

# 孤子光纤中拉曼自频移效应的研究\*

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** 首次报道孤子光纤中拉曼自频移效应的研究结果, 对满足孤子光纤色散关系条件时含损耗、拉曼延迟效应的广义非线性薛定谔方程进行了微扰分析, 求得了拉曼自频移关系表达式, 发现改变光纤几何参数可以有效地控制孤子拉曼自频移。

**关键词** 孤子, 光纤, 拉曼自频移效应。

## 1 引 言

常规光纤中孤子自频移效应已在实验上观察到<sup>[1]</sup>, 并由 Gordon 作了理论解释<sup>[2]</sup>, 但尚未见到孤子光纤中自频移效应研究的报道。孤子光纤概念首先由日本学者 Tajima 于 1987 年提出的<sup>[3]</sup>, 并用数值方法模拟了光脉冲在孤子光纤中的传输特性, 得出了在计算精度范围内光脉冲的波形保持不变的结论; Kuehl<sup>[4]</sup>从含损耗的准非线性薛定谔方程出发, 采用微扰方法讨论了光孤子在色散缓变光纤中的放大和压缩效应, 给出了数值模拟结果。文献[5]则运用一般数学代换方法, 导出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, 指出改变光纤结构参数可以完全克服光纤损耗对孤子波形的畸变影响。近年来, 由于光纤工艺的改进, 已拉制出色散纵向非均匀光纤, Chernikov 等人<sup>[6]</sup>将此种光纤用于激光器中, 产生了较理想的孤子脉冲串, 为寻找稳定、可靠、理想的光孤子源提供了新的途径, 这种光纤引起了人们广泛的兴趣<sup>[7~9]</sup>。本文从描述超短光脉冲在色散缓变光纤中传输所满足的广义准非线性薛定谔方程(含光纤损耗和拉曼自频移效应)出发, 理论分析了孤子光纤中光脉冲传输方程, 给出了拉曼自频移关系表达式, 指出利用孤子光纤可以有效地降低孤子自频移。

## 2 解析分析

设单模光纤中传输的电场  $E(x, y, z, t)$  为:

$$E(x, y, z, t) = A(z, t)U(x, y, z) \exp \left\{ i \left[ \int_0^z \beta(z') dz' - \omega_0 t \right] \right\} \quad (1)$$

式中,  $A(z, t)$  为慢变包络振幅,  $U(x, y, z)$  为纵向缓变的光纤横向场分布,  $\beta$  为光波波数,  $\omega_0$

\* 本课题属广东省科委青年科学基金项目资助课题

\*\* 中国科技大学博士研究生, 现在华南师范大学量子电子学研究所

收稿日期: 1993年5月24日

为载波频率,  $t$  为时间。在慢变包络近似条件下, 从麦克斯韦方程出发, 可以导出描述超短光脉冲在色散缓变光纤中传输所满足的准广义非线性薛定谔方程(含光纤损耗和拉曼延迟效应)<sup>[10]</sup>:

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

式中,  $\beta'(z) = d\beta/d\omega = 1/V_g$ ,  $V_g$  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,  $T_R$  与拉曼增益的斜率有关, 其值约为 3 fs。

## 2.1 常规光纤

对于常规光纤, 群色散为常数, 若不考虑光纤的损耗( $\alpha = 0$ ), 对(2)式作下列变换:

$$\tau = (t - \beta' z)/T_0, \quad \zeta = z/L_D, \quad u = (\gamma L_D)^{1/2} A \quad (3)$$

式中  $L_D = T_0^2 / |\beta''(0)|$  为光纤色散长度, 可得到在无色散区内的归一化方程为:

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

式中  $\tau_R = T_R/T_0$  为小量(拉曼延迟效应作用较弱), 因此可将式中拉曼项看作微扰项, 根据 Blow 提出的微扰法<sup>[11]</sup>, (4)式的微扰解可假设为:

$$u(\zeta, \tau) = \frac{1}{\eta(\zeta)} \exp \{i\Omega(\zeta)[\tau - \Phi(\zeta)] - i\Psi(\zeta)\} \operatorname{sech} \left[ \frac{\tau - \Phi(\zeta)}{\eta(\zeta)} \right] \quad (5)$$

式中的微扰参数  $\eta(\zeta)$ ,  $\Omega(\zeta)$ ,  $\Phi(\zeta)$ ,  $\Psi(\zeta)$  待定,  $\Omega(\zeta)$  表示孤子的频率漂移量(频移)。将假设解(5)式代入准非线性薛定谔方程的能量和动量表达式, 得到微扰参数满足的演化关系:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta(\zeta)}{d\zeta} &= 0, & \frac{d\Omega(\zeta)}{d\zeta} &= -\frac{\tau_R}{15\eta^4(\zeta)} \\ \frac{d\Phi(\zeta)}{d\zeta} &= \frac{\Omega^2}{2} + \frac{1}{2\eta^2(\zeta)}, & \frac{d\Psi(\zeta)}{d\zeta} &= -\Omega(\zeta) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

利用变换式(3)可得到常规光纤中光孤子拉曼自频移微分表达式为:

$$\frac{dv}{dz} = 0.00129 \frac{\lambda^2 D}{T^4}, \quad [\text{THz/km}] \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  为光波波长[ $\mu\text{m}$ ],  $D = -2c\pi\beta''(z)/\lambda^2$  为光纤色散参量[ps/km/nm],  $T$  为脉冲半宽度[ps],  $z$  为脉冲传输距离[km]。对于初始条件  $\eta(\xi = 0) = 1$  (孤子的振幅为 1) 和  $\Omega(\xi = 0) = 0$ , 积分(7)式得到:

$$\Delta v = 0.00129 \frac{\lambda^2 D}{T^4} z, \quad [\text{THz}] \quad (8)$$

(8)式表明, 对于一定脉宽的光脉冲, 常规光纤中孤子自频移量与传输距离  $z$  成正比。

## 2.2 孤子光纤

(2)式是描述光脉冲在色散缓变光纤中传输所满足的一般方程, 对方程(2)作下列变换:

$$\tau = (t - \int_0^z \beta'(z') dz') T_0, \quad \zeta = \frac{1}{\alpha L_D} [1 - \exp(-\alpha z)], \quad q = (\gamma L_D)^{1/2} \exp\left(\frac{\alpha z}{2}\right) A(z) \quad (9)$$

得到:

$$i \frac{\partial q}{\partial \zeta} + \frac{1}{2} \frac{|\beta''(\zeta)| L_D}{T_0^2} \exp(\alpha z) \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + |q|^2 q - \tau_R q \frac{\partial}{\partial \tau} (|q|^2) = 0 \quad (10)$$

(10)式与(4)式相比只是群色散项系数的不同。当

$$L_D |\beta''(z)| \exp(\alpha z) = T_0^2 \quad (11)$$

时, 即

$$\beta''(z) = \beta''(0) \exp(-\alpha z) \quad (12)$$

(10)式与(4)式在形式上完全一样, (12)式正是孤子光纤中色散参数与光纤损耗之间的关系<sup>[3,5]</sup>。此时, 利用求解常规光纤满足的微扰准非线性薛定谔(4)式的方法, 可求出(10)式的微扰解。孤子光纤中光孤子脉冲在单位长度上的自频移表达式可利用变换式(6)和(9)式得到:

$$\frac{dv}{dz} = 0.00129 \frac{\lambda^2 D(z)}{T^2 + 4}, \quad [\text{THz/km}] \quad (13)$$

比较(7)式与(13)式明显看出, 尽管两者形式相同, 但是, 由于孤子光纤中群色散是纵向传输距离的函数, 它随传输距离的增加不断地减少, 而单位长度上产生的拉曼孤子自频移与光纤色散成正比, 因此, 对于相同的传输距离, 孤子光纤中产生的拉曼自频移比常规光纤中产生的拉曼自频移小。

### 3 数值计算结果

由(13)式知, 孤子光纤中的拉曼自频移与光纤色散  $D(z)$  有关, 因此, 只有得到光纤色散与传输距离  $z$  的函数关系式, 才能计算出孤子自频移的大小。(11)式给出了孤子光纤中的群色散与损耗  $\alpha$  之间的关系, 从中可以看出, 光纤群色散是以指数率衰减的。在光纤工艺上拉制这种光纤可以通过改变光纤纤芯大小的方法来实现的, 考虑光纤纤芯大小的变化, 群色散与光纤损耗之间的关系应作下列修正<sup>[3,5]</sup>:

$$D(z) = \frac{C}{R^2} \exp(\alpha z) \quad (14)$$

式中  $R$  为光纤纤芯的有效半径,  $C$  是待定常数, 它由光纤结构参数决定。从(14)式看出, 光纤色散与半径都是传输距离  $z$  的函数, 对于一定类型的单模光纤(阶跃型、梯度型等), 其半径与色散之间存在一定的关系, 将这一关系与(14)式联系起来可以完全确定孤子光纤中半径、色散分别与纵向传输距离  $z$  之间的变化关系。作为一个特例, 作者研究了阶跃型单模光纤情形, 得到了此种光纤中的色散与其半径的关系<sup>[12]</sup>为:

$$D(z) = 8R - 20 \quad (15)$$

式中  $R$  是光纤纤芯半径(以  $\mu\text{m}$  为单位), 这样, 由(14)式和(15)式联立得到:

$$D^3 + 40D^2 + 400D = 64C \exp(-\alpha z), \quad (16)$$

$$8R^3 - 20R^2 = C \exp(-\alpha z). \quad (17)$$

因此, 由(16)式和(17)式可以确定任意  $z$  处光纤色散  $D(z)$  和半径  $R(z)$  的大小。图 1、图 2 分别给出了  $D(0) = 20 \text{ ps/km/nm}$ ,  $R(0) = 5 \mu\text{m}$  时光纤色散、半径分别与传输距离  $z$  的关系曲线, 其中光纤损耗  $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$  ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ )。从图中可以看出, 光纤半径从  $5 \mu\text{m}$  变到  $2.71 \mu\text{m}$  时, 色散从  $20 \text{ ps/km/nm}$  减少到  $1.67 \text{ ps/km/nm}$ 。

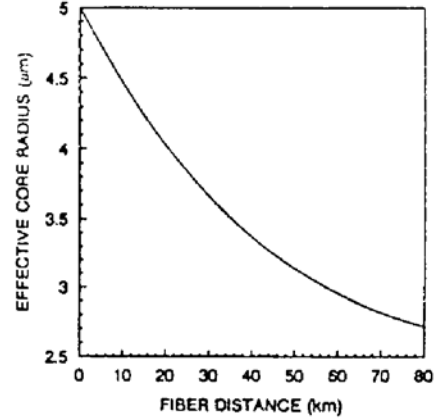
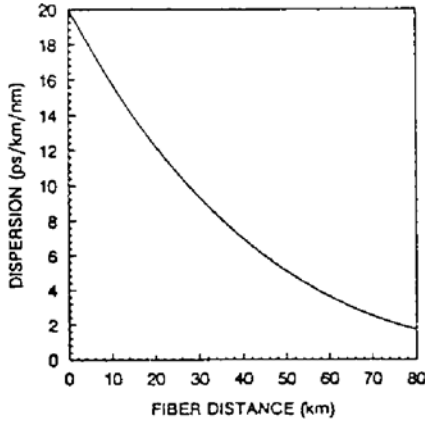


Fig. 1 Dispersion versus distance of a soliton fiber.

Fig. 2 Fiber effective core radius versus distance. Fiber

Dispersion reduces from 20 ps/km/nm to 1.67 ps/m/nm while fiber core radius changes from 5 micron to 2.71 micron for 80 km fiber length

length is 80 km

由(13)式和(16)式，作者计算了脉宽从皮秒到飞秒光脉冲在孤子光纤中传输 80 km 后产生的拉曼自频移大小，见图 3 曲线(a)，为了比较，图 3 曲线(b)给出了常规光纤中孤子频移与脉宽的函数关系。由于孤子自频移与脉冲宽度的四次方成反比，因此，对于皮秒脉冲，其拉曼自频移量较小。取脉宽  $T = 1$  ps，产生的孤子自频移量  $\Delta\nu = 1.26$  THz，它大约是脉冲本身谱宽的 4 倍，而常规光纤中孤子自频移量  $\Delta\nu = 4.95$  THz，它是脉冲本身谱宽的 16 倍。可见，孤子光纤中的拉曼自频移比常规光纤中的拉曼自频移量大约小 4 倍。当脉宽为飞秒量级时，前者比后者要小得更多。为了研究孤子光纤中孤子拉曼自频移与传输距离之间的关系，作者计算了脉宽为 100 fs 的光脉冲在孤子光纤中传输 80 km 过程中产生的拉曼自频移量，图 4 曲线(a)显示其关系，图 4 曲线(b)是常规光纤中孤子自频移与传输距离  $z$  之间的关系曲线。从图中看出，对于一定长度的光纤，孤子光纤中拉曼自频移比常规光纤中孤子自频移小得多，这是因为孤子光纤中的群色散随传输距离的增加不断的减少，而单位光纤长度产生的孤子拉曼自频移与色散值成正比(见(13)式)的缘故。所以使用孤子光纤是减少孤子拉曼自频移的有效手段。

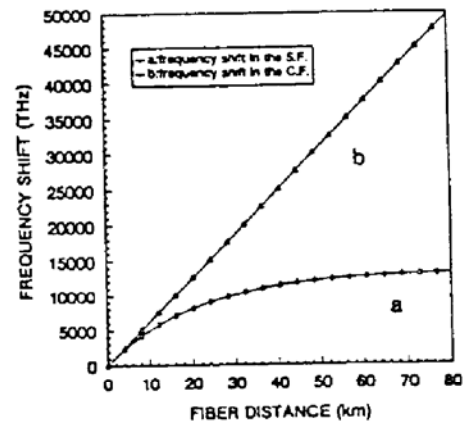
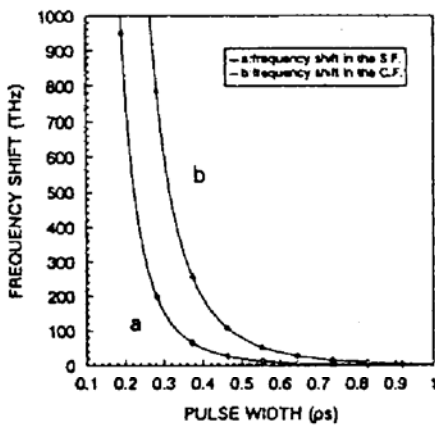


Fig. 3 Frequency shift versus pulse width. Cure (a) is that in the soliton fiber, and cure (b) is that in the conventional fiber

Fig. 4 Frequency shift versus fiber distance. Cure (a) is that in the soliton fiber and cure (b) is that in the conventional fiber

## 参 考 文 献

- [1] F. M. Mitschke, L. F. Mollenauer, Discovery of the soliton self-frequency shift. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10): 659~661
- [2] J. P. Gordon, Theory of the soliton self-frequency shift. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10): 662~664
- [3] K. Tajima, Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(1): 54~56
- [4] H. H. Kuehl, Soliton on an axially nonuniform optical fiber. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1988, **5**(3): 709~713
- [5] 徐文成, 郭旗, 廖常俊等 光学孤子在色散缓变光纤中的传输特性研究. *光学学报*, 1994, **14**(3): 287~291
- [6] 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
- [7] Xu Wencheng, Guo Qi, Liao Changjun *et al.*, Femtosecond soliton compression and stabilization in fibers with slowly dispersion. *OSA/ILS '93 Annual Meeting*, Toronto, Canada. 64
- [8] 徐文成, 郭旗, 廖常俊等 直径指数变化的孤子光纤. 第五届全国纤维光学与集成光学学术讨论会暨第四届光计算学术讨论会(CFIO&OC '92), 1992: 20
- [9] 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, **QE-27**(10): 2347~2355
- [10] P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov, Ultrashort pulse propagation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(19): 1076~1078
- [11] K. J. Blow, N. J. Doran, D. Wood, Suppression of the self-frequency shift by bandwidth-limited amplification. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1988, **5**(6): 1301~1304
- [12] A. W. Snyder, J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*, Published in the USA by Chapman and Hall, 1983, Part I
- [13] 徐文成, 廖常俊, 郭旗等, 色散缓变光纤对飞秒孤子的压缩效应. *光子学报*, 1994, **23**(3): 233~239

## Raman Soliton Self-Frequency Shift in Soliton Fiber

Xu Wencheng Guo Qi Liao Changjun Liu Songhong

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

(Received 24 May 1993)

**Abstract** The Raman soliton self-frequency shift in soliton fiber is investigated by means of analyzing perturbatively quasinonlinear Schrodinger equation including fiber loss and Raman delayed nonlinear effect. It is found that the self-frequency shift in soliton fiber is much small comparing to that in conventional fiber, and it can be controlled by adjusting the fiber structure parameters.

**Key words** soliton, optical fiber, Raman self-frequency shift effect.