

# 切趾型非线性布拉格光纤光栅双稳开关及动态特性的理论研究

陈建军 木拉提·哈密提 胡彦婷

(新疆医科大学医学工程技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要** 基于耦合模方程,利用含有时间推移变量的传输矩阵方法对非线性布拉格光栅(NLBG)双稳特性进行了理论分析,结果表明:在稳态情况下,不同切趾参数对 NLBG 双稳开关的阈值影响不同,并且正负切趾具有明显的光隔离器特点。考虑连续波输入,NLBG 表现出的双稳开关特性在动态情形下极易出现一定周期性的自脉动,而且当输入光强增大到临界光强,输出可由自脉动转变为混沌状态;考虑切趾参数一定时,耦合系数的增大会导致脉动基座宽度和频率减小,当耦合系数达到一定数值后,输出状态将转变为弛豫衰减振荡。

**关键词** 光纤光学; 双稳; 自脉动; 切趾; 耦合系数

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.010606

## Theoretical Investigation on Bistable Switching and Dynamic Characteristics of Tapered Nonlinear Bragg Gratings

Chen Jianjun Murat Hamit Hu Yanting

(School of Medical Engineering Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract** Based on the coupled mode theory, by using the time-domain transfer matrix method, the bistable characteristics of nonlinear Bragg gratings (NLBG) are analyzed numerically. The results show that under steady case, various tapered factors have a different effects on the threshold switching energy and also positive and negative taper can cause the response of optical isolator in NLBG. On the other hand, with the continuous wave taken into consideration, the periodic self-pulsation may emerge extremely easy under the dynamic conditions in NLBG. As the input power increases to the critical intensity, the self-pulsation transforms into the chaos. For a certain tapered factor, the pulsation width and the frequency of the self-pulsation will reduce with the increase of coupling coefficient, but the output state will transform into relaxation damped oscillation when the coupling coefficient reaches a certain value.

**Key words** fiber optics; bistability; self-pulsation; taper; coupling coefficient

**OCIS codes** 060.3735; 190.1450; 190.3100

## 1 引言

光纤光栅是一种新型光学器件,它是基于光纤材料的光敏特性,在纤芯内形成的空间相位光栅。其中,非线性布拉格光栅(NLBG)在全光开关、孤子通信、光学限制器领域的应用引起了人们的广泛关注<sup>[1~16]</sup>。NLBG在光子“禁带”(PBG)附近具有独特的光学特性<sup>[12]</sup>,在PBG之内,内部光强、非线性折射率变化、布拉格谐振频率间存在的正反馈机制使其表现出双稳效应<sup>[12~14]</sup>,从而使其在光开关、光学信号传输、光存储等方面应用广泛。同时,人们通过在NLBG中引入切趾、相移、啁啾等非均匀性,来使其开关性能得到改进。对于此类非均匀NLBG,以往的研究大多是在稳态(即随时间推移不发生变化)假设的基础上<sup>[9~15]</sup>。应该注意

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(30960097)、新疆科学技术厅新疆少数民族科技骨干人才特殊培养科研专项基金(200723104)和新疆医科大学“科研创新基金”资助课题。

作者简介: 陈建军(1977—),男,硕士,讲师,主要从事激光技术与光纤传感等方面的研究。

E-mail: cjj\_light@yahoo.com.cn

到对由克尔效应所致的非线性导波双稳器件而言,调制不稳定性(ML)容易导致双稳环上支出现自脉动及混沌等不稳定行为<sup>[16]</sup>,因此有必要研究其动态特性。本文基于耦合模理论,利用含有时间推移变量的传输矩阵方法对 NLBG 双稳与动态特性进行了理论分析。

## 2 理论模型

考虑到光纤光栅的结构,其折射率沿轴向分布表示为<sup>[14]</sup>

$$n(z) = n_0 + n_1(z) \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \Omega(z) \right] + n_2 |E(z)|^2, \quad (1)$$

式中  $E(z)$  为光栅内部电场振幅,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\Omega(z)$  为光栅中的空间相移,  $n_0, n_1(z)$  以及  $n_2$  分别为光栅的有效模式折射率、线性折射率周期变化振幅以及非线性折射率系数。

考虑光栅中包括前向和后向传播的光,所以光场  $E(z)$  可表示为

$$E(z) = E_+(z) \exp\{i[\beta_B(z)z - \omega t]\} + E_-(z) \exp\{-i[\beta_B(z)z + \omega t]\}, \quad (2)$$

式中  $\omega$  为光载波的中心角频率,  $t$  为时间,  $E_+$  和  $E_-$  分别是光栅中前向和后向波的慢变振幅包络函数。计算中考虑入射波为连续波或准连续波,或者脉冲宽度比其在光栅中的传输时间大的多的情况。从麦克斯韦波动方程出发,并结合(1),(2)式,忽略光纤光栅的损耗及材料色散(由于计算中所选光纤光栅的长度为厘米量级,因此其损耗及色散可以忽略),并假设材料非线性响应速度特别快,以及载波波长接近光栅的布拉格波长,就可得到非线性耦合模方程<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_+}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_+}{\partial t} &= i[\gamma(|E_+|^2 + 2|E_-|^2)E_+ + \delta\beta E_+ + \kappa E_-], \\ -\frac{\partial E_-}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_-}{\partial t} &= i[\gamma(|E_-|^2 + 2|E_+|^2)E_- + \delta\beta E_- + \kappa E_+], \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $v_g$  为光栅内的群速度,  $\kappa(z) = \pi n_1(z)/\lambda_B$  为线性耦合系数,  $\gamma = \pi n_2/\lambda_B$  为非线性参数,  $\delta\beta(z) = \beta - \beta_B(z) = n_0\omega/c - \beta_B(z)$  为频率失谐量,其中  $\beta_B(z)$  为布拉格波数,  $c$  与  $\lambda_B = 2n_0\Lambda$  分别为真空中光速和布拉格波长。

对于线性切趾光纤光栅,  $\kappa(z) = \kappa_0 \left(1 + \Delta\kappa \frac{z}{L}\right)$ <sup>[14]</sup>, 这里  $\Delta\kappa = \frac{\kappa(L) - \kappa(0)}{\kappa(0)}$ , 其中  $L$  是光栅的整个长度,  $\kappa_0$  是光栅前端面的耦合系数,而  $\Delta\kappa$  代表了耦合系数的相对变化程度。

考虑光纤光栅边界条件,此时慢变振幅满足条件

$$E_+(0, t) = E_i(0, t), \quad E_r(0, t) = E_-(0, t), \quad (z = 0) \quad (4)$$

$$E_-(L, t) = 0, \quad E_t(L, t) = E_+(L, t), \quad (z = L) \quad (5)$$

式中  $E_i, E_r$  和  $E_t$  分别为入射波、反射波及透射波的慢变振幅。

在(3)式中,令对时间的偏导为0,可使用四阶龙格-库塔法求解该方程,可得到稳态时慢变振幅沿轴向的变化特性。由于在实际利用当中,噪声扰动不可避免,内部扰动也有可能得到放大,所以有必要对光纤光栅输出强度随时间变化的特性进行分析。为了能够模拟光栅的动态输出输出特性,这里采用了修正的时域传输矩阵方法<sup>[18]</sup>:将非均匀的光纤光栅从输出端开始分成  $M$  个子段,假定每一子段是均匀的,用  $E_{+,i}(E_{-,i})$  及  $E_{+,(i+1)}(E_{-,(i+1)})$  表示第  $i$  段( $i = 1, 2, \dots, K$ ) 前后的光场振幅,则

$$\begin{bmatrix} E_{+,(i+1)}(t + \Delta t) \\ E_{-,(i+1)}(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_P \mathbf{T}_C \begin{bmatrix} E_{+,i}(t) \\ E_{-,i}(t) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

这里时间步长和空间步长存在一定的关系  $\Delta t = \Delta z/v'_g$ , 矩阵  $\mathbf{T}_C$  和  $\mathbf{T}_P$  分别代表方程的耦合项和失谐项,其中

$$\begin{cases} \mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} \text{sech}(\kappa\Delta z) & i \tanh(\kappa\Delta z) \\ i \tanh(\kappa\Delta z) & \text{sech}(\kappa\Delta z) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_P = \begin{bmatrix} \exp\{i\Delta z\{\delta + \Gamma[|E_{+,j}(t)|^2 + 2|E_{-,j}(t)|^2]\} & 0 \\ 0 & \exp\{i\Delta z\{\delta + \Gamma[|E_{-,(j+1)}(t)|^2 + 2|E_{+,(j+1)}(t)|^2]\} \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (7)$$

从初始条件出发,使用(6),(7)式,光场的纵向分布即可求出,然后通过循环计算,整个输出状态就可以得到。这里需要强调的是,增加分段的数量  $M$  可以提高数值计算的准确性和有效性。

### 3 数值分析

计算所用的数据如下： $n_2 = 2.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $L = 1 \text{ cm}$ , 在分析中光纤光栅非线性折射率系数约为  $\text{SiO}_2$  中的  $10^4$  倍<sup>[19]</sup>, 为便于叙述, 在以下的讨论中将初始失谐量  $\delta\beta$ , 输入光强  $I_i$  及输出光强  $I_o$  分别进行了归一化处理。

#### 3.1 线性切趾参数对非线性光纤光栅双稳特性的影响

图 1 给出了线性切趾光纤光栅的稳态输入-输出曲线, 这里  $\delta L = 3$ ,  $\kappa = 4 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta k$  取值分别为 10%, 20%, 30%, -10%, -20%, -30%。 $I_C$  是临界能量并被定义为  $I_C = 4\lambda_0 A_{\text{eff}}/3\pi n_2 L$ ,  $A_{\text{eff}} = 0.4 \text{ }\mu\text{m}^2$  是波导的有效面积<sup>[19]</sup>。由图 1 可以看出, 在切趾参数大小相同的情况下, 负切趾光栅的开关阈值远大于正切趾光栅的开关阈值, 这是因为在不同的切趾参数导致光栅内部能量分布不同, 非线性效应影响也就有所差异, 导致双稳阈值的不同。双稳环宽度是评价系统稳定性的指标, 在相同的失谐量下, 负切趾光栅的双稳环宽度要明显大于正切趾情形, 因此, 负切趾光栅有比较大的稳定区范围和较好的系统稳定性。并且可以看到, 正是因为负切趾相比于

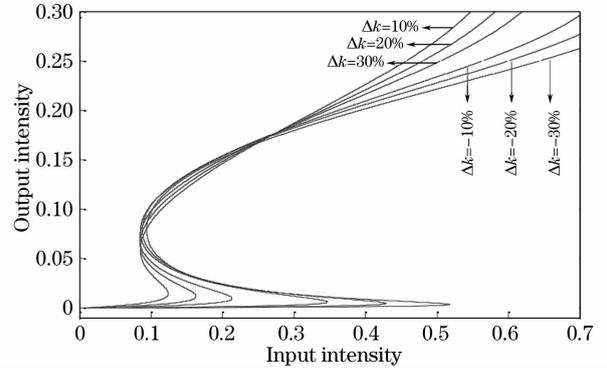


图 1 不同切趾参数情况下光纤光栅的稳态输入-输出曲线  
Fig. 1 Stable input-output characteristics of fiber grating for various tapered factor

正切趾有较大的双稳开关阈值, 因此不同的入射光强内, 可以使用切趾方式来构成具有光隔离器特点的方向开关, 即当光由负切趾方向射入时, 光被阻隔, 而当光由正切趾方向射入时, 光波通过并到达上支态。

#### 3.2 切趾参数对非线性光纤光栅动态自脉动特性的影响

3.1 节稳定性分析给出了线性切趾型光纤光栅的相关稳态特性, 这里  $|\Delta k| = 30\%$ ,  $\delta L = 3$ ,  $\kappa = 4 \text{ cm}^{-1}$ 。考虑在实际光波传输过程中, 光栅内部能量随时间变量在发生变化, 即使是准连续波输入 (CW), 调制不稳定性与反馈的共同作用也能破坏解的稳定性<sup>[20]</sup>, 图 2 分别给出了在相同入射光强度 (约 0.7) 和失谐情况下正负切趾非线性光栅的输入输出波形, 可以看出, 光栅内介质的非线性响应导致光波的自脉动输出, 且相对于入射光波有一定的延迟, 对比于正切趾光栅, 负切趾使光波输出有更大的延迟, 并且输出的脉动宽度更窄, 脉动序列基座更小, 但输出峰值强度变大, 这种不稳定性对双稳器件的开关特性不利, 但对超短脉冲输出和时钟恢复等方面有一定的应用前景<sup>[20]</sup>。对于更大参数的负切趾光栅, 其光波输出延迟将会进一步增大, 同时脉动宽度也会减小。

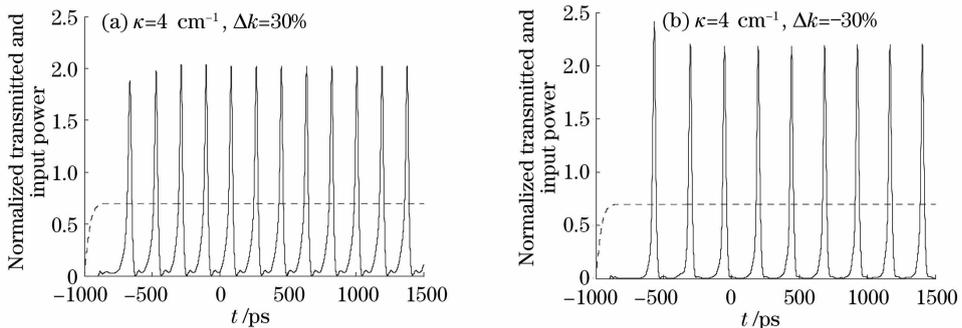


图 2 正负切趾情况下光纤光栅随时间变化的输入-输出序列

Fig. 2 Dynamic input-output characteristics of fiber grating with time for various tapered factor

图 3(a) 给出了正切趾情况下, 光纤光栅输入输出变化曲线。当入射光强度随时间的变化而增大时, 自脉动频率也在进一步增加, 且呈现一定的倍周期变化 (入射光强约 1.3), 并且自脉动宽度也变得越来越小。图 3(b) 给出了当入射强度超过一临界光强时 (入射光强约 3.0), 透射强度不再是自脉动输出序列, 而是呈现出随时间变化的混沌输出状态。这主要是因为光栅折射率非线性效应作用下会随光强大小发生改变, 在反馈作用下, 使光栅内禁带发生移动, 导致入射光波长往复处在禁带内和禁带外, 从而形成一系列的自脉动

序列输出。当入射能量超过一定范围时,光栅介质内光传输时的调制不稳定性与反馈的共同作用能够引发倍周期,从而发展成为混沌。

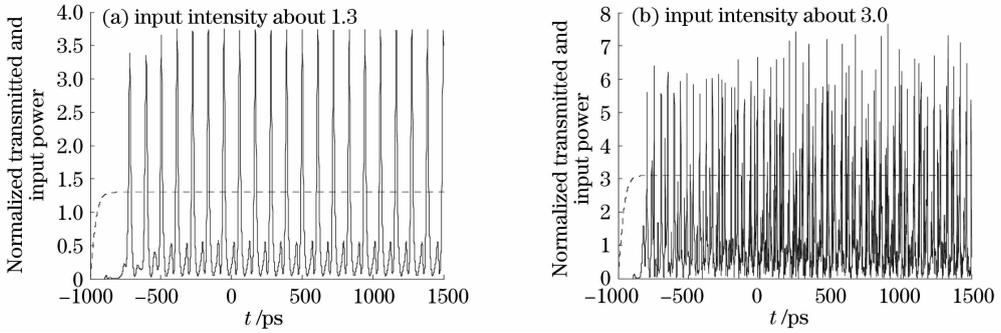


图3 入射强度取不同值时,正切趾情况下光纤光栅随时间变化的输入-输出序列,  $k=4\text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta k=30\%$ ,  $\delta L=3$   
Fig. 3 Dynamic input-output characteristics of positive tapered fiber grating with time for various input intensity,  $k=4\text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta k=30\%$ ,  $\delta L=3$

### 3.3 耦合系数对切趾型非线性光纤光栅动态自脉动特性的影响

考虑负切趾光纤光栅有更好的稳定性,图4给出了耦合系数  $\kappa$  取 3, 5, 6  $\text{cm}^{-1}$  不同值时,负切趾光纤光栅的输入输出变化曲线(入射光强约 0.7)。从图中可以看出,随着耦合系数的增大,导致输出光强相对于入射光强有更大的延迟,但自脉动基座宽度和频率都在减小。同时在入射光强不变的情况下,输出光强随耦合系数的增大而增强,但当耦合系数达到一定的数值时,输出光强已经不再是自脉动输出,而是在经历短暂的振荡之后强度就逐渐趋于零。

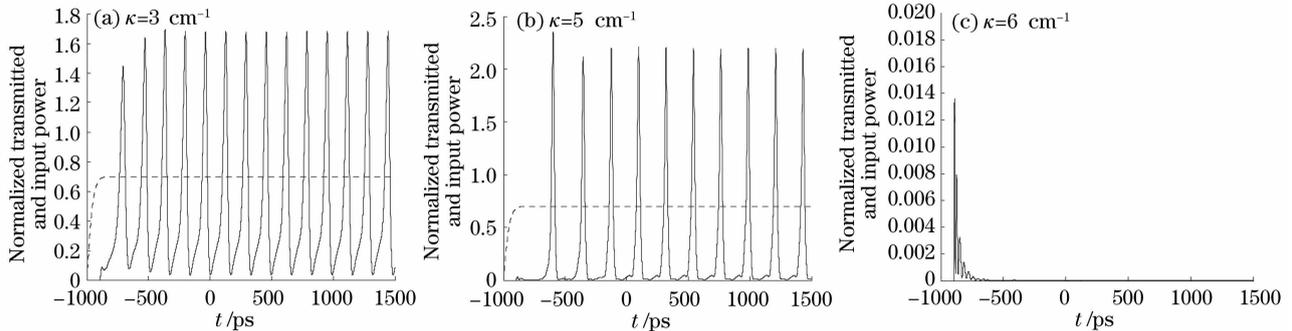


图4 耦合系数  $\kappa$  取不同值,  $\Delta k=-30\%$ ,  $\delta L=3$  时,负切趾情况下光纤光栅随时间变化的输入-输出序列  
Fig. 4 Dynamic input-output characteristics of negative tapered fiber grating with time for various coupling coefficient,  $\Delta k=-30\%$ ,  $\delta L=3$

## 4 结 论

从非线性耦合模理论出发,利用含有时间推移变量的传输矩阵方法对非线性布拉格光栅双稳开关及动态特性进行了理论分析,结果表明,NLBG在连续波输入的稳态情况下表现出的双稳开关特性,在相同的失谐量下,负切趾光栅的双稳环宽度要明显大于正切趾情形,可以使用切趾方式来构成具有方向选择性的光隔离器。在动态情形下,光栅内光传输极易出现一定周期性的自脉动,引入切趾后,切趾参数可以影响其自脉动的输出状态。当输入光强逐渐增大时,输出可以从自脉动转变为混沌状态;同时,光栅的输出状态对耦合系数也有相应的依赖性。需要指出的是:本文的研究结果是针对切趾光纤光栅的情况。可以预计对任意具有周期性折射率调制的非线性光纤光栅,以上参数对其影响都表现出与此大体相同的规律。

## 参 考 文 献

- 1 B. A. Malomed, T. Mayteevarunyoo, E. A. Ostrovskaya *et al.*. Coupled-mode theory for spatial gap solitons in optically induced lattices[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(5): 056616

- 2 H. Alatas, A. A. Iskandar, M. O. Tjia *et al.*. Rational solitons in deep nonlinear optical Bragg grating [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(6): 066606
- 3 Y. C. Huang, Y. Y. Lin. Coupled-wave theory of distributed-feedback optical parametric amplifiers and oscillators [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(4): 777~790
- 4 H. Lee, G. P. Agrawal. Nonlinear switching of optical pulses in fiber Bragg gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(3): 508~515
- 5 D. N. Maywar, G. P. Agrawal. All-optical hysteresis control by means of cross-phase modulation in semiconductor optical amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(7): 1003~1013
- 6 X. H. Jia, Z. M. Wu, G. Q. Xia. Analysis of bistable steady characteristics and dynamic stability of linearly tapered nonlinear Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 2945~2953
- 7 Qi Yuefeng, Bi Weihong, Liu Yanyan *et al.*. Research on transmission spectrum characteristics of the photonic crystal Bragg fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1178~1183  
齐跃峰,毕卫红,刘燕燕等. 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1178~1183
- 8 Li Songbai, Deng Tao, Wu Jiagui. Output characteristics of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041402  
李松柏,邓涛,吴加贵. 光纤光栅外腔半导体激光器的输出特性[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4):041402
- 9 Chen Jianjun, Xia Guangqiong, Tian Jianfeng *et al.*. An approach to improve switch performance of  $\lambda/4$  phase-shifted grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1250~1254  
陈建军,夏光琼,田剑峰等. 一种提高 $\lambda/4$ 相移光纤光栅开关性能的方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1250~1254
- 10 Tian Jianfeng, Wu Zhenmao, Xia Guangqiong. Theoretical investigation on the bistability of nonlinear Bragg gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2256~2260  
田剑峰,吴正茂,夏光琼. 非线性布拉格光栅双稳特性的理论研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(4):2256~2260
- 11 H. G. Winful, J. H. Marburger, E. Garmire. Theory of bistability in nonlinear distributed feedback structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**(5): 379~381
- 12 N. G. R. Broderick, D. Taverner, D. J. Richardson. Nonlinear switching in fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(11): 447~453
- 13 L. Brzozowski, E. H. Sargent. Optical signal processing using nonlinear distributed feedback structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(5): 550~555
- 14 S. Radic, N. George, G. P. Agrawal. Analysis of nonuniform nonlinear distributed feedback structures: Generalized transfer matrix method [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(7): 1326~1336
- 15 Y. A. Logvin, V. M. Volkov. Phase sensitivity of a nonlinear Bragg grating response under bidirectional illumination [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(5): 774~780
- 16 F. Marquis, P. Dobiasch, P. Meystre *et al.*. Slaved bistability and self-pulsing in a nonlinear interferometer [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(1): 50~59
- 17 B. J. Eggleton, G. Lenz, N. M. Litchinitser. Optical pulse compression schemes that use nonlinear pulse compression in Bragg gratings [J]. *Fiber and Integrated Opt.*, 2000, **19**(4): 383~421
- 18 B. S. Kim, Y. Chung, J. S. Lee. An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(7): 787~794
- 19 A. Maitra, C. G. Poulton, J. Wang *et al.*. Low switching threshold using nonlinearities in stop band-tapered waveguide Bragg gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(10): 1303~1308
- 20 X. H. Wang, G. F. Li, J. Hong *et al.*. Spatiotemporal dynamics and high-frequency self-pulsations in two-section distributed feedback lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(11): 2030~2039