

色散缓变光纤中的调制不稳定性分析*

徐文成 罗爱平 郭 旗 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

摘 要 研究了色散缓变光纤中调制不稳定性效应, 得到了增益谱与光纤纵向色散参量的一般关系式。结果表明, 色散缓变光纤较常规光纤具有较宽的增益谱。选取色散缓变光纤的色散参量可以获得较大的增益带宽。数值模拟显示, 利用色散缓变光纤中的调制不稳定性可以产生高重复率的基本孤子脉冲串。

关键词 调制不稳定性, 孤子脉冲产生, 色散缓变光纤。

1 引 言

当连续或准连续波在非线性色散介质中传输时, 由于非线性相互作用而变得不稳定, 这种现象被称为调制不稳定性^[1]。调制不稳定性在流体力学、等离子体物理以及非线性光学中逐步受到人们的重视, 特别是近年来光纤中光波的调制不稳定性研究日益深入^[2-5]。在光纤中利用调制不稳定性效应可以产生重复率可调的 ps-fs 孤子脉冲串, 这在实验上已经得到证实^[6]。光纤中的调制不稳定性起源于光纤色散与非线性相互作用, 这种作用导致连续微扰光波的振幅的指数增长, 其产生存在一定的频率范围, 范围越宽, 越易产生调制不稳定性效应。最近研究表明, 色散纵向变化的光纤(色散缓变光纤)能够产生超宽带连续谱^[7], 而且也易形成调制不稳定性效应。本文研究光波在色散缓变光纤中传输时的调制不稳定性效应, 得到了调制不稳定性的增益谱与光纤色散参量的一般关系。研究结果表明, 色散缓变光纤(DDF)较常规光纤(ODF)具有较大的增益带宽。在抽运功率一定的条件下, 通过光纤色散纵向变化参量可以获得较宽的增益带宽。

2 色散关系与增益谱

光波在光纤中传输时所满足的非线性方程为^[8]

$$\frac{\partial q}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial q}{\partial t} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} q = i\gamma |q|^2 q, \quad (1)$$

式中 z 为传输距离, t 是时间, q 为慢变包络振幅, β_1 为光波群速度的倒数, β_2 为光纤二阶色散系数, α 为光纤的损耗系数, γ 为光纤非线性系数。选取随脉冲群速度移动的坐标系, 引进

* 国家自然科学基金(19674015)和广东省自然科学基金青年项目(980030)资助项目。

收稿日期: 1999-11-16; 收到修改稿日期: 2000-05-24

下列变换:

$$T = t - \beta_1 z, \quad \xi = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)], \quad A = \exp\left(\frac{\alpha}{2} z\right) q, \quad (2)$$

则方程(1)变为

$$i \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{\beta_2}{2} \exp(\alpha z) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i \gamma |A|^2 A = 0, \quad (3)$$

方程(3)的稳定解为

$$A_s = \sqrt{P_0} \exp(i \gamma P_0 \xi), \quad (4)$$

其中 P_0 为初始光强度。(4) 式表明连续光波在光纤中传输时其相位随 ξ 增加外, 波形保持不变。下面将考虑稳态解的微扰特性, 令

$$A = (\sqrt{P_0} + a) \exp(i \gamma P_0 \xi), \quad |a| \ll \sqrt{P_0}, \quad (5)$$

式中 a 为微扰参量, 将(5) 式代入(3) 式, 只考虑 a 的一次项, 化简可得

$$i \frac{\partial a}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \beta_2 \exp(\alpha z) \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} - \gamma P_0 (a + a^*), \quad (6)$$

式中 a^* 为 a 的复共轭。设方程(6)的解为

$$a(\xi, T) = a_1 \cos(k\xi - \omega T) + a_2 \sin(k\xi - \omega T), \quad (7)$$

其中 k 和 ω 分别为微扰波的波数和频率, a_1 和 a_2 为微扰波的振幅参量。将(7) 式代入(6) 式, 化简可以得到 k 与 ω 所满足的关系:

$$k = \pm \frac{\omega}{2} |\beta_2| \exp(\alpha z) \left[\omega^2 + \operatorname{sgn} \beta_2 \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2| \exp(\alpha z)} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

(8) 式即所谓的色散关系, 该式表明调制不稳定性只能发生在光纤的负色散区域。对于常规光纤而言, 光纤色散为常数, 即 $\beta_2(z) = \beta_2(0)$, (8) 式变为

$$k = \pm \frac{1}{2} |\beta_2| \exp(\alpha z) \omega (\omega^2 - \omega_c^2)^{1/2}, \quad (9)$$

其中,

$$\omega_c^2 = \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2| \exp(\alpha z)} \quad (10)$$

当光纤损耗为零 ($\alpha = 0$) 时, (9) 式和(10) 式与文献[1] 中给出的结果一致。

对于色散缓变光纤, 设色散沿纵向指数变化, 即 $\beta_2 = \beta_2(0) \exp(-\mu z)$, μ 为色散纵向变化参量, 可得

$$k = \pm \frac{\omega}{2} |\beta_2(0)| \exp(\alpha z) \exp(-\mu z) (\omega^2 - \omega_c^2)^{1/2}, \quad (11)$$

式中,

$$\omega_c^2 = \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2(0)| \exp(\alpha z)} \exp(\mu z). \quad (12)$$

由此可见, k 和 ω 不仅与光纤的损耗有关, 而且与光纤纵向色散变化参量有关。(12) 式表明, ω_c 与光纤损耗成指数衰减关系。这主要是由于光纤损耗降低了光功率。对于一般光纤而言, 光纤损耗 α 为常数。因此, 可以令 $\eta = \mu - \alpha$, 这样, (11)、(12) 式可化简为

$$k = \pm \frac{\omega}{2} |\beta_2(0)| \exp(-\eta z) (\omega^2 - \omega_c^2)^{1/2}, \quad (13)$$

$$\omega^2 = \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2(0)|} \exp(\eta z). \tag{14}$$

为了更深入地研究光纤调制不稳定性特性, 通常引入增益谱 $g(\omega)$, 其定义为

$$g(\omega) = 2\text{Im } k = \omega |\beta_2(0)| \exp(-\eta z) (\omega^2 - \omega^2)^{1/2}. \tag{15}$$

(15) 表明增益谱 $g(\omega)$ 不仅存在一定的频率范围, 而且与参量 η 、传输距离 z 有关。当谱以 $\omega = 0$ 为对称中心轴,

$$\omega_{\max} = \pm \frac{\omega_c}{\sqrt{2}} = \pm \sqrt{\frac{2\gamma P_0}{|\beta_2(0)|}} \exp\left(\frac{\eta z}{2}\right)$$

时, 增益谱 $g(\omega)$ 存在极大值, 其大小为

$$g_{\max} = g(\omega_{\max}) = \frac{1}{2} |\beta_2| \exp(\alpha z) \alpha^2 = 2\gamma P_0. \tag{16}$$

由(16)式知, 增益谱的峰值 g_{\max} 与光纤色散参量无关, 而与光波的功率 P_0 成线性比例关系。图 1 给出了 P_0 分别为 1 W 和 2 W 时常规光纤和色散缓变光纤中调制增益谱的曲线。参数选取分别是 $|\beta_2(0)| = 20 \text{ ps}^2\text{km}^{-1}$, $\gamma = 2.0 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, $\eta = 0.3 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 。图中明显地显示了在抽运功率一定的条件下随着传输距离 z 的增加, 增益谱 $g(\omega)$ 变得越来越宽。其中 $P_0 = 1 \text{ W}$ 时色散缓变光纤的增益谱频率范围 $\Delta\omega_{\text{DDF}}$ 与 $P_0 = 2 \text{ W}$ 时常规光纤的增益谱频率范围 $\Delta\omega_{\text{ODF}}$ 相当。为了清楚比较色散缓变光纤与常规光纤中调制不稳定性的增益谱范围, 由(15)式可求得两者之比为

$$\frac{\Delta\omega_{\text{DDF}}}{\Delta\omega_{\text{ODF}}} = \exp\left(\frac{\eta z}{2}\right). \tag{17}$$

当 $\eta = 0$ 时, 即色散缓变光纤中的色散纵向变化补偿光纤损耗, 两者相等; 当 $\eta < 0$ 时, 光纤损耗大于色散纵向变化参量 μ , $\omega_{\text{DDF}} < \Delta\omega_{\text{DDF}}$; 当 $\eta > 0$ 时, $\omega_{\text{DDF}} > \Delta\omega_{\text{DDF}}$ 。因此, 要获得较宽的调制不稳定性增益谱, 选取色散缓变光纤的纵向变化参量比光纤损耗大是必要的。图 2 给出了在不同的 η 值下, $\Delta\omega_{\text{DDF}}/\Delta\omega_{\text{ODF}}$ 与传输距离 z 的关系曲线。当 $\eta = 0.3 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, $z = 20 \text{ km}$ 时, $\Delta\omega_{\text{DDF}}/\Delta\omega_{\text{ODF}} = 2.0$; 当 $\eta = 0.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, $z = 40 \text{ km}$ 时, $\Delta\omega_{\text{DDF}}/\Delta\omega_{\text{ODF}} = 10$, 这相当于在 $P_0 = 2 \text{ W}$ 时, 色散缓变光纤的增益谱频率范围扩至 16 THz 即 20.4 nm。对于较大的 η

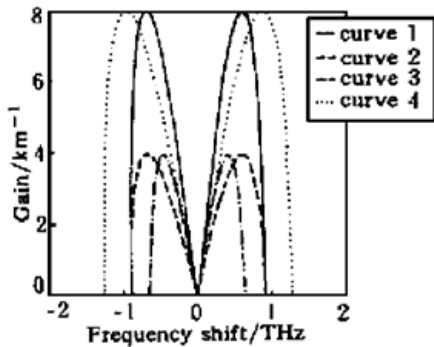


Fig. 1 Gain spectra of modulation instability. Parameters for the curves: Curve 1: ODF, $P_0 = 1 \text{ W}$; Curve 2: DDF, $\eta = 0.3 \text{ dB/km}$, $z = 10 \text{ km}$, $P_0 = 1 \text{ W}$; Curve 3: ODF, $P_0 = 2 \text{ W}$; Curve 4: DDF, $\eta = 0.3 \text{ dB/km}$, $z = 10 \text{ km}$, $P_0 = 2 \text{ W}$

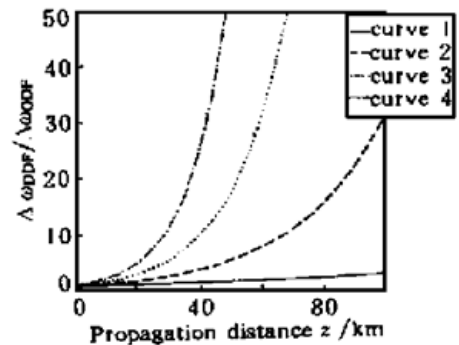


Fig. 2 $\Delta\omega_{\text{DDF}}/\Delta\omega_{\text{ODF}}$ as a function of propagation distance z and dispersion parameter η . Curve 1: $\eta = 0.1 \text{ dB/km}$; Curve 2: $\eta = 0.3 \text{ dB/km}$; Curve 3: $\eta = 0.5 \text{ dB/km}$; Curve 4: $\eta = 0.7 \text{ dB/km}$

值和较长的传输距离, 增益谱频率范围将扩展更宽。由此可见色散缓变光纤可以提供产生调制不稳定性效应的较宽的区域, 预计它在超短光脉冲产生方面具有潜在的应用。

3 基本孤子脉冲串的产生

为了验证色散缓变光纤中连续光波的调制不稳定性效应, 我们采用分步傅里叶方法数值模拟了正弦光波在色散缓变光纤中传输的情形, 结果发现正弦波能够形成基本孤子脉冲串。图 3 绘出了光波在光纤中传输时的强度演化谱, 光纤等价增益系数 $\Lambda = 1.0$, 连续波归一化振幅为 $1.3^{[9]}$ 。图中表明, 正弦波在色散缓变光纤传输过程中逐步被压缩, 最终形成基本孤子脉冲串。图 4 显示其频谱的演化图, 从中可以看出, 新的频率分量随着传输距离的增加而增多。光纤中基本孤子脉冲形成机制是非线性效应(自相位调制效应)在光纤负色散区域对光脉冲的压缩作用与群速度色散效应对光脉冲展宽作用达到平衡的结果。在色散缓变光纤中, 由于光纤色散沿纵向不断地减少, 这样, 非线性效应对光脉冲的压缩作用相对地增强, 因而, 当光脉冲在光纤中传输时存在压缩效应。此压缩效应由归一化的等价增益系数 Λ 表征。因此, 当具有正弦包络的连续波信号在色散缓变光纤中传输时存在三种相互作用效应, 即自相位调制效应、群速度色散效应以及绝热放大效应, 此三种效应的共同作用最终导致基本孤子脉冲串的产生。

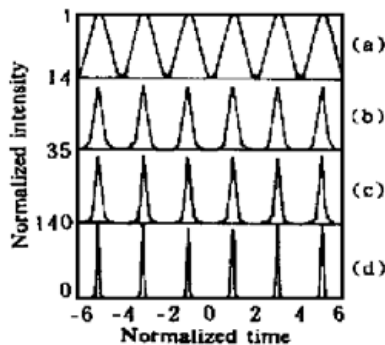


Fig. 3 Intensity evolution of a cw sinusoidal signal in the DDF. The transmission distances: (a) $\xi = 0$; (b) $\xi = 0.50$; (c) $\xi = 1.00$, (d) $\xi = 1.49$

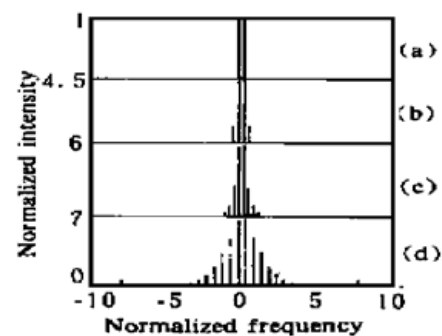


Fig. 4 Spectral evolution of a cw sinusoidal signal transmitted in the DDF. The parameters values are identical to those in Fig. 3

在孤子产生过程中, 我们发现, 对于一定的等价增益系数 Λ , 存在一个孤子产生的最佳光纤长度 ξ_{\max} 。这个长度可以通过单孤子的面积为 1.0 来确定, 最佳光纤长度 ξ_{\max} 不仅与等价增益系数 Λ 有关, 而且与光纤损耗有关。一般情况下, 等价增益系数 Λ 越大, 最佳光纤长度 ξ_{\max} 越短。光纤损耗越大, 最佳光纤长度 ξ_{\max} 越长。这主要是由于光纤损耗降低了光脉冲功率, 而且孤子脉冲面积与功率成正比, 因此形成孤子脉冲所需的光纤长度会更长。在研究过程中, 我们还发现, 等价增益系数 Λ 的大小对形成的孤子脉冲质量产生的一定的影响, 等价增益系数 Λ 越小, 形成的孤子脉冲底座越小。因此, 选取色散纵向变化较小的色散缓变光纤有利于形成高质量的孤子脉冲。

结 论 本文通过理论分析和数值模拟研究了色散缓变光纤中的调制不稳定性效应, 得到了增益谱与色散缓变光纤色散参量的一般表达式。研究结果表明, 色散缓变光纤是产生调制不稳

定效应较好的色散介质, 预计在超短光脉冲产生方面具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics (Second Edition)*. New York: Academic Press, 1995.
- [2] Shukla P K, Rasmussen J J. Modulation instability of short pulses in long optical fibers. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(3) : 171~ 173
- [3] Wabnit S. Modulational polarization instability of light in a nonlinear birefringent dispersive medium. *Phys. Rev. (A)*, 1988, **38**(4) : 2018~ 2021
- [4] Cavalcanti S B, Cressoni J C, *et al.*. Modulation instability in the region of minimum group-velocity dispersion of single-mode optical fibers via an extended nonlinear Schr dinger equation. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **43**(11) : 6162~ 6165
- [5] Xu Wencheng, Wen Shuangchun, Liu Songhao *et al.*. Modulation instability of femtosecond optical pulses in long optical fibers with minimum GVD. *Chin. Phys. Lett.*, 1997, **14**(6) : 470~ 473
- [6] Gouveia-Neto A S, Faldon M E, Sombra A S B *et al.*. Subpicosecond-pulse generation through cross-phase-modulation-induced modulational instability in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(10) : 901~ 903
- [7] Okuno T, Onishi M, Nishimura M. Generation of ultra-broad-band supercontinuum by dispersion-flattened and decreasing fiber. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 1998, **10**(1) : 72~ 74
- [8] Tajima K. Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(1) : 54~ 56
- [9] 徐文成, 郭 旗, 廖常俊等. 光孤子在色散缓变光纤中传输时的等价增益. *物理学报*, 1994, **43**(5) : 734~ 741

Modulation Instability in Decreasing Dispersion Fibers

Xu Wencheng Luo Aiping Guo Qi Liu Songhao

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

(Received 16 November 1999; revised 24 May 2000)

Abstract Modulation instability in decreasing dispersion fibers (DDF) is investigated by means of theoretical analysis and numerical simulation. The gain spectrum of modulation instability is obtained as a function of axially-varying dispersion parameter. The results show that the gain spectrum of DDF is much broader than that of ordinary optical fibers. The broad gain bandwidth can be obtained by selecting the dispersion parameter of DDF. The numerical simulation also shows that fundamental soliton pulses with high repetition rate can be generated in this kind of fiber by modulation instability.

Key words modulation instability, soliton pulse generation, decreasing dispersion fiber.