

# 光学孤子在色散缓变光纤中的传输特性研究\*

徐文成\*\* 郭 旗 廖常俊 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

**摘 要** 从理论上分析了超短光脉冲在色散缓变光纤中无畸变传输所要求的色散变化关系, 设计了单模缓变光纤结构参数. 数值模拟验证了理论分析结果, 指出改变光纤色散参数完全可以克服光纤损耗对光孤子波形的畸变影响.

**关键词** 光学孤子, 色散缓变光纤.

## 1 引 言

光学孤子脉冲在高码率通信系统中的应用首先是由 Hasegawa 等人<sup>[1]</sup>提出的. 自 1980 年贝尔实验室的 Mollenauer 等人<sup>[2]</sup>首次在实验上观测到光纤中的孤子传输后, 掀起了光纤孤子理论和实验研究的热潮<sup>[3~11]</sup>. 在实际的通信系统中, 由于光纤本身存在损耗, 所以, 不能保证光孤子波形不变地传输. 为克服此缺点, 已提出两种方案, 一种是采用周期性的放大(一般是喇曼放大和掺铒光纤放大)以补偿光孤子传输能量的损耗; 另一方案是 Tajima<sup>[6]</sup>于 1987 年提出的, 即使用孤子光纤来实现光孤子传输时脉冲波形不变, 并用数值方法模拟了光脉冲在孤子光纤中的传输特性, 得出在计算精度范围内光脉冲的波形保持不变的结论, 从而验证了他的设想. Kuehl<sup>[7]</sup>则用近似微扰方法讨论了光纤孤子在色散缓变单模光纤中的压缩和放大效应, 给出了数值模拟结果. 近年来, 由于光纤工艺的改进, 已拉制出孤子光纤<sup>[12]</sup>, Chernikov 等人<sup>[8~11]</sup>将孤子光纤用于孤子激光器中, 产生了较理想的光孤子脉冲串, 为寻找可靠、稳定、理想的光孤子源提供了可选择的途径. 本文首先从理论上分析了超短光脉冲在色散缓变光纤中无畸变传输所要求的光纤群色散与损耗之间的关系, 给出其具体的表达式, 而后设计了满足色散关系的单模光纤结构参数, 最后采用分步傅里叶变换方法数值模拟了光学孤子在不同缓变色散单模光纤中的传输特性.

## 2 传输方程及其解析分析

在准单色、慢变包络振幅条件下, 描述超短光脉冲在色散缓变单模光纤中的传输方程是准非线性薛定谔方程:

收稿日期: 1993年3月9日; 收到修改稿日期: 1993年5月11日

\* 广东省科委青年科学基金项目资助课题

\*\* 中国科学技术大学博士研究生

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta' \frac{\partial A}{\partial t} + i \frac{\beta''}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中  $A(z, t)$  为慢变包络振幅,  $\beta' = d\beta/d\omega = 1/V_g$ ,  $V_g$  为中心频率  $\omega_0$  处的群速度,  $\beta''(z) = d^2\beta/d\omega^2$  为群速度色散,  $\gamma$  为非线性系数,  $\alpha$  为光纤的损耗因子.

### 2.1 无损耗情形

(1)式中, 若  $\alpha = 0$  (无损耗), 作下列变换:

$$\tau = [t - \int \beta' dz]/T_0, \quad \xi = \frac{z}{L_D}, \quad u = (\gamma L_D)^{1/2} A. \quad (2)$$

式中  $L_D = T_0^2/\beta''(0)$  为色散长度, (1)式变为:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\beta'' L_D}{T_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = 0 \quad (3)$$

(3)式中对于  $\beta'' = T_0^2/L_D = \beta''(0)$ , 即光纤色散为常数, 可得到归一化的非线性薛定谔方程:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = 0 \quad (4)$$

(4)式在一定的初始条件下存在孤子解. 特别地, 一阶孤子在传输过程中, 其脉冲宽度和波形保持不变.

### 2.2 $\alpha$ 纵向均匀情形

此种情况下, 损耗沿传输方向为常数. 对(1)式作变换:

$$\tau = [t - \int \beta' dz]/T_0, \quad \xi = \frac{1}{\alpha L_D} [1 - \exp(-\alpha z)], \quad q = (\gamma L_D)^{1/2} \exp\left(\frac{\alpha z}{2}\right) A \quad (5)$$

得到:

$$i \frac{\partial q}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{|\beta''| L_D}{T_0^2} \exp(\alpha z) \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + |q|^2 q = 0 \quad (6)$$

(6)式与归一化的非线性薛定谔方程(4)相比只是色散项系数不同, 若  $|\beta''| L_D \exp(\alpha z) = T_0^2$ ,

(6)式与(4)式将形成完全相同. 此时, (6)式也存在波形保持不变的孤子解, 且有关系式:

$$\beta''(z) = \beta''(0) \exp(-\alpha z) \quad (7)$$

(7)式就是光脉冲在损耗为  $\alpha$  的光纤中传输时其波形保持不变所满足的条件. 由变换式(5)可以看出, 光脉冲的振幅以指数衰减.

### 2.3 $\alpha$ 纵向非均匀情形

现在讨论光纤损耗  $\alpha$  与纵向距离  $z$  有关情形. 假设  $\alpha(z)$  是连续光滑函数, 将脉冲包络振幅  $A(z, \tau)$  分解为两部分之积, 第一部分表示无损耗部分  $\Phi(z, \tau)$ , 另一部分表示损耗  $g(z)$ ,  $g(z)$  仅与纵向距离  $z$  有关, 而且  $|g|^2$  正比于光脉冲能量. 因此有:

$$A(z, \tau) = g(z)\phi(z, \tau) \quad (8)$$

对(8)式两边微分, 考虑损耗的定义  $dg/g = -(\alpha/2) dz$ , 并代入(1)式可得:

$$g(\partial\phi/\partial z) + (i/2) [\beta''(z)/T_0^2] (\partial^2\phi/\partial\tau^2) g = i\gamma|\phi|^2\phi|g|^2 g \quad (9)$$

若  $\beta''(z) = \beta''(0)|g|^2$ , 再对(9)式作变换  $d\xi = (|g|^2/L_D) dz$ ,  $p = (\gamma L_D)^{1/2} \phi$ . 得到:

$$i(\partial p/\partial \xi) + (\partial^2 p/\partial \tau^2)/2 + |p|^2 p = 0 \quad (10)$$

(10)式又与归一化的非线性薛定谔方程(4)形式上完全一样. 因而得出光脉冲在纵向非均匀损耗单模光纤中传输其波形保持不变所要求的色散缓变条件为:

$$\beta''(z) = \beta''(0) \exp\left[-\int_0^z \alpha(z') dz'\right] \quad (11)$$

## 2.4 孤子光纤的色散与其结构参量的函数关系

(11)式给出了孤子光纤中的群色散与损耗  $\alpha(z)$  之间的关系,从中可以看出,光纤群色散是以指数率衰减的.在光纤拉制工艺上可以通过改变光纤纤芯大小的方法来实现,因为单模光纤的群色散包括材料色散和波导色散.材料色散对于某一波长为定值,在  $\lambda > 1.32 \mu\text{m}$  波段其值为负,而波导色散与光纤纤芯的大小和折射率差  $\Delta$  有关,其值为正.在  $\Delta$  不变的条件下,减少光纤纤芯的直径可以增加波导色散,因而,相应地减少群速度色散.目前拉制的色散缓变光纤就是通过减少光纤直径的大小实现的,这种处理还能够提高光功率密度,从而有效地增加非线性效应.考虑到光纤纤芯大小的变化,群色散与损耗  $\alpha(z)$  之间的关系应作下列修正:

$$\beta''(z) = \frac{c}{R^2} \exp \left[ - \int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad (12)$$

式中  $R$  为光纤纤芯的有效半径,  $C$  是待定常数.

## 3 数值模拟结果

超短光脉冲在色散缓变光纤中的传输方程,目前只能由数值法求解.通常采用分步(Split-Step)傅里叶法和光束传输法,其等价性已被证明<sup>[13]</sup>,本文使用分步傅里叶方法,其实质是将方程分解为线性和非线性两部分单独处理.利用傅里叶变换,可以得到归一化的非线性薛定谔方程(4)的算法公式:

$$u(\zeta + \Delta\zeta) = F^{-1} \{ \exp(-i\omega^2 \Delta\zeta) F[ \exp(i\Delta\zeta |q(\zeta, \tau)|^2) ] \} \quad (13)$$

式中,  $F$  和  $F^{-1}$  分别表示傅里叶正变换和反变换,  $\omega$  为傅里叶空间变量.模拟参数:光脉冲半宽度:  $T_{\text{FWHM}} = 17.63 \text{ ps}$ . 光波波长:  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ . 光纤色散:  $D(0) = 20 \text{ ps/km-nm}$ . 非线性系数:  $\gamma = 2.2 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ . 光纤的纤芯半径:  $R(0) = 5 \mu\text{m}$ . 图 1 是光学孤子在孤子光纤中传输 100 km 其相对脉冲宽度与传输距离之间的关系,从图中可以看出,光学孤子在传输过程中脉宽保持不变.图 2 曲线(a)和图 3 曲线(a)分别示出光纤群色散、纤芯半径与传输距离之间的关系曲线.色散值从  $20 \text{ ps/km-nm}$  变到  $0.7 \text{ ps/km-nm}$ , 光纤半径从  $5 \mu\text{m}$  变到  $2.6 \mu\text{m}$ . 另外,调节光纤本身结构参数,可以对光脉冲产生压缩效果.图 2 曲线(b)和图 3 曲线(b)分别给出了超短光脉冲每 15 km 脉冲宽度压缩 30% 的群色散、纤芯半径与传输距离之间的关系曲线.

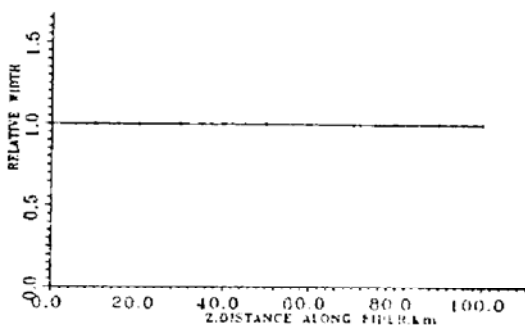


Fig. 1 Signal relative pulse width versus distance

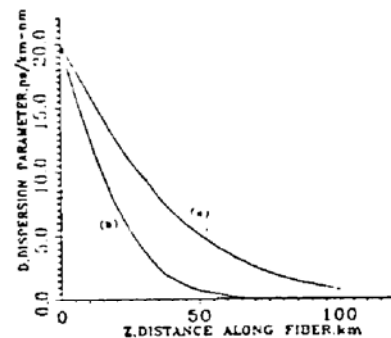


Fig. 2 Dispersion versus distance of a fiber curve (a) is for full compensation and (b) for pulse compression [30% in 15 km]

为了研究不同色散参数对光纤损耗的补偿效应，引入补偿度参量  $K$ ，它表征光纤色散变化的指数因子与光纤损耗  $\alpha$  之比。  $K = 100\%$  表示光纤色散完全补偿光纤损耗，此时，光脉冲可以无畸变地传输。图 4、图 5 分别表示补偿度  $K$  分别为 100%，75%，50%，25% 时，光学孤子相对脉宽、相对振幅与传输距离之间的变化关系。由图中看出，补偿度  $K$  越大，相对脉冲宽度的变化越慢。当  $K = 100\%$  时，光纤群色散完全补偿损耗对光脉冲的展宽效应，此时，光脉冲在传输过程中其脉冲宽度保持不变。另外，不同的补偿度对光脉冲相对振幅的变化也非常明显。补偿度  $K$  越大，光脉冲的相对振幅变化速度越慢，即使  $K = 100\%$ ，光脉冲的相对振幅也是以指数衰减的，这与前面理论分析的结果一致。图 6、图 7 表示在上述不同补偿度下光纤群色散、纤芯半径与传输距离之间的关系。此处，为了计算方便，取  $|\beta''(0)| = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ，这样， $D(0) = 15.7 \text{ ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$ ， $L_D = 5 \text{ km}$ ， $R(0) = 4.5 \mu\text{m}$ 。上面的模拟结果表明，不同的色散缓变光纤对光孤子的传输特性产生一定的影响，调节光纤本身的结构参数可以补充光纤损耗对光孤子脉冲宽度展宽效应。

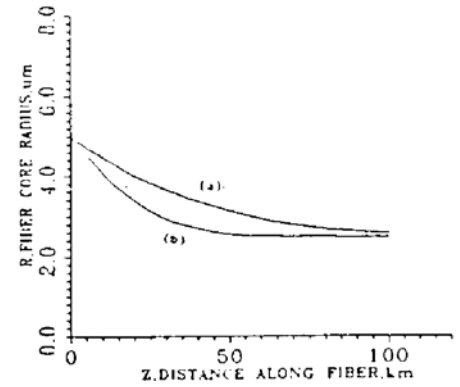


Fig. 3 Core radius versus distance. (a) is for full compensation and (b) for pulse compression [30% in 15 km]

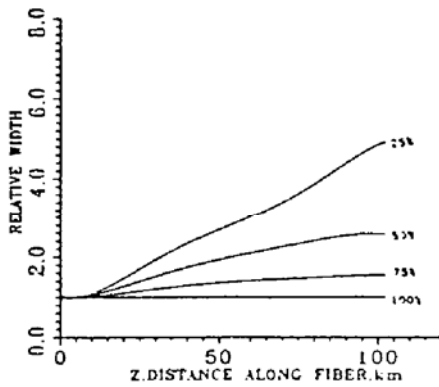


Fig. 4 Signal relative width versus distance for several degrees of compensation

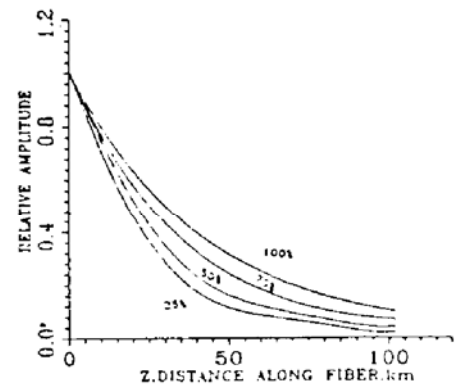


Fig. 5 Signal relative amplitude versus distance degrees of compensation

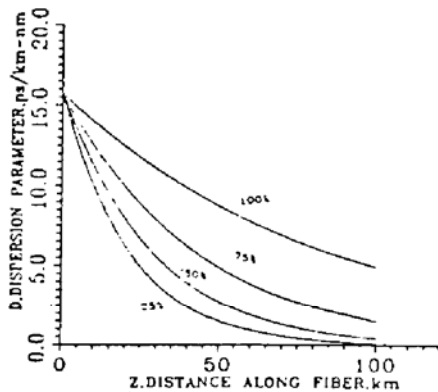


Fig. 6 Different fiber dispersions versus distance for several degrees of compensation

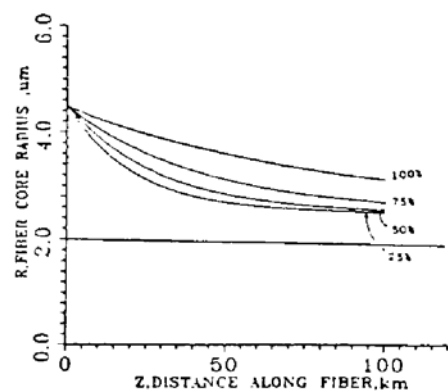


Fig. 7 Different fiber core radius versus distance for several degrees of compensation

**结 论** 从理论上分析了超短光脉冲在色散缓变光纤中无畸变传输要求的色散变化关系, 设计了单模缓变光纤结构参数. 数值模拟验证了理论分析结果, 并讨论了光学孤子在不同色散参数下传输特性, 指出改变光纤色散参数可以克服光纤损耗对光孤子波形的畸变影响.

### 参 考 文 献

- [1] A. Hasegawa, F. Tappert, Transmission of stationary nonlinear optical pulse in dispersive dielectric fiber. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**: 142
- [2] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon, Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**: 1095~1098
- [3] G. F. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. Academic press, Inc., 1989
- [4] L. F. Mollenauer, Experimental study of soliton transmission over more than 10,000 km in dispersion-shifted fiber. *Opt. Lett.*, 1990, **15**: 1203~1205
- [5] M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota *et al.*, 10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometers. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(14): 1270~1272
- [6] K. Tajima, Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss. *Opt. Lett.*, 1987, **12**: 54~56
- [7] H. H. Kuehl, Solitons on an axially nonuniform optical fiber. *J. O. S. A. (B)*, 1988, **5**(3): 709~713
- [8] S. V. Chernikov, P. V. Mamyshev, Femtosecond soliton propagation in fibers with slowly decreasing dispersion. *J. O. S. A. (B)*, 1991, **8**(8): 1633~1641
- [9] S. V. Chernikov, J. R. Taylor, P. V. Mamyshev *et al.*, Generation of soliton pulse train in optical fiber using two CW singlemode diode lasers. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(10): 931~932
- [10] P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov, E. M. Dianov, Generation of soliton trains for high-bit-rate optical fiber communication lines. *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(10): 2347~2355
- [11] P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov, Ultrashort-pulse propagation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(19): 1076~1078
- [12] V. A. Bogatyrev *et al.*, Signal mode fiber with chromatic dispersion varying along the length, *J. Lightwave, Technol.*, 1991, **LT-9**: 561~566
- [13] 郭 旗, 周国生, 温 群等, 双光学孤子脉冲的传输特性. *光学学报*, 1990, **10**(7): 651~655

## Propagation Properties of Ultrashort Pulses in the Fibers with Slowly Decreasing Dispersion

Xu Wencheng    Guo Qi    Liao Changjun    Liu Songhao

(Institute of Quantum Electronics, South Normal University of China, Guangzhou 510631)

(Received 9 March 1993; revised 11 May 1993)

**Abstract** We theoretically analysed the relationship between the fiber dispersion and its loss for soliton propagation in the fiber with slowly decreasing dispersion, and designed the structure parameters of the fiber. Numerical results are in agreement with theoretical analysis.

**Key words** optical soliton, fiber with slowly decreasing dispersion.