

斯托克斯脉冲波形对光纤中受激布里渊 散射慢光的影响

侯尚林¹ 李红兵^{1,2} 黎锁平¹ 刘延君¹ 徐永钊³

(¹ 兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050; ² 南通大学理学院, 江苏 南通 226007)

³ 东莞理工学院电子工程学院, 广东 东莞 523808

摘要 为了提高受激布里渊散射慢光的延时和抑制脉冲展宽,通过四阶 Runge-Kutta 法和特征线法对基于光纤的受激布里渊散射耦合方程组进行数值求解,计算了斯托克斯脉冲边沿陡峭程度、功率、宽度对延迟时间以及脉冲展宽因子的影响,提出了在低频范围内适当提高斯托克斯脉冲的边沿陡峭程度,可以优化延时和脉冲展宽因子的方法。该方法可以获得与高斯脉冲近似相等的延时和很小的脉冲展宽因子。基于波形能量差异的理论分析也证实了提高边沿陡峭程度对抑制脉冲展宽有明显的影响。

关键词 光纤光学;受激布里渊散射;慢光;脉冲展宽因子

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0606008

Influence of Stokes Pulse Shapes on SBS Slow Light in Fibers

Hou Shanglin¹ Li Hongbing^{1,2} Li Suoping¹ Liu Yanjun¹ Xu Yongzhao³

¹ School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

² School of Science, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China

³ Institute of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China

Abstract In order to increase time delay and decrease pulse broadening via stimulated-Brillouin scattering slow light, the coupled amplitude equations of stimulated Brillouin scattering in optical fibers are solved with fourth-order Runge-Kutta formula and characteristic-line method, the influence of the edge sharpness, magnitude and duration of injected Stokes pulse on time delay and pulse broadening factor are investigated. A method of optimizing time delay and pulse broadening factor is represented, namely, increasing the sharpness of Stokes pulse appropriately. Comparing with using Gaussian pulse as injected Stokes pulse, the similar time delay and less pulse broadening factor are obtained by this method. Theoretical analysis based on different power of injected Stokes pulse proves that improving the sharpness of injected Stokes pulse contributes a lot to reduce pulse broadening factor.

Key words fiber optics; stimulated Brillouin scattering (SBS); slow light; pulse broadening factor

OCIS codes 060.4370; 190.4370; 290.5900

1 引 言

近些年来,慢光技术由于有着众多潜在的应用而越来越引起人们的研究兴趣。相比其它几种慢光实现机制,光纤中基于受激布里渊散射(SBS)慢光具有在常温下能实现、大小可控、波长可调节和与现

有通信系统兼容等优点,尤其受到人们的关注,在全光缓存器、数据同步和光处理器等方面有很多应用和发展空间^[1~6]。

基于光纤的受激布里渊散射慢光现象最先由 Gauthier 在 2004 年提出^[7],2005 年 Song 等^[8]和

收稿日期: 2010-12-21; **收到修改稿日期**: 2011-02-14

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1010RJZA036)、兰州理工大学博士启动基金和广东省自然科学基金(10451170003004948)资助课题。

作者简介: 侯尚林(1970—),男,博士,教授,主要从事新型光纤与光传感技术、光子晶体光纤技术和光纤光栅技术等方面的研究。E-mail: houshanglin@gmail.com(中国光学学会会员号: S040111677)

Okawachi 等^[9]进行了论证。Herraez 等^[10]通过注入高斯噪声信号的办法将普通单模光纤的增益带宽由 40 MHz 提高到 325 MHz,随后 Zhu 等^[11]将此带宽拓展到 12.6 GHz, Song 等^[12]通过使用频率间隔为 2 倍布里渊频移的两个独立抽运源获得了 25 GHz 的增益带宽,使得 SBS 慢光技术能应用到每秒几十吉比的光通信系统中。

本文通过采用四阶 Runge-Kutta 法^[13]和特征线法^[14,15]求解基于光纤的受激布里渊散射振幅耦合方程组,从斯托克斯(Stokes)脉冲波形入手,着重讨论了其边沿陡峭度、功率、宽度对时间延迟和脉冲展宽因子的影响,分析了影响规律和原因,找到一种在低频范围内可以适度减小脉冲展宽因子的办法,为今后的光纤慢光器件设计提供理论参考。

2 理论基础和数值模型

受激布里渊散射是由光纤中反向传播的 Stokes 光和抽运光与传输媒质相互作用产生,其振幅耦合方程组为^[16,17]

$$-\frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{n_g}{c} \frac{\partial E_p}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} E_p + i \frac{\gamma_e \omega_p}{2n_g c \rho_0} E_s \rho, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{n_g}{c} \frac{\partial E_s}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} E_s + i \frac{\gamma_e \omega_p}{2n_g c \rho_0} E_p \rho^*, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\Gamma_B}{2} - i(\Omega_B - \Omega) \right] \rho = i \frac{\gamma_e q^2 \epsilon_0}{8\Omega_B} E_p E_s^*, \quad (1c)$$

式中 E_p, E_s 为抽运波、Stokes 波慢变包络的归一化电场幅度, $|E_p|^2 A_{\text{eff}}, |E_s|^2 A_{\text{eff}}$ 为抽运波、Stokes 波的峰值功率, A_{eff} 为光纤有效截面积, ρ 为电致伸缩效应引起的光纤密度起伏产生的声波振幅, ω_p, Ω 分别是抽运波和声波的角频率, n_g 为光在光纤中的群折射率, c 为光在真空中的传播速度, ϵ_0 为真空中的介电常数, $\alpha(\gamma_e)$ 为衰减(电致伸缩)系数, $+$ ($-$) z 方向为 Stokes(抽运)光传播方向, Γ_B 是布里渊增益谱的半峰全宽(FWHM),其大小与声子寿命 T_B 有关, $\Gamma_B = 1/T_B, \Omega_B$ 是布里渊频移。

假设抽运波为连续波,根据小信号理论,慢光现象来源于群折射率是频率的函数^[18]

$$n(\omega_s) = n_g + \frac{c g_B I_p}{\Gamma_B} \frac{1 - 4\delta\omega^2/\Gamma_B^2}{(1 + 4\delta\omega^2/\Gamma_B^2)^2}, \quad (2)$$

式中 I_p 是抽运光的强度, $\delta\omega$ 是失谐频率,即 Stokes 光频率与布里渊增益谱中心频率的差值, g_B 为增益系数,与材料的物理属性有如下关系:

$$g_B = \frac{\gamma_e^2 \omega_p^2}{n_g v_B c^3 \rho_0 \Gamma_B},$$

式中 v_B 为声波的速度。

时间延迟 T_d 定义为发生与不发生 SBS 时输出 Stokes 波的峰值时刻的时间差;相对时间延迟定义为时间延迟与输入 Stokes 脉冲半峰全宽的比值,即

$$T_{rd} = T_d/T,$$

式中 T 为输入 Stokes 光的 FWHM;脉冲展宽因子 B 定义为输出 Stokes 波的 FWHM 与输入 Stokes 波的 FWHM 的比值。由小信号理论^[18],有

$$T_d = G/\Gamma_B, \quad (3)$$

$$B = \sqrt{1 + \frac{16 \ln 2}{T^2 \Gamma_B^2} G}, \quad (4)$$

式中 $G = g_B I_p L$ 为小信号增益, L 是光纤的长度。为了体现抽运波对 Stokes 波能量的实际贡献,定义实际增益

$$G_r = \lg(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}), \quad (5)$$

式中 P_{out} 和 P_{in} 分别是输出和输入的 Stokes 波峰值功率。

假设输入 Stokes 波为超高斯脉冲

$$U(t) = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_0}\right)^{2m}\right], \quad (6)$$

式中 t 为脉冲传输的时间, $U(t)$ 为归一化振幅, T_0 为脉冲的半宽度($1/e$ 强度处), m 为表征脉冲形状的参数($m = 1$ 即为高斯脉冲, $m > 1$ 为超高斯冲,且 m 越大边沿越陡)。则对于不同参量 m , 具有相同半峰全宽 T 的脉冲可以写作

$$U(t) = \exp\left[-2^{2m} (\ln 2) \left(\frac{t}{T}\right)^{2m}\right]. \quad (7)$$

为了描述不同参量 m 的脉冲所具有能量的差异,引入归一化脉冲信号的平均强度

$$\bar{I}_s = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [U(t)]^2 dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \left\{ \exp\left[-2^{2m} (\ln 2) \frac{t^{2m}}{T^{2m}}\right] \right\}^2 dt. \quad (8)$$

在数值计算过程中,通过慢变包络近似,首先在某一时刻通过傅里叶变换和傅里叶逆变换对(1c)式进行求解,得出该时刻 ρ 的值^[17,19],对(1a)~(1b)式采取特征线法将其化为单变量的偏微分方程,代入先前所计算的 ρ 值,采用四阶 Runge-Kutta 法计算出下一时刻所有位置的 E_p 和 E_s 的值,把这组值作为下一时刻计算 ρ 的初值,如此反复,最后得到输出的斯托克斯波形。

3 数值计算

本文以普通的单模光纤为传输介质,数值计算了不同 m 、功率和宽度的 Stokes 脉冲所产生的慢光

延时和脉冲展宽因子。在此过程中,假设抽运波是连续波,输入 Stokes 脉冲振幅满足(7)式;其它参数如下: $L=50\text{ m}$, $n_g=1.45$, $\alpha=0.02\text{ dB/km}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $A_{\text{eff}}=50\text{ }\mu\text{m}^2$, $\Gamma_B/2\pi=40\text{ MHz}$, $\Omega_B/2\pi=10.8\text{ GHz}$ 以及 $g_B=5\times 10^{-11}\text{ m/W}$, 其中 λ 为 Stokes 波的波长。

3.1 具有不同参量 m 的 Stokes 脉冲对 SBS 慢光的影响

图 1 所示为输入脉冲为不同参量 m 时,时间延迟以及脉冲展宽因子与实际增益间的关系,Stokes 脉冲 FWHM 为 120 ns ,功率为 $0.1\text{ }\mu\text{W}$ 。从图 1(a)可以看出,随着实际增益的不断增加,延迟时间先随

之增加达到最大值,接着减小,甚至会出现负值(快光现象)。对比不同的 m ,发现最大延时和出现最大延时的增益是随着 m 的增加而减小的。这是因为当 m 从 $0.5, 1, 1.5, 3$ 依次变化时,波形愈接近于方波,由(8)式可以计算出归一化 Stokes 脉冲平均强度依次为 $0.5410, 0.6805, 0.7559$ 和 0.8705 ,也这就意味着对于同样 FWHM 和峰值的脉冲而言, m 值越高的脉冲它的能量也就越高,在抽运光光强不变的情况下,越容易饱和,即出现最大延时的实际增益会减小,根据(3)式,这也导致了最大延时的减小。

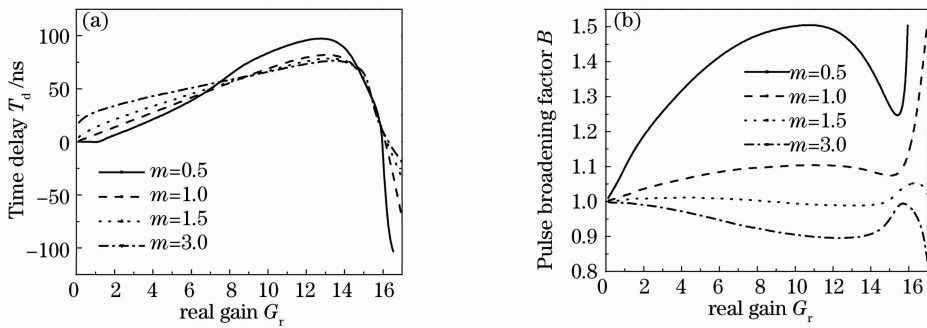


图 1 不同的参数 m 下,输出 Stokes 脉冲参量与实际增益的关系。(a)延时 T_d 与实际增益的关系, (b)脉冲展宽因子 B 与实际增益的关系

Fig. 1 Parameters of output Stokes pulse versus real gain for different parameter m . (a) time delay T_d versus real gain, (b) pulse broadening factor B versus real gain

由图 1(b)可见,一个对实际应用比较有利的现象,那就是当 $m=1.5$ 时,脉冲展宽因子基本围绕在 1 附近;当 $m=1$ 时,最大延时处的脉冲展宽因子为 1.10;而当 $m=1.5$ 和 3 时,随着实际增益的增加,脉冲展宽因子逐渐减小至峰值后逐渐增加,在 G_r 约大于 15.5 后,又会急剧减小。出现这种情形的原因可以从图 2 中得到很好的解释,图 2 是不考虑 SBS 效应和考虑 SBS 效应时,对应于不同的 3 个 m 值,在 $G_r=5$ (未达到增益饱和)和 $G_r=13$ (接近增益饱

和)时,输出端的 Stokes 归一化波形,横坐标 t 为时间轴。从图 2(a)可以看出,随着 m 的增加,波形的前后沿在时域内越来越陡,在频域内则会越来越宽,因此根据(2)式,前沿各点间速度差值就会增加,从而前沿压缩的比较厉害;此外由于 m 的增加,导致具有同样峰值的输入波形的实际能量的提高,使得抽运光能量大部分消耗在前沿,后沿获得的能量相对较小,即后沿实际增益也较小,从而抑制了后沿的展宽,这给降低脉冲展宽因子带来了巨大贡献,从而

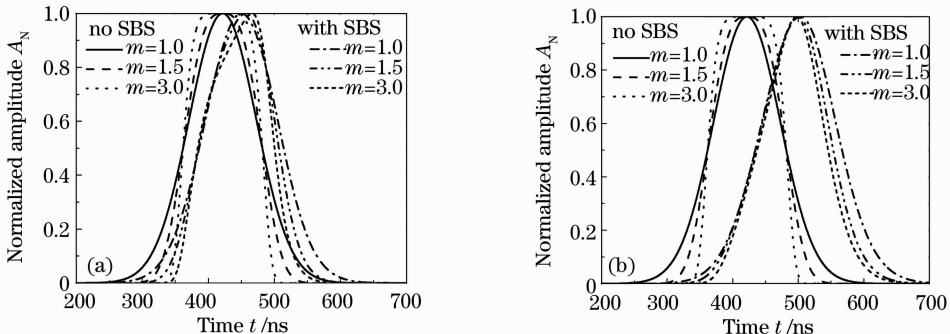


图 2 Stokes 波的输出波形。(a) $G_r=5$, (b) $G_r=13$

Fig. 2 Output Stokes pulse for different real gain. (a) $G_r=5$, (b) $G_r=13$

使得 $m=1.5$ 的 Stokes 脉冲在饱和增益之前的绝大部分实际增益里, 脉冲展宽因子一直接近于 1.00。当实际增益逐渐增加至饱和增益时, 后沿的获得的能量不断提高, 从而展宽加剧, 导致脉冲展宽因子的增加, 如图 2(b) 所示。实际增益再次增加后, 超出了小信号范围, 波形出现重大失真。

3.2 不同功率和 FWHM 的 Stokes 脉冲 ($m=1.5$ 时) 对 SBS 慢光的影响

基于上面所得到的结论, 即在 $m=1.5$ 时, 上述脉冲的展宽很小, 下面的数值模拟将选取不同大小功率和 FWHM 的 Stokes 脉冲 ($m=1.5$) 作为输入脉冲。图 3 展现了不同功率的 Stokes 脉冲所产生的时延和脉冲展宽因子跟实际增益的关系。从

图 3(a) 中可以发现, 随着输入功率的增加, 最大延迟时间和产生最大延迟时间所需的实际增益都随之减小, 而未到饱和增益时的脉冲延时基本相等, 这是因为功率相对较大的脉冲在达到饱和时所需要的增益较小, 而在小信号区域时间延迟是跟增益近似成正比例关系。从图 3(b) 中则可以看出, 当实际增益小于饱和增益时, 脉冲的展宽因子基本都在 1.00 附近; 随着增益的逐渐增加, 功率最大的脉冲的脉冲展宽因子最先出现图 1(b) 中所示脉冲展宽因子峰, 其余脉冲的脉冲展宽因子随着功率从大到小的顺序依次出相应的峰, 且脉冲展宽因子峰的高度越来越大, 这同样与平均强度高的脉冲容易饱和是分不开的。

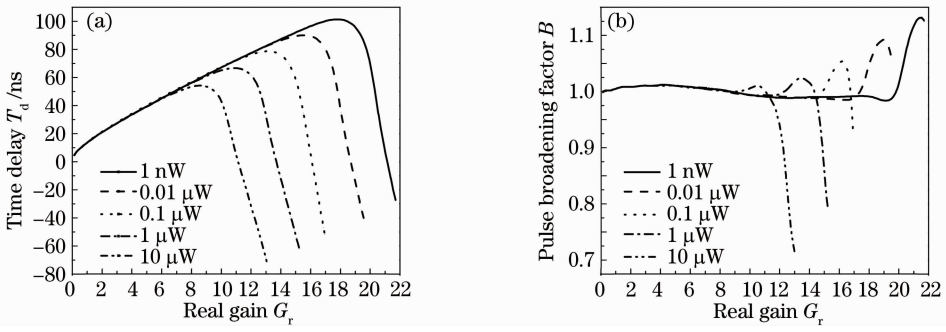


图 3 不同的功率下, 输出 Stokes 脉冲参量与实际增益的关系。(a) 延时 T_d 与实际增益的关系, (b) 脉冲展宽因子 B 与实际增益的关系

Fig. 3 Parameters of output Stokes pulse versus real gain for different power. (a) time delay T_d versus real gain, (b) pulse broadening factor B versus real gain

对不同 FWHM 功率为 0.1μ W, 其他参量和前面一致的 Stokes 脉冲, 相对延迟时间和脉冲展宽因子随实际增益的变化关系如图 4 所示。图 4(a) 表明 FWHM 越小的脉冲可以获得更大的相对时间延迟, 且出现最大延时的实际增益也逐渐增加, 这是因为对于同样峰值、FWHM 越小的脉冲, 其时域内的

能量也越小, 因而其达到饱和时所需能量亦较高, 较高的饱和增益带来了较大的时间延迟。图 4(b) 中 FWHM 较小脉冲的脉冲展宽因子的变化规律与 $T=120$ ns 时的规律则有所不同, 而是和高斯脉冲作为输入脉冲时的情形类似, 这主要是因为, 随着 FWHM 的减小, 信号脉冲所包含的能量减小, 对抽

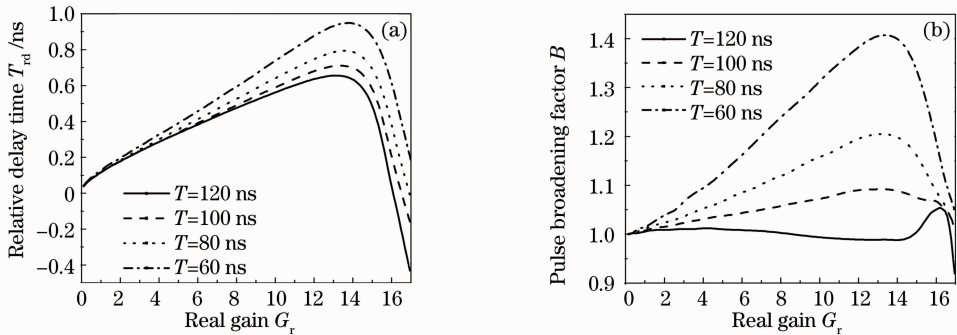


图 4 不同的脉冲宽度下, 输出 Stokes 脉冲参量与实际增益的关系。(a) 相对时间延迟 T_{rd} 与实际增益的关系, (b) 脉冲展宽因子 B 与实际增益的关系

Fig. 4 Parameters of output Stokes pulse versus real gain for different duration. (a) relative time delay T_{rd} versus real gain, (b) pulse broadening factor B versus real gain

运的消耗也减小,这样脉冲的后沿所获得的能量相对 $T=120\text{ ns}$ 时较高,故后沿展开也较宽,这抵消了脉冲较陡前沿导致的脉冲压缩,从而与高斯脉冲作为输入脉冲时的情形类似。因此提高 m 值,使得前沿更陡,预期可以减小短脉冲的脉冲展宽因子。数值模拟计算验证了这一点,对于FWHM为 60 ns 的脉冲而言,当 $m=5$ 时,最大延时所对应的脉冲展宽因子从 $m=1.5$ 时候的 1.406 下降到 1.295 。

4 结 论

根据上面的数值计算的结果和理论分析,发现降低输入Stokes脉冲的功率和FWHM,都会带来延时(或相对延时)的提高和脉冲展宽因子的增加;利用边沿陡峭程度较高的脉冲作为输入Stokes脉冲,对减小脉冲展宽因子有很大的贡献,选择合适的 m 值,可以带来理想的延时和脉冲展宽因子。尽管对短脉冲而言,这种调节效果会越来越弱,但这种改善,对降低光缓存器误码率,提高工作频率还是起着一定的作用。

参 考 文 献

- 1 J. J. Longdell, E. Fraval, M. J. Sellars *et al.*. Stopped light with storage times greater than one second using electromagnetically induced transparency in a solid [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(6): 063601
- 2 M. F. Yanik, W. Suh, Z. Wang *et al.*. Stopping light in a waveguide with an all-optical analog of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(23): 233903
- 3 Z. Zhu, D. J. Gauthier, R. W. Boyd. Stored light in an optical fiber via stimulated Brillouin scattering [J]. *Science*, 2007, **318**(5857): 1748~1750
- 4 Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Li Yuan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow light in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2437~2440
赵军发, 杨秀峰, 李元等. 光子晶体光纤中受激布里渊散射慢光研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2437~2440
- 5 Liu Yu, Ren Liyong, Wang Shihe. Theoretical study of stimulated Brillouin scattering slow light and pulse-broadening

- reduction using double broadband pump in optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2077~2082
- 刘宇, 任立勇, 王士鹤. 光纤中双宽带抽运SBS慢光及其脉冲展宽减小的理论研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2077~2082
- 6 Ding Yingchun, Ren Yurong. Latest developments of stimulated Brillouin scattering slow-light pulse delays in optical fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 51~57
丁迎春, 任玉荣. 利用受激布里渊散射在光纤中实现慢光延迟线的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 51~57
 - 7 D. J. Gauthier, Physics and applications of slow light. Fitzpatrick center for photonics and communication systems [R]. Duke University, Durham, NC, 2004
 - 8 K. Y. Song, M. G. Herráez, L. Thévenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 82~88
 - 9 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in optical fiber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15): 153902
 - 10 M. González Herráez, K. Y. Song, L. Thévenaz. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1395~1400
 - 11 Z. Zhu, A. M. C. Dawes, D. J. Gauthier *et al.*. Broadband SBS slow light in an optical fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 201~206
 - 12 K. Y. Song, K. Hotate. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 217~219
 - 13 C. Martijn de Sterke, Kenneth R. Jackson, B. D. Robert. Nonlinear coupled-mode equations on a finite interval: a numerical procedure [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(2): 403~409
 - 14 M. J. Damzen, M. H. R. Hutchinson. High-efficiency laser-pulse compression by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(6): 313~315
 - 15 C. G. Parazzoli, W. W. Buehnan, R. D. stultz. Numerical and experimental investigation of a stimulated Raman half resonator [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(6): 872~880
 - 16 V. P. Kalosha, L. Chen, X. Y. Bao. Slow light of subnanosecond pulses via stimulated Brillouin scattering in nonuniform fibers [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 021802
 - 17 V. P. Kalosha, L. Chen, X. Y. Bao. Slow and fast light via SBS in optical fibers for short pulses and broadband pump [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(26): 12693~12703
 - 18 Z. Zhu, D. J. Gauthier, Y. Okawachi *et al.*. Numerical study of all-optical slow-light delays via stimulated Brillouin scattering in an optical fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2378~2384
 - 19 I. Velchev, D. Neshev, W. Hogervorst *et al.*. Pulse compression to the subphonon lifetime region by half-cycle gain in transient stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(12): 1812~1816