

文章编号: 0258-7025(2003)07-0624-05

# 光纤非线性效应中孤子传输稳定性的分析

李齐良<sup>1,2</sup>, 陈向东<sup>1,3</sup>, 唐向宏<sup>2</sup>, 袁晓<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 林理彬<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064

(<sup>2</sup> 杭州电子工业学院通信分院, 浙江 杭州 310037; <sup>3</sup> 电子科技大学15系, 四川 成都 610054)

**摘要** 要抑制 Gordon-Haus 效应引起的光孤子脉冲到达时间的抖动, 在光通信系统中插入窄带滤波器, 以补偿窄带滤波器的损耗, 其额外的线性增益会放大与孤子链同时存在的线性波, 导致背景的不稳定。如果光的强度足够强, 光纤中会产生非线性增益, 利用这种效应, 不需要补偿窄带滤波器的损耗, 而使孤子实现稳定传输。从理论上研究了光纤具有非线性增益情形下, 孤子稳定传输的条件。

**关键词** 光纤通信技术; 非线性增益; 光孤子; 群速度色散

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Stable Propagation of Optical Soliton in the Fiber Communication System with Nonlinear Effect

LI Qi-liang<sup>1,2</sup>, CHEN Xiang-dong<sup>1,3</sup>, TANG Xiang-hong<sup>2</sup>

YUAN Xiao<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, LIN Li-bin<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Institute of Physical Science and Technology of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

<sup>2</sup> Communication Engineering College of Hangzhou Institute of Electronic Engineering, Hangzhou, Zhejiang 310037, China

<sup>3</sup> 15th Department of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** To suppress Gordon-Haus effect, the narrow filter is inserted into optical communication system, as a result of compensating for the filter loss, the excess linear gain amplifies linear waves coexistent with soliton trains, leading to instability of the background. If light intensity is strong enough, in fiber the nonlinear gain will be engendered, by use of the effect, it is not necessary to compensate for the filter loss. This paper have studied the optical soliton stable propagation in the fiber communication system with nonlinear gain circumstance in the case of introducing the soliton potential function in the theory aspect.

**Key words** fiber communication technique; nonlinear gain; optical soliton; group-velocity dispersion

## 1 引言

光纤中的非线性与群速度色散(GVD)平衡时,就会产生孤子,光纤没有损耗时,孤子传输任意距离,其形状和能量将保持不变,在未来的超远距离的越洋通信中,孤子通信是最有前景的方案之一。但事实上,由于光纤中总是存在损耗,光纤的非线性效应不足以抵消群速度色散的影响,要实现光孤子超远距离传输,必须对光孤子的能量进行放大。但在放大的同时,自发辐射噪声(ASE)将会随之而产生,引起

孤子脉冲到达时间的抖动,即 Gordon-Haus 效应。要抑制 Gordon-Haus 效应<sup>[1]</sup>,使光孤子稳定传输,目前大致有色散管理孤子传输方案,即周期性地采用色散系数符号相反的光纤——一个周期内在一段反常群速度色散(色散系数  $D > 0$ ) 单模光纤后面,紧接着是一段正常群速度色散( $D < 0$ ) 的色散补偿单模光纤<sup>[2,3]</sup>;二是在光孤子传输系统中,插入窄带滤波器<sup>[4,5]</sup>,这样,孤子的幅度变得稳定,孤子的相互作用得到减弱,有文献指出,拉曼自频移也得到抑

收稿日期: 2002-03-27; 收到修改稿日期: 2002-05-30

作者简介: 李齐良(1965. 2—), 湖南衡阳人, 在职博士后, 主要从事光纤通信中光传输理论和技术的研究。E-mail: Liqiliang2@yahoo.com.cn

制<sup>[6]</sup>。由于滤波器也存在损耗,因此,为抵消滤波器的损耗,必须给系统提供额外的线性增益,但是这种线性增益,同样会放大与孤子链同时存在的线性波,导致背景的不稳定。

如果光纤非线性极化系数有下列的复数形式

$$\chi^{(n)} = \alpha_i + j\alpha_2$$

那么式中的  $\alpha_2$  就变成了非线性增益( $\alpha_2 > 0$ ),或者损耗吸收( $\alpha_2 < 0$ ), $n$  是极化率阶数。

本文研究了在光纤通信系统中不补偿窄带滤波器的损耗,利用足够强的光线产生的非线性增益,从理论上研究实现光孤子的稳定传输的条件。

## 2 理论模型

当系统中存在窄带滤波器和放大器,类孤子光脉冲传输方程遵循改进的非线性薛定谔方程(NLSE)<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{i\partial q}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + |q|^2 q = \\ i\delta q - i\beta \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} - is \frac{\partial}{\partial \tau} (|q|^2 q) + i\mu \frac{\partial^3 q}{\partial \tau^3} + \\ i\epsilon |q|^2 q + i\nu |q|^4 q + i\sigma |q|^6 q \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $q$  为归一化的慢变包络场,其他归一化量为: $\xi$

$= z/z_0, z_0 = t_0^2/|k''|$  是特征色散长度, $\tau = (t - x/\nu)/t_0, t_0$  为孤子脉冲宽度, $\delta$  为滤波器损耗和补偿给滤波器的损耗的线性增益, $\beta(\beta < 0)$  为在孤子载频处放大器增益对频率的二阶导数, $s = 2/\omega_0 t_0$  为自变陡(self-steepening)系数, $\mu$  为三阶色散因子, $\epsilon, \nu, \sigma$  分别为三阶、五阶和七阶非线性增益(或吸收损耗),方程(1)称为 Ginzburg-Landau 方程(CGLE)。

## 3 计算

方程(1)在无自变陡、无色散、无噪声、无放大增益时的 anstaz 解为<sup>[7]</sup>

$$q = A \operatorname{sech}[A(\tau + k\xi)] \times \exp\left[ik\tau + \frac{i}{2}(A^2 - k^2)\xi + i\theta\right] \quad (2)$$

式中  $A$  为孤子幅度, $k$  为孤子的频率,同时式中的各个参量由于归一化变成了无量纲的量。

由孤子能量和动量守恒,即对方程(1)进行这样的计算, $(1) \times q^* + (1)^* \times q$  与  $(1) \times \frac{\partial q^*}{\partial \tau} - (1)^* \times \frac{\partial q}{\partial \tau}$ , 并且假定  $\frac{\partial q}{\partial \tau}$  和  $q$  在  $t \rightarrow \pm\infty$  时为零,在不计噪声的时候,绝热近似情况下,得到

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\xi} \int_{-\infty}^{\infty} |q|^2 d\tau = 2\delta \int_{-\infty}^{\infty} |q|^2 d\tau + 2\beta \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial q}{\partial \tau} \right|^2 d\tau + s \int_{-\infty}^{\infty} \left[ (|q|^2 q) \frac{\partial q^*}{\partial \tau} + c. c. \right] d\tau + \\ \mu \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial^3 q}{\partial \tau^3} \frac{\partial q^*}{\partial \tau} + \frac{\partial^3 q^*}{\partial \tau^3} \frac{\partial q}{\partial \tau} \right) d\tau + 2\epsilon \int_{-\infty}^{\infty} |q|^4 d\tau + 2\nu \int_{-\infty}^{\infty} |q|^6 d\tau + 2\sigma \int_{-\infty}^{\infty} |q|^8 d\tau \quad (3) \\ \frac{d}{d\xi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( q^* \frac{\partial q}{\partial \tau} - q \frac{\partial q^*}{\partial \tau} \right) d\tau = 2\delta \int_{-\infty}^{\infty} \left( q^* \frac{\partial q}{\partial \tau} - q \frac{\partial q^*}{\partial \tau} \right) d\tau - 2\beta \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial^2 q^*}{\partial \tau^2} \frac{\partial q}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} \frac{\partial q^*}{\partial \tau} \right) d\tau - \\ 2s \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} (|q|^2 q)^* \frac{\partial q}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \tau} (|q|^2 q) \frac{\partial q^*}{\partial \tau} \right] d\tau + 2\mu \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial^3 q}{\partial \tau^3} \frac{\partial q^*}{\partial \tau} - \frac{\partial^3 q^*}{\partial \tau^3} \frac{\partial q}{\partial \tau} \right) d\tau + \\ 2\epsilon \int_{-\infty}^{\infty} \left( |q|^2 q \frac{\partial q^*}{\partial \tau} - |q|^2 q^* \frac{\partial q}{\partial \tau} \right) d\tau + 2\nu \int_{-\infty}^{\infty} \left( |q|^4 q \frac{\partial q^*}{\partial \tau} - |q|^4 q^* \frac{\partial q}{\partial \tau} \right) d\tau + \\ 2\sigma \int_{-\infty}^{\infty} \left( |q|^6 q \frac{\partial q^*}{\partial \tau} - |q|^6 q^* \frac{\partial q}{\partial \tau} \right) d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

于是有

$$\frac{dA}{d\xi} = 2\delta A + 2\beta \left( \frac{1}{3} A^3 + k^2 A \right) + \frac{4}{4} \epsilon A^3 + \frac{16}{15} \nu A^5 + \frac{96}{105} \sigma A^7 \quad (5a)$$

$$\frac{dk}{d\xi} = \frac{4}{3} \beta k A^2 \quad (5b)$$

从上述的计算可以看出,高阶色散项、自变陡项对孤子幅度和频率变化没有贡献。令  $A = y, k = \sqrt{2/3}x, \xi = 3Z/2|\beta|$ , 方程(5a)和(5b)化为

$$\frac{dy}{dZ} = -3 \frac{\delta}{\beta} y - y^3 - 2x^2 y - 2 \frac{\epsilon}{\beta} y^3 - \frac{8}{5} \frac{\nu}{\beta} y^5 - \frac{48}{35} \frac{\sigma}{\beta} y^7 \quad (6a)$$

$$\frac{dx}{dZ} = -2xy^2 \quad (6b)$$

将  $\frac{3}{2|\beta|} \frac{d\eta}{d\xi}$ ,  $\frac{3}{2|\beta|} \frac{dk}{d\xi}$  当作一负的广义保守力,

( $\sqrt{3/2k}, \eta$ ), 即  $(x, y)$  看成广义坐标, 类似文献[7]的方法, 引入孤子的广义势函数  $\phi(x, y)$ , 使得  $\frac{dy}{dZ} =$

$\frac{d\phi}{dy}, \frac{dx}{dZ} = \frac{d\phi}{dx}$ , 这样就有

$$\phi = -\frac{3}{2} \frac{\delta}{\beta} y^2 - \frac{1}{4} y^4 - x^2 y^2 - \frac{1}{2} \frac{\epsilon}{\beta} y^4 - \frac{4}{15} \frac{\nu}{\beta} y^6 - \frac{6}{35} \frac{\sigma}{\beta} y^8 \quad (7)$$

这个函数具有势函数的功能, 广义保守力  $F_x = -\frac{\partial\phi}{\partial x}$ ,  $F_y = -\frac{\partial\phi}{\partial y}$ , 要实现光孤子的稳定传输, 必须  $\frac{\partial F_x}{\partial x} > 0$ ,  $\frac{\partial F_y}{\partial y} > 0$ , 即  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} < 0$ . 下面分几种情况进行讨论.

### 3.1 非线性增益或非线性损耗吸收系数 $\epsilon = \nu = \sigma = 0$ 时

光孤子的势函数  $\phi = -\frac{3}{2} \frac{\delta}{\beta} y^2 - \frac{1}{4} y^4 - x^2 y^2$ ,

在孤子的频率趋近于 0 时的平衡点  $(0, y)$  附近, 由  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} = 0$ , 得到  $y = \sqrt{\frac{\delta}{|\beta|}}$ , 因此  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} = \frac{2\delta}{\beta}$ , 由于  $\beta < 0$ , 要使  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} < 0$ , 必须  $\delta > 0$ , 即实现光孤子的稳定传输, 必须补偿滤波器损耗, 给系统提供额外的线性增益  $\delta$ , 但是这种线性增益, 同样会放大与孤子链同时存在的线性波, 导致背景的不稳定.

### 3.2 非线性系数 $\nu = \sigma = 0$ 时

广义势函数  $\phi = -\frac{3}{2} \frac{\delta}{\beta} y^2 - \frac{1}{4} y^4 - x^2 y^2 - \frac{1}{2}$

$\frac{\epsilon}{\beta} y^4$ , 在孤子空间频率趋近于零时, 在平衡点  $(0, y)$  ( $y$  待求), 由  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} = 0$ , 得到  $y^2 = -\frac{\delta}{\beta + 2\epsilon}$ , 这样  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} = \frac{\delta}{\beta + 2\epsilon}$ , 从此式可以看出只要

$$\epsilon > -\beta/2 \quad (8)$$

在  $\delta < 0$  时, 仍然可以使  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} < 0$ , 即不需要再补偿系统中窄带滤波器的损耗, 只要三阶非线性增益满足 (8) 式的条件, 就可以实现孤子传输的稳定.

### 3.3 非线性系数 $\epsilon \neq 0, \nu \neq 0, \sigma = 0$ 时

广义势函数  $\phi = -\frac{3}{2} \frac{\delta}{\beta} y^2 - \frac{1}{4} y^4 - x^2 y^2 - \frac{1}{2}$

$\frac{\epsilon}{\beta} y^4 - \frac{4}{15} \frac{\nu}{\beta} y^6$ , 在平衡点  $(0, y)$ , 由  $\frac{d\phi}{dy} = 0$ , 得到

$$y^2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

其中,  $a = 8\nu, b = 3\beta + 6\epsilon, c = 3\delta$ , 在  $\delta < 0, \nu < 0$ , 当

$$\epsilon > \frac{-\beta + 4\sqrt{2\delta\nu/3}}{2} \quad (9)$$

时,  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} < 0$ , 即五阶非线性系数为负, 当不对滤波器的损耗进行补偿时, 只要三阶非线性系数满足 (9) 式的条件, 即能实现光孤子的稳定传输.

在平衡点,  $\delta$  的取值范围  $\frac{3(\beta + 2\epsilon)^2}{32\nu} < \delta < 0$ , 那

么最小  $y$  即相应孤子的最小幅度  $A$  为

$$A_{\min} = \sqrt{-\frac{\beta + 2\epsilon}{12\nu}} \quad (10)$$

孤子最大的幅度  $A$  为

$$A_{\max} = \sqrt{-\frac{3(\beta + 2\epsilon)}{8\nu}} \quad (11)$$

### 3.4 非线性系数 $\epsilon \neq 0, \nu \neq 0, \sigma \neq 0$ 时

广义势函数  $\phi = -\frac{3}{2} \frac{\delta}{\beta} y^2 - \frac{1}{4} y^4 - x^2 y^2 - \frac{1}{2}$

$\frac{\epsilon}{\beta} y^4 - \frac{4}{15} \frac{\nu}{\beta} y^6 - \frac{6}{35} \frac{\sigma}{\beta} y^8$ , 对此方程, 要求  $\epsilon$  精确的解析条件, 只有借助于数值模拟, 这里假定  $\nu < 0, \sigma < 0$ , 窄带滤波器的损耗很小, 即  $\delta \approx 0$  的情况下, 在平衡点  $(0, y)$  处, 通过计算得到, 当

$$\epsilon > -\frac{\beta}{2} + \frac{5}{18} \frac{\nu^2}{\sigma} \quad (12)$$

时,  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} < 0$ , 即可实现孤子传输幅度的稳定.

如果  $\epsilon < -\beta/2$ , 那么  $\sigma$  的取值范围为

$$\frac{5}{9} \frac{\nu^2}{\beta + 2\epsilon} < \sigma < 0$$

## 4 分析和结论

通过引入孤子的广义势函数, 计算了非线性增益或高阶非线性吸收损耗为 0 和不为零的情况下, 光纤中孤子稳定传输的条件, 得出:

1) 光线的强度不够强时, 光纤非线性增益和高阶非线性吸收损耗为 0, 必须要对窄带滤波器损耗进行补偿, 当其额外线性增益  $\delta > 0$  时, 光孤子的幅度可变得稳定, 这与其他方法得出的结论是一致的<sup>[8]</sup>.

图 1 为  $\delta = 0.2, \beta = -0.4$  时孤子的等势图, 图中, 越靠近中心, 孤子的“势能”越高, 可以看出在平衡点  $(0, \sqrt{\frac{\delta}{|\beta|}})$  附近,  $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} < 0$ , 即孤子传输的

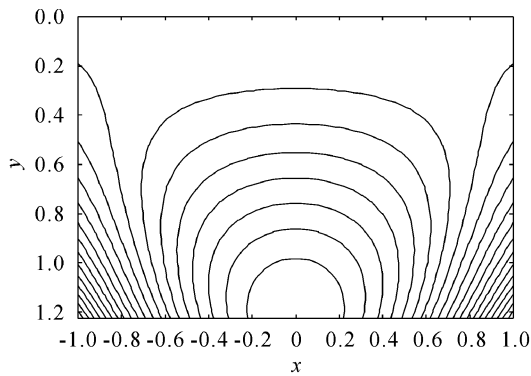


图 1  $\delta = 0.2, \beta = -0.4$  时孤子的势函数“等势图”  
Fig. 1 Figure of soliton potential function with  $\delta = 0.2, \beta = -0.4$

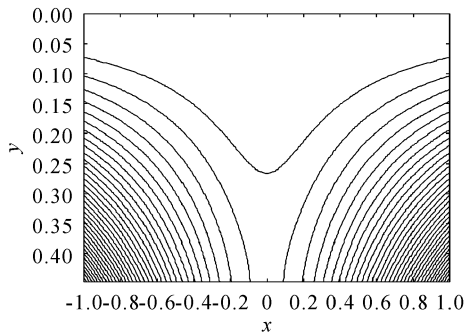


图 2  $\delta = -0.02, \beta = -0.3, \epsilon = 0.3$  时孤子的势函数等势图  
Fig. 2 Figure of soliton equipotential function with  $\delta = -0.02, \beta = -0.3, \epsilon = 0.3$

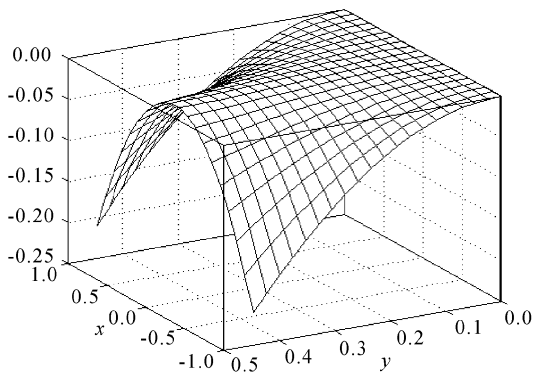


图 3 孤子“势能”随  $x, y$  的变化图  
Fig. 3 Variance of soliton potential function versus  $x, y$

幅度可以实现稳定,与前面计算的结论也是一致的。

2) 光线强度足以产生非线性增益,不需要补偿滤波器的损耗,可以使孤子实现稳定传输。

当光纤提供的非线性增益满足(8)式的条件时,就不需要给系统提供补偿滤波器损耗的增益,抑制

了额外增益带来的新的不稳定。图 2 为  $\delta = -0.02, \beta = -0.3, \epsilon = 0.3$  时孤子势函数的“等势图”,图 3 为孤子的“势能”随  $x, y$  变化的三维图,比较两图,在平衡点  $(0, \sqrt{|\frac{\delta}{\beta + 2\epsilon}|})$  附近,有  $\partial^2 \phi / \partial x^2 < 0$ ,即只要非线性增益满足一定条件,不必再为系统提供补偿滤波器损耗的额外增益,孤子传输的幅度可以实现稳定。

更高阶非线性吸收系数不为 0 时,计算了两种情况,分别为五阶系数为负,七阶系数为 0 与五阶和七阶系数为负的情形,第一种情况,当三阶非线性增益满足条件(9)时,孤子传输能变得稳定,图 4(a), (b)分别为  $\delta = -0.02, \beta = -0.3, \epsilon = 0.398, \nu = -0.26$  时孤子势函数等势图和孤子“势能”随  $x, y$  变化关系图,由两图可知,在平衡点,  $\partial^2 \phi / \partial x^2 < 0$ ,孤子的传输可实现稳定,与前面的计算是一致的。对七阶非线性系数为负的情况,精确解析求解比较难,假

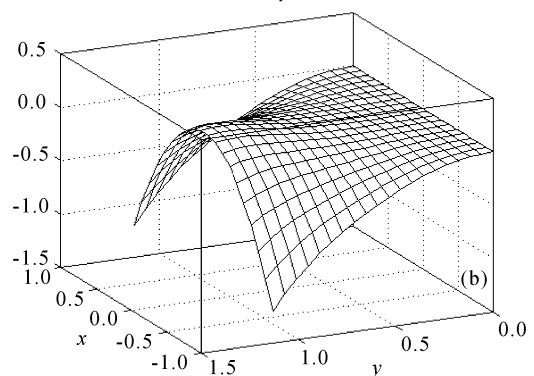
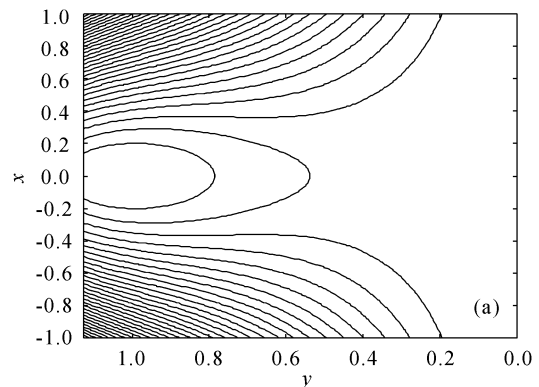


图 4  $\delta = -0.02, \beta = -0.3, \epsilon = 0.398, \nu = -0.26$ , 孤子的势函数等势图(a)和孤子势函数的“势能”图(b)  
Fig. 4 Figure (a) and variance (b) of soliton equipotential function with  $\delta = -0.02, \beta = -0.3, \epsilon = 0.398, \nu = -0.26$

定  $\delta \approx 0$ , 当三阶非线性增益满足(12)式的条件时,孤子的传输可实现稳定。

文献[7]也引入过孤子势函数,它用来分析系统中窄带滤波器和附加的线性增益对 Gordon-Haus 效应抑制,没有分析光纤中存在高阶非线性效应的现象,而本文引入的广义势函数,从理论上分析光线足够强时,产生高阶非线性增益,不再需要补偿滤波器的损耗,避免了因额外的线性增益放大与孤子链同时存在的线性波引起背景的不稳定,从而实现孤子的稳定传输。

### 参 考 文 献

- 1 J. P. Gordon, H. A. Haus. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10):665~667
- 2 J. P. Gordon, L. F. Mollenauer. Scheme for the characterization of dispersion-managed solitons [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4):223~225
- 3 Mark J. Ablowitz, Gino Binodini, Eric S. Olson. Incomplete collisions of wavelength-division multiplexed dispersion-managed solitons [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(5):577~583
- 4 A. Mecozzi, J. D. Moores, H. A. Haus *et al.*. Soliton transmission control [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(23):1841~1843
- 5 M. Nakazawa, K. Kurokawa, H. Kubota *et al.*. Observation of the trapping of an optical soliton by adiabatic gain narrowing and its escape [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(15):1881~1884
- 6 M. F. Ferreira. Analysis of femtosecond optical soliton amplification in fiber amplifiers [J]. *Opt. Comm.*, 1994, **107**:365~368
- 7 Yuji Kodama, Akira Hasegawa. Generation of asymptotically stable optical solitons and suppression of Gordon-Haus effect [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1):31~33
- 8 Yang Xianglin. Theoretic Basis of Optical Soliton Communication [M]. Beijing: The National Defense Industry Press, 2000. 202~203 (in Chinese)



## 第九届中国国际激光及光电子产品展览会 (ILOPE 2003)

由国务院批准创办的“中国国际激光及光电子产品展览会”(英文简写“ILOPE”)是中国最早创办,最具代表性和影响力的国际专业光电贸易展会。2003年10月22~25日,第九届中国国际激光及光电子产品展览会将在中国北京国际展览中心举行。

**主办单位** 中国国际贸易促进委员会,中国光学光电子行业协会,中国国际展览中心集团公司

**承办单位** 中国光学光电子行业协会,中展集团北京华港展览有限公司

**支持单位** 信息产业部,国家科学技术部,中国科学院,中国兵器工业集团公司,亚太经济合作组织

**展品大类** 光电材料和元件,激光器与应用,光通讯产品,显示技术及设备,光信息产品,光学仪器,红外、传感技术等相关应用

展位规格及价位表

类 型	国内企业	国外企业
	及国内产品	及国外产品
标准展位(起租 9 m <sup>2</sup> )	¥6750 元/9 m <sup>2</sup>	US \$ 3600 元/9 m <sup>2</sup>
室内光地(起租 18 m <sup>2</sup> )	¥650 元/m <sup>2</sup>	US \$ 350 元/m <sup>2</sup>

**优惠办法** (1) 凡在 6 月 15 日前报名的企业可享受 5% 的优惠。(2) 凡参加过 ILOPE2002, 2001 和 ILOPE2000 的企业以及中国光学光电子行业协会的会员单位均可享受 5% 的优惠(可累加)。

### 联系方式

中展集团北京华港展览有限公司:

方 芳,刘宝存,梁 晨,李 超

电话:(010)84600341,84600339,84600335

传真:(010)84600325,84600346

电子邮件:fang@ciec-exhibition.com,

lc@ciec-exhibition.com

中国光学光电子行业协会:

所洪涛,吕玉华

电话:(010)64362211-490

传真:(010)64347322

电子邮件:COEMA@PUBLIC2.BTA.NET.CN

展会网址:www.ilope-expo.com

Http://ilope.ciec-exhibition.com