

# 光纤光栅中孤子时延特性研究

王葵如 程洁琳 陈 功 饶 岚 桑新柱

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 从光纤光栅慢光产生的物理机理和非线性耦合模方程组, 仿真分析了均匀布拉格光栅中光栅孤子传输时的减速特性; 利用高速示波器搭建了测量高能量、窄脉冲通过布拉格光纤光栅后时延特性的实验系统, 分别测量了由普通单模光纤和高非线性光纤制作的均匀光栅对光脉冲的时延特性。实验结果为: 用 5 cm 长普通单模光纤制作的布拉格光栅可以在其中传输的光脉冲产生 426 ps 的时延, 而相同长度高非线性布拉格光纤光栅对光脉冲的时延量为 1.639 ns。计算后可知, 光脉冲在对应光栅中的传输速度分别约为  $1.17 \times 10^8$  m/s 和  $0.31 \times 10^8$  m/s。结果说明光纤光栅能够实现光速减慢, 而且高非线性光纤光栅对光脉冲的减速效果要好于普通单模光纤制作的光栅。

**关键词** 非线性光学; 慢光; 时延; 布拉格光栅孤子; 光纤光栅

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0219001

## Research on Time-Delay Characteristics of Solitons in Fiber Bragg Grating

Wang Kuiru Cheng Jielin Chen Gong Rao Lan Sang Xinzhu

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** Based on slow light theory and nonlinear coupled-mode equations of fiber Bragg grating, the characteristics of the velocity when Bragg grating (BG) solitons transmitting through fiber Bragg grating (FBG) are simulated. The time delay of the BG solitons is measured by an experimental system, which based on the high-speed oscilloscope. The time delay of the high-intensity narrow pulses propagating in the BG is acquired. The results show that, with BG on ordinary signal-mode fiber of 5 cm long, the time-delay is 426 ps and its speed is  $1.17 \times 10^8$  m/s, and that in other case, when the fiber has high nonlinearity, the time delay is 1.639 ns, and the speed of the BG soliton is  $0.31 \times 10^8$  m/s. Thus, the deceleration of the BG soliton is possible, and the velocity with that the soliton transmits through the high nonlinear FBG is lower than that through the ordinary signal-mode FBG.

**Key words** nonlinear optics; slow light; time delay; Bragg grating soliton; fiber grating

**OCIS codes** 190.4370; 060.3735; 190.4360

## 1 引 言

随着对大容量、高速率通信要求的不断提高, 全光通信网成为目前通信网的发展趋势所在, 制约全光通信网发展的技术瓶颈之一是光缓存器件的缺乏。当光在介质中传输时设法使光速减慢以致停止是研究光缓存器的一个思路<sup>[1~5]</sup>, 而利用布拉格光纤光栅(FBG)实现光速减慢是其中的一个研究课题。光纤光栅是一个比较成熟的器件, 它体积小、抗电磁干扰, 便于与光纤连接, 在光纤通信、光纤传感方面的应用已有很多, 但在慢光效应方面的研究还

较少。

当较高强度的光脉冲通过光纤时, 在色散和非线性自相位调制的共同作用下, 光脉冲可以以孤子形式进行传输, 脉冲形状和幅度保持不变, 称为光孤子<sup>[6]</sup>。1980年, 美国贝尔实验室 L. F. Mollenauer 等<sup>[7]</sup>在实验中首次观察到了光纤中的孤子现象。而当光脉冲在光纤光栅中传输时, 让光波长位于光栅的布拉格反射带隙内或附近, 同样, 在光栅的色散和光纤非线性引起的自相位调制共同作用下将形成光栅孤子。光栅孤子的传输速度要小于在光纤中的传

收稿日期: 2010-05-31; 收到修改稿日期: 2010-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(60677003)资助课题。

作者简介: 王葵如(1962—), 女, 副教授, 主要从事光纤通信系统用光电子器件方面的研究。E-mail: krwang@bupt.edu.cn

输速度,因此可以利用光纤光栅实现光速减慢,产生较大时延。由于光栅的结构色散远大于光纤色散,因而形成孤子所需的光栅长度一般只需几厘米即可,能够实现器件微型化。理论上,光栅孤子可以以  $0 \sim c/n$  ( $c$  为真空中的光速,  $n$  为光纤折射率) 的任意速度在光栅中传输<sup>[8,9]</sup>。

目前,对于光纤光栅慢光作用的研究不是很多。在实验方面,1996年,美国贝尔实验室的 Benjamin J. Eggleton 等<sup>[9]</sup> 首次在实验室中观察到了孤子形成以及减速的现象,其传输速度可减缓为普通光纤中传输时的 50%~75%,随后,他们又研究了不同长度光纤光栅的慢光效果;William C. K. Mak 等<sup>[10]</sup> 在理论上证明,孤子在特殊结构光纤光栅中速度可以降为光纤中的 0.2 倍,甚至实现孤子捕获。

本文在阐述光纤光栅慢光产生的物理机理的基础上,基于非线性耦合模方程组,仿真分析了孤子在光栅中传输的时延特性,搭建了高能量、窄脉冲的时延测量实验系统,并分别对本课题组在普通光敏光纤和高非线性光纤上制作的光栅进行了脉冲时延测量,得到了很好的实验结果。

## 2 理 论

### 2.1 慢光产生的物理机理

群速度  $v_g$  是描述光脉冲在光纤等介质中传输时的包络速度,是与光频率  $\omega$  相关的函数,其表达式为

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}, \quad (1)$$

由(1)式可知,当  $\frac{dn}{d\omega}$  很大且大于零时(正色散),群速度变小,此时会产生慢光现象。在光纤光栅的禁带

边缘附近,是一个色散极大的区域,会出现孤子减速现象。但由于色散很大,使得脉冲展宽严重,无法正常传输下去。只有在强光条件下产生了非线性效应,才能使脉冲压缩,被光栅减速后仍然能够以孤子形式向前传输。

定义失谐量  $\delta = (\bar{n}/c)(\omega - \omega_B)$ ,  $\bar{n}$  表示光栅的有效折射率,  $c$  是真空中的光速,  $\omega$  是入射脉冲的角频率,  $\omega_B$  是光栅的布拉格角频率。令波数  $q = k - k_B$ ,  $k$  是入射光波数,  $k_B = \pi/\Lambda$  是光栅的布拉格波数,  $\Lambda$  是光栅周期。由光纤光栅的耦合模理论可得关于  $q$  和  $\delta$  的表达式<sup>[11,12]</sup>:

$$q = -\frac{\kappa(1-f^2)}{2f} - \frac{\Gamma P_0}{2} \frac{1-f^2}{1+f^2}, \quad (2)$$

$$\delta = -\frac{\kappa(1+f^2)}{2f} - \frac{3\Gamma P_0}{2}, \quad (3)$$

式中  $P_0$  是入射光脉冲强度,  $f$  为脉冲后向分量振幅与前向分量振幅的比值,  $|f| > 1$  时,则后向波能量大于前向波能量;  $\Gamma$  为光纤的非线性系数。  $\Gamma P_0$  代表了入射光脉冲强度所对应的非线性效应的强弱;耦合系数  $\kappa = \pi\Delta n/\lambda$ ,  $\Delta n$  为光纤光栅的折射率调制深度,  $\lambda$  是输入光在自由空间中的波长。光栅中脉冲的群速度

$$V_G = \frac{c}{\bar{n}} \frac{d\delta}{dq} = \frac{c}{\bar{n}} \frac{1-f^2}{1+f^2}. \quad (4)$$

当  $|f| \rightarrow 1$  时,光脉冲的群速度会显著降低。由(3)式可得到

$$f = \frac{-(2\delta + 3\Gamma P_0) - \sqrt{(2\delta + 3\Gamma P_0)^2 - 4\kappa^2}}{2\kappa}. \quad (5)$$

图1所示为均匀布拉格光纤光栅的色散关系曲线。图1(a)对应的是非线性效应较弱时  $\Gamma P_0 = 400 \text{ m}^{-1}$  的色散曲线,图1(b)对应的是非线性效应较

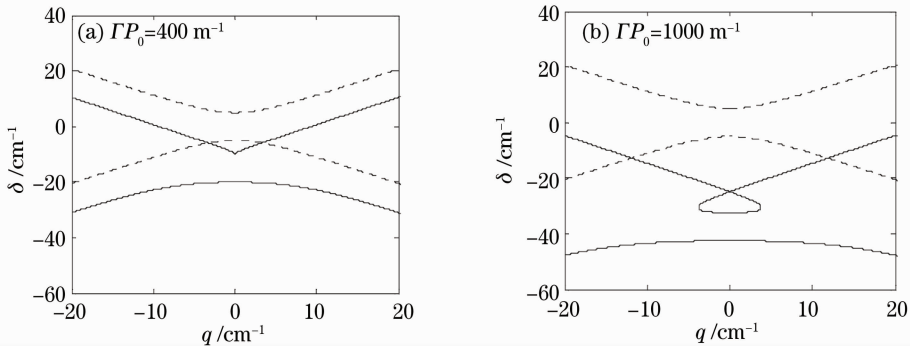


图1 布拉格光纤光栅的  $\delta$  和  $q$  色散关系

Fig. 1 Dispersion relation between  $\delta$  and  $q$  for fiber Bragg grating

强时  $\Gamma P_0 = 1000 \text{ m}^{-1}$  的色散曲线,虚线表示线性情况下即  $\Gamma=0$  时的色散关系。由(3)式可以看出,  $f < 0$  对应曲线的上支,  $f > 0$  对应曲线下支。当入射脉冲强度  $P_0$  增大或光纤的非线性系数  $\Gamma$  增大时,光脉冲的非线性效应则会增强,非线性效应使得色散曲线的上支形成一个环,使光速减慢的区域增大。因此,在非线性作用下,脉冲在光栅中传输更容易实现减速,即对光波长范围的要求降低了,使得通过实验观察到慢光效应成为可能。

## 2.2 非线性耦合模方程组

在光纤光栅的非线性研究方面一般采用非线性

耦合模理论(NLCME)。根据该理论,光栅中传输的光可分解为正向传输和反向传输两个分量,光场强度可表示为

$$E(x, t) = [E_+(x, t)\exp(ikx) + E_-(x, t)\exp(-ikx)]\exp(-i\omega t) + \text{c. c.}, \quad (6)$$

式中  $E_+$  和  $E_-$  分别代表正向和反向传输的电场分量,  $x$  是光纤光栅的纵轴方向,  $t$  为时间, c. c. 表示复共轭。当高强度脉冲入射时,光栅的非线性效应不可以忽略,且  $E_+$  和  $E_-$  为缓变包络,则光场应满足非线性耦合模方程组(NLCME)<sup>[7,8]</sup>:

$$\begin{cases} i \frac{\partial E_+}{\partial x} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial E_+}{\partial t} + \kappa E_- + \Gamma(|E_+|^2 + 2|E_-|^2)E_+ = 0 \\ -i \frac{\partial E_-}{\partial x} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial E_-}{\partial t} + \kappa E_+ + \Gamma(|E_-|^2 + 2|E_+|^2)E_- = 0 \end{cases} \quad (7)$$

令  $E_+ = \sqrt{\frac{1}{\Gamma}}U, E_- = \sqrt{\frac{1}{\Gamma}}V, T = \frac{c}{\bar{n}}t$ , 代入(7)式则可得归一化后的非线性耦合模方程组为

$$\begin{cases} i \frac{\partial U}{\partial x} + i \frac{\partial U}{\partial T} + \kappa V + (|U|^2 + 2|V|^2)U = 0 \\ -i \frac{\partial V}{\partial x} + i \frac{\partial V}{\partial T} + \kappa U + (|V|^2 + 2|U|^2)V = 0 \end{cases} \quad (8)$$

均匀光栅中  $\kappa$  为常数。

## 2.3 均匀光栅中慢孤子的数值仿真

Aceves 等在考虑自相位调制的情况下求解(8)式,得到了双参数的均匀布拉格光栅孤子解<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} U = \left[ \frac{\kappa(1+v)}{3-v^2} \right]^{1/2} (1-v^2)^{1/4} W(X) \exp[i\phi(X) - iT' \cos \theta] \\ V = - \left[ \frac{\kappa(1-v)}{3-v^2} \right]^{1/2} (1-v^2)^{1/4} W^*(X) \exp[i\phi(X) - iT' \cos \theta] \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} X = \kappa(1-v^2)^{-1/2} (z - vT) \\ T' = \kappa(1-v^2)^{-1/2} (T - vz) \\ \phi(X) = \frac{4v}{3-v^2} \arctan\{\tanh[(\sin \theta)X] \tan(\theta/2)\} \\ W(X) = (\sin \theta) \operatorname{sech}[(\sin \theta)X - i(\theta/2)] \end{cases} \quad (10)$$

式中参数  $v$  取值为  $0 < v < 1$ , 与孤子的能量和动量有关,  $v$  值越大, 孤子能量越小;  $\theta$  是孤子的固有质量参数, 决定了孤子的幅度和宽度, 与能量成正比, 取值范围为  $0 < \theta < \pi$ ,  $\theta$  较大的称为重孤子。

本文利用分步傅里叶法数值仿真了上述光栅孤子在均匀布拉格光栅中的传输情况, 如图 2 所示。所选取的参数为  $\kappa = 300 \text{ m}^{-1}, \theta = 0.5\pi, v = 0.7$ , 光栅长  $L = 20 \text{ cm}$ , 光纤光栅平均折射率  $\bar{n} = 1.447$ 。初始脉冲形式由(9)式和(10)式给出, 位置在  $-5 \text{ cm}$  处。图 2(a)是起始点和在光栅中传输了  $1 \text{ ns}$  时的

正向(实线)和反向脉冲(虚线), 图 2(b)为脉冲在光栅中传输时的位移-时间图像。

由图 2 计算后可得光脉冲在光栅中的传输速度  $v_g = 1.2 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 而一般脉冲在光纤中的群速度  $v_G = c/\bar{n} \approx 2.04 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 由此可知  $v_g < v_G$ , 即孤子在光纤光栅中传输时可实现明显的减速。

## 3 实 验

设计了利用高速示波器的高能量、窄脉冲通过光纤光栅的时延测量方案, 并搭建了实验系统, 进行

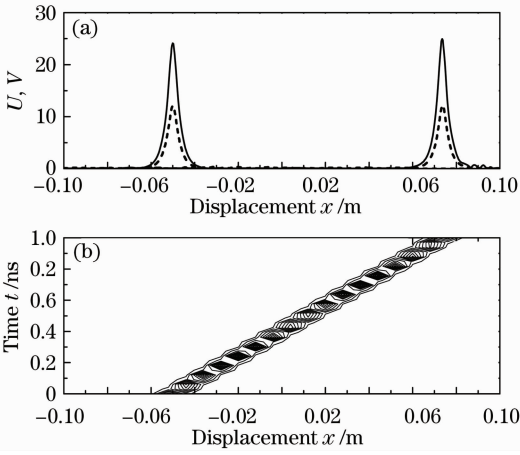


图 2 布拉格光栅孤子在均匀光纤光栅中传输的孤子形状(a)和时间-位移图(b)  
 Fig. 2 Shape (a) and time-displacement (b) of the Bragg grating (BG) solitons which transmitted through the uniform fiber grating

了脉冲时延测量。实际测量系统如图 3 所示。高能窄脉冲由锁模激光器产生,波长在1550 nm波段,

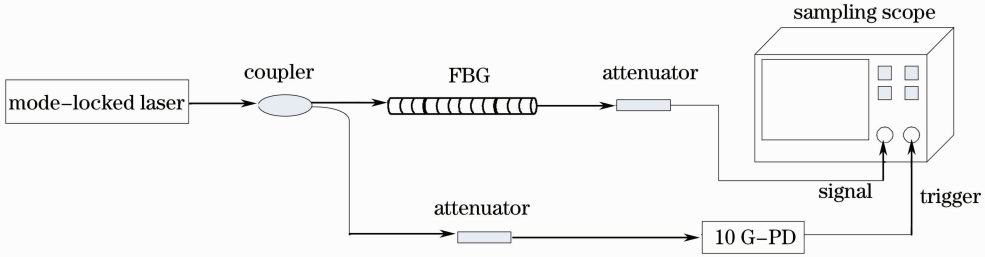


图 3 光栅孤子时延测量实验系统示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup for the time-delay measurement of the BG solitons

分别用普通单模光纤和长飞公司生产的高非线性光纤(非线性系数不小于 10 W/km)制作了两个长度为 5 cm 的光栅,布拉格波长分别为 1554.44 nm 和 1561.05 nm。利用图 3 所示的测量系统对这两个光栅进行了孤子时延测量。图 4 和图 5 分别为普通光纤光栅和高非线性光纤光栅的时延测量结果。图中线的高度代表脉冲功率的大小,较高的竖线为光路中没有接入光栅时的脉冲位置,较矮的竖线是接入光栅后的脉冲位置。由于高非线性光纤的损耗较大,因此输出脉冲的幅度较小。两个脉冲之间的时延即为  $t_1 - t_2$ ,其中包含了跳线产生的时延。又测量了光脉冲通过 3.05 m 长的国产标准单模光纤时产生的时延值为 15 ns,计算后得到标准单模光纤的单位长度时延量  $\Delta t = 49.18$  ps/cm。由于实验中所采用的普通光栅和高非线性光栅的尾纤长度不同,因而,要分别计算跳线产生的时延。

脉冲频率为 50 MHz,脉冲宽度 1.5 ps。光脉冲首先经耦合器分光,一路经衰减器衰减后输入 10 G 光电二极管,转换为电信号接入示波器作为触发信号。另外一路光进入均匀光纤光栅,通过光栅时产生一定的时延,经衰减后作为信号光输入到高速示波器中。实验中所用示波器型号为 DSA8200,光口采样速率为 40 GHz。

实验中,将激光器的输出波长调整到光栅布拉格处,首先测量出光路中未连接光纤光栅时脉冲的时间位置  $t_1$ ,然后将光栅接入光路中再次测量脉冲位置  $t_2$ ,两次的时间差即为光栅产生的时延量。由于光栅很短,两端一般都带有较长的跳线(普通单模光纤),为了得到准确的光栅作用时延量  $t_{\text{delay}}$ ,首先测量了一段标准单模光纤的时延值,计算出其单位长度的时延量  $\Delta t$  和光栅两端接入的普通单模光纤总长度  $l$ ,以此算出光纤段可能产生的时延,在测得的光栅时延中减去此值,即为脉冲经由光栅作用所产生的实际时延大小,即

$$t_{\text{delay}} = t_1 - t_2 - \Delta t \times l. \quad (11)$$

1) 对于普通光纤光栅,时延如图 4 所示,  $t_1 - t_2 = 11$  ns。实验中采用的跳线总长为 215 cm,代入(11)式可得,普通光纤光栅产生的时延量  $t_{\text{delay}} = 426$  ps,孤子在其传输中对应的速度为  $1.17 \times 10^8$  m/s,这与理论分

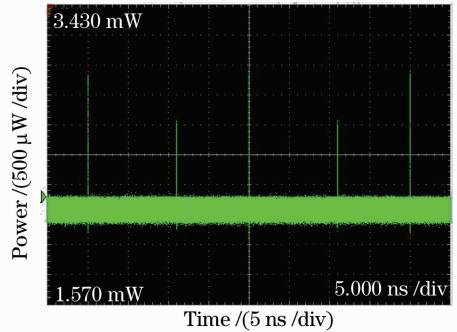


图 4 普通单模光纤光栅中孤子传输的时延  
 Fig. 4 Time delay of the BG soliton propagating in the ordinary signal-mode fiber grating

析相符合。

2) 对于高非线性光纤光栅, 时延如图 5 所示,  $t_1 - t_2 = 18.9$  ns。采用的跳线总长为 350 cm, 计算后得高非线性光纤光栅产生的时延量  $t_{\text{delay}} = 1.639$  ns, 孤子在其中传输时对应的速度为  $0.31 \times 10^8$  m/s。

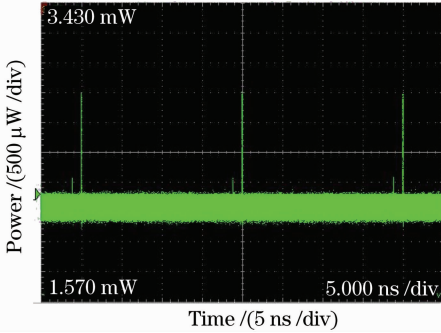


图 5 高非线性光纤光栅中孤子传输的时延

Fig. 5 Time delay of the BG soliton propagating in the high nonlinear fiber grating

## 4 结 论

本文理论上分析了利用光纤光栅实现慢光的可能性和非线性参数的影响, 基于非线性耦合模理论和分布傅里叶数值计算方法仿真了强脉冲在均匀布拉格光栅中传输时的速度特性。在普通单模光纤和高非线性光纤上实际制作了 5 cm 长的均匀光纤光栅。建立了窄脉冲时延测量系统, 实际测量了所制作的光纤光栅对皮秒脉冲产生的时延, 分别得到了 426 ps 和 1.638 ns 的时延量。实验结果表明, 锁模激光器发出的皮秒脉冲在光纤光栅中的传输速度要小于在光纤中的传输速度, 而且, 高非线性光纤光栅的时延量要大于普通光纤光栅。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Yong, Zhao Huawei, Zhang Xinyuan *et al.*. Research on some new mechanism of slow light and its applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(2): 237~245  
赵勇, 赵华玮, 张馨元等. 慢光产生的新机理及其应用[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(2): 237~245

- 2 Wang Hao, Zhang Yundong, Ye Jianbo *et al.*. Direct observation of signal evolution of slow and fast light in erbium-doped optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1938~1942  
王号, 掌蕴东, 叶建波等. 在掺铒光纤中直接观测慢光和超光速信号的演化[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1938~1942
- 3 Hu Yingtao, Li Yuntao, Li Zhiyong *et al.*. Properties and applications of silicon waveguide slower-light devices [J]. *Physics*, 2010, **39**(4): 267~272  
胡应涛, 李运涛, 李智勇等. 硅基波导慢光器件及其应用[J]. *物理*, 2010, **39**(4): 267~272
- 4 Zheng Di, Pan Wei, Yan Lianshan *et al.*. Theoretical study on slow-light delays using broadband incoherent pumping source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 81~85  
郑狄, 潘伟, 闫连山等. 基于宽带非相干抽运光源的慢光延迟理论研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 81~85
- 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 V. M. Lashkin. Perturbation theory for dark solitons: inverse scattering transform approach and radiative effects[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(6): 1~20
- 7 L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(13): 1095~1098
- 8 W. Chen, D. L. Mills. Gap solitons and the nonlinear optical response of superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(2): 160~163
- 9 Benjamin J. Eggleton, R. E. Slusher. Bragg grating solitons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(10): 1627~1630
- 10 William C. K. Mak, Boris A. Malomed, Pak L. Chu. Slowdown and splitting of gap solitons in apodized Bragg gratings [J]. *Modern Optics*, 2004, **51**(14): 2141~2158
- 11 Liao Bangquan, Zhao Qida, Feng Dejun *et al.*. Coupled-mode theory for optical fiber and its application to fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1340~1344  
廖帮全, 赵启大, 冯德军等. 光纤耦合模理论及其在光纤布拉格光栅中的应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1340~1344
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 294~295  
阿戈沃. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 294~295
- 13 A. B. Aceves, S. Wabnitz. Self-induced transparency solitons in nonlinear refractive periodic media [J]. *Phys. Lett. A*, 1989, **141**(1-2): 37~42