示波器探测到的波形,可以看出,信号光的波长处于 BPF 蓝移边带内,探测光信号出现了时间超前的快光效应。图 4(b) 为中心波长为 1550.525 nm 的信号光注入时,信号光的波长处于 BPF 红移边带内,探测光信号出现了时间延迟的慢光效应。

将中心波长为 1550.525 nm 和 1549.735 nm、调制频率为 5 GHz、平均功率为 2 mW 的正弦信号光输入到光滤波快慢光系统中,改变 SOA 的注入

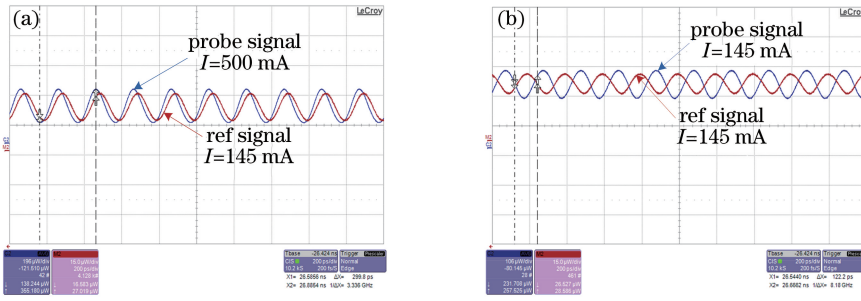


图 4 中心波长处于带通滤波器(a)蓝移和(b)红移边带内的探测光波形随 SOA 注入电流的变化

Fig. 4 Waveforms of the probe signal varied with different SOA injection currents for wavelength located in (a) blue sideband and (b) red sideband of BPF

电流,利用 FHFD 评价方法研究探测光与参考光之间的 FHFD。图 5 所示为实验结果,可以看出,中心波长 1550.525 nm 处于滤波器的红移边带内时,信号光经 SOA 放大后,红移边带受到抑制,探测光呈现慢光效应,随着注入电流的增加,探测光的 FHFD 快速增加,最终趋于平缓;当中心波长 1549.735 nm 处于滤波器蓝移边带内时,信号光经 SOA 放大后,蓝移边带受到抑制,探测光呈现快光效应,随着抽运电流的增加,探测光的 FHFD 也随之增加。

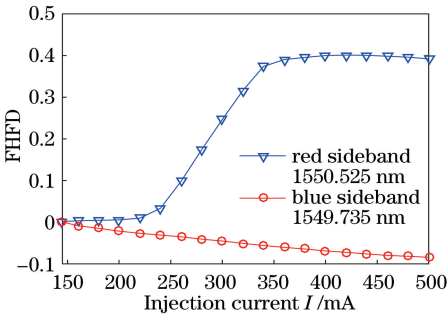


图 5 边带抑制的情况下,探测光所产生的 FHFD 随着 SOA 注入电流的变化

Fig. 5 FHFD caused by detection light versus injection current in SOA under the condition of sideband blocked

综上所述可知<sup>[20]</sup>,当短波长信号光输入时,其蓝移边带在经过 SOA 放大后,进入示波器探测前被 BPF 抑制,探测光将引入  $\alpha_1 \gamma_1$  的相移量,其中线宽增强因子  $\alpha_1$  为正值,由三阶磁化率产生的空间增益光栅的积分值  $\gamma_1$  也为正值,所以探测光将呈现相位超前。当长波长信号光输入时,其红移边带将在到达示波器探测前被抑制,探测光将引入  $-\alpha_2 \gamma_2$  的相移量,对应探测光将呈现相位延迟。当探测光中心波长处于滤波器的通带内,探测光经过 SOA 放大后,两边带和载波都将被示波器探测,相移量将与传统 SOA 快慢光结果一致,主要

由动态折射率引起,而线宽增强因子  $\alpha$  引入的相移效果将会相互抵消。光滤波法正是基于上述原因,突破了 CPO 对信号快慢光工作带宽的固有限制,实现了高调制速率信号的快慢光。

### 3.2 高速 RZ-PRBS 调制信号

采用上述光滤波系统,分别将中心波长为 1550.525 nm、1549.735 nm,峰值功率为 1 mW 的归零伪随机码 (RZ-PRBS,周期为  $2^7 - 1$ ,脉宽为 100 ps,占空比为 20%)入射光滤波快慢光系统,控制 SOA 的注入电流,由 100 mA 作为起始电流,50 mA 的步进递增至 500 mA。以 100 mA 时输出波形作为参考光,其他电流注入时输出波形作为探测光,利用(2)式,评估不同电流注入时探测光与参考光之间的包络延时,如图 6 所示。由图 6(a)可知,与小注入电流相比,200 mA 电流注入时,探测光的波形出现图样效应,进一步加大 SOA 注入电流时,探测光的图样效应将得到抑制。上述实验数据表明探测光的中心波长处于 BPF 红移边带内时,探测光的红移边带受到抑制,将会产生慢光[图 6(a)];反之,将会产生快光[图 6(b)]。实验表明,通过改变 SOA 的注入电流,经过光滤波快慢光装置,整个数据包络和内部单脉冲都将产生相同的可调延时。

为了展现基于 SOA 与带通滤波器串联结构的光滤波快慢光系统,以及 RZ-PRBS 光脉冲信号的可调延迟性能,图 7 所示为中心波长分别是 1549.735 nm 和 1550.525 nm 的光脉冲信号注入到光滤波快慢光系统,通过改变 SOA 的注入电流,能够实现延迟带宽积的连续可调。这一结论证实了采用上述系统,通过改变注入电流的方式,能够实现光脉冲信号时延的连续可调,为高速光通信的位处理技术提供新的研究视角。

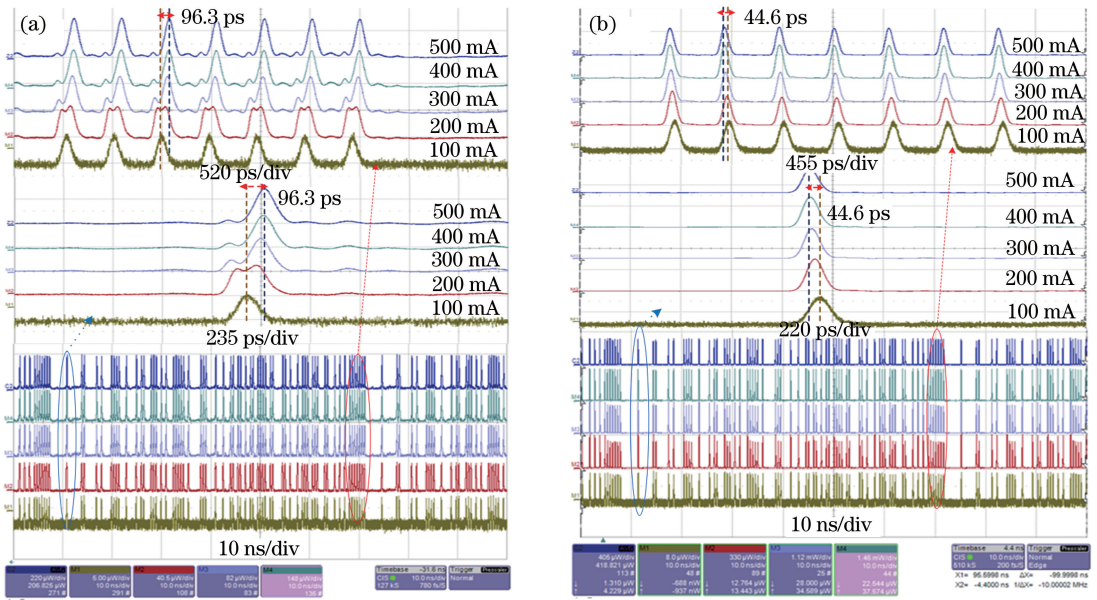


图 6 处于滤波器红移和蓝移边带内 RZ-PRBS 数据包的波形随着注入电流的变化。

(a)中心波长 1550.525 nm; (b)中心波长 1549.735 nm

Fig. 6 Waveforms of RZ-PRBS pulse sequence for wavelength varied with different injection currents located in red and blue sideband of filter. (a) Center wavelength is 1550.525 nm; (b) center wavelength is 1549.735 nm

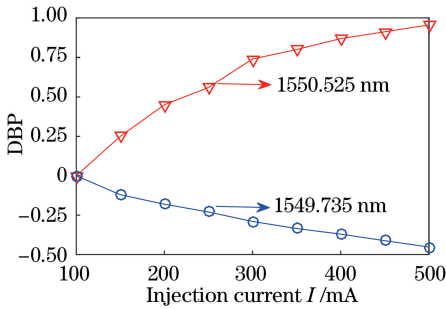


图 7 RZ-PRBS 光脉冲信号的 DBP 与 SOA 的注入电流及其中心波长的关系

Fig. 7 Relationship between DBP of RZ-PRBS optical signal with the injection current and wavelength of SOA

## 4 结 论

基于半导体光放大器与带通滤波器的光滤波结构,高速调制的正弦信号和 RZ-PRBS 脉冲信号的快慢光效应都得到了实验验证。其突破了传统相干布居振荡慢光对信号工作带宽的限制,且在改变 SOA 注入电流的情况下,信号包络的延迟时间连续可调。对于 5 GHz 的正弦信号,在不同的滤波情况下,改变 SOA 的注入电流,能够实现 40% 和 -10% 的 FHFD。对于周期为  $2^7-1$ 、脉宽为 100 ps、占空比为 20% 的 RZ-PRBS 信号,改变 SOA 的注入电流,能够实现脉冲包络时延连续可调,对应延迟(超前)带宽积 DBP 为 0.96(0.45)。因此该方案可用于光通信系统的时间同步和位操作信号处理等方面。

## 参 考 文 献

- [1] Rha H Y, Youn C J, Kwon Y H, *et al.* Real-time digital signal processing for high-speed coherent optical OFDM synchronization [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(11): 2294-2302.
- [2] Petrantonakis D, Apostolopoulos D, Zouraraki O, *et al.* Packet-level synchronization scheme for optical packet switched network nodes [J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 12665-12669.
- [3] Slaviša A. Analysis of power consumption in future high-capacity network nodes [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(3): 245-258.
- [4] Zhao Y, Zhao H W, Zhang X Y, *et al.* New mechanisms of slow light and their applications [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(5): 517-525.
- [5] Li C H, Wan Y, Mao Q M. Research of slow light performances of photonic crystal coupled resonator optical waveguides formed by oval rods cavities [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0416002. 李长红, 万勇, 毛强明. 椭圆柱微腔光子晶体耦合腔波导的慢光特性研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0416002.
- [6] Liu W K, Deng J S, Dong X W. Investigation on slow light in photonic crystal with air ring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0106004. 刘文楷, 邓建收, 董小伟. 空气环型散射元光子晶体慢光特性研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1):

- 0106004.
- [7] Chen Y, Luo P, Tian Y N, *et al.* Fano resonance slow light characteristics of metal-dielectric-metal waveguide coupled ring cavity with metallic double-slit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0924002.  
陈颖, 罗佩, 田亚宁, 等. 含金属双缝的金属-电介质-金属波导耦合环形腔 Fano 共振慢光特性研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0924002.
- [8] Zadok A, Eyal A, Tur M. Stimulated Brillouin scattering slow light in optical fibers [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(25): E38-E49.
- [9] Zhu N, Wang Y G, Ren Q Q, *et al.* Slow light in nonlinear photonic crystal coupled-cavity waveguides [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 57: 154-158.
- [10] Gan J L, Chen J L, Xu S H, *et al.* Slow/fast light using a very short  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fiber [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 670-672.
- [11] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(11): 113903.
- [12] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid [J]. *Science*, 2003, 301(5630): 200-202.
- [13] Pesala B, Chen Z Y, Uskov A V, *et al.* Experimental demonstration of slow and superluminal light in semiconductor optical amplifiers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 12968-12975.
- [14] Matsudaira A, Lee D, Kondratko P, *et al.* Electrically tunable slow and fast lights in a quantum-dot semiconductor optical amplifier near  $155\ \mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(19): 2894-2896.
- [15] Wang F, Wang Z, Wu C Q, *et al.* Compared propagation characteristics of superluminal and slow light in SOA and EDFA based on rectangle signals [J]. *Optics Communications*, 2015, 352: 96-109.
- [16] Xue W Q, Chen Y H, Öhman F, *et al.* Enhancing light slow-down in semiconductor optical amplifiers by optical filtering [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(10): 1084-1086.
- [17] Berger P, Bourderionnet J, Bretenaker F, *et al.* Time delay generation at high frequency using SOA based slow and fast light [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21180-21188.
- [18] Wang F, Wu C Q, Wang Z, *et al.* Evaluation of slow light periodic signals considering the distortion in EDF [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(3): 034207.
- [19] Peatross J, Ware M. *Physics of light and optics* [M]. Provo: Brigham Young University, Department of Physics, 2008: 74-88.
- [20] Chen Y H, Xue W Q, Öhman F, *et al.* Theory of optical-filtering enhanced slow and fast light effects in semiconductor optical waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(23): 3734-3743.