

文章编号: 1001-3806(2003)01-0044-03

色散缓变光纤中交叉相位调制不稳定增益谱

杨爱玲 王 晶 苗洪利 任志君
(青岛海洋大学物理系, 青岛, 266003)

摘要: 从非线性薛定谔方程出发得到了色散缓变光纤中交叉相位调制(XPM)不稳定性的增益谱。结果表明, XPM 产生的调制不稳定性既可以在光纤反常色散区产生, 也可在正常色散区产生, 反常色散区的增益谱宽比正常色散区宽, 且色散缓变光纤中 XPM 不稳定增益谱宽比普通光纤中 XPM 不稳定增益谱宽, 增益峰值高。色散缓变光纤是 XPM 调制不稳定性的较好色散介质。

关键词: 交叉相位调制; 调制不稳定性; 增益谱

中图分类号: O437; TN929.11 文献标识码: A

Modulation instability gain spectrum of cross phase modulation in decreasing dispersion fiber

Yang Ailing, Wang Jing, Miao Hongli, Ren Zhijun
(Department of Physics, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

Abstract: Modulation instability gain spectrum resulted from cross phase modulation(XPM) in decreasing dispersion fiber (DDF) is presented from nonlinear Schrodinger equation. The results show that XPM induced modulation instability exists not only in the anomalous dispersion regime but also in the normal dispersion regime; what's more, the spectrum width of the former is wider than that of the latter. The spectrum width in DDF is wider than that of in ordinary dispersion fiber(ODF) and the gain peak is also higher. DDF is a good dispersion medium to produce modulation instability of XPM.

Key words: cross phase modulation; modulation instability; gain spectrum

引 言

许多非线性色散系统呈现出调制不稳定性, 它是指色散介质中由于色散与非线性间的相互作用致使稳态的弱的微扰指数性增长的过程^[1]。这种调制不稳定性已在流体力学、非线性光学及等粒子体物理中被人们观测到。理论与实验均表明单个脉冲在光纤中传播时, 调制不稳定性仅在反常色散区产生, 连续与准连续波将分裂为一系列皮秒至飞秒重复频率可调的孤子串^[2], 这对孤子通信系统具有潜在的应用价值, 因此, 调制不稳定性的研究引起了人们的关注^[3-9]。最近的研究结果表明, 单个脉冲在色散缓变光纤中的调制不稳定性的增益谱宽较常规光纤宽, 是产生调制不稳定性效应较好的色散介质^[8]。Agrawal 研究了普通光纤中双光束入射

XPM 的调制不稳定性^[9], 他证明了 XPM 产生的调制不稳定性既可以在光纤反常色散区产生, 也可在正常色散区产生。笔者进一步研究了色散缓变光纤中 XPM 不稳定性, 结果表明, 与普通光纤中的 XPM 的调制不稳定性增益谱相比, 色散缓变光纤中的 XPM 呈现出新的特点。

1 数学模型及理论计算

两束具有相同偏振态但频谱不交迭的光波在光纤中传输时, 其传输方程为^[1]:

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{1}{v_{gj}} \frac{\partial A_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial t^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_j = i \gamma_j [|A_j|^2 + 2 |A_{3-j}|^2] A_j \quad (1)$$

式中, $A_j (j = 1, 2)$ 为光波慢变振幅, v_{gj} 是群速度, β_{2j} 是二阶群速度色散系数, 对于普通光纤 β_{2j} 为常数, $\beta_{2j}(z) = \beta_{2j}(0)$; 对于色散缓变光纤 $\beta_{2j}(z) = \beta_{2j}(0) \exp(-\mu_j z)$, μ_j 为光纤色散纵向变化参量, α_j 为光纤损耗系数, γ_j 为非线性系数。

设 $A_j = u_j \exp(-\alpha_j z / 2)$, 代入(1)式得:

作者简介: 杨爱玲, 女, 1971 年 9 月出生。硕士, 讲师。

主要研究方向为非线性光学及非线性光纤光学。

收稿日期: 2002-03-06; 收到修改稿日期: 2002-05-14

$$\frac{\partial u_j}{\partial z} + \frac{1}{v_{gj}} \frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} =$$

$$i \gamma_j [u_j^2 \exp(-\alpha_j z) + 2u_{3-j}^2 \exp(-\alpha_{3-j} z)] u_j \quad (2)$$

在连续及准连续波情况下, 振幅 u_j 在光纤的输入射端 $z = 0$ 处与 t 无关, 设 $A_j(z, t)$ 在光纤内传输时仍保持与时间无关, 方程(2)的稳态解为:

$$u_j(z, t) = \sqrt{P_j} \exp\{i \gamma_j \int_0^z [P_j \exp(-\alpha_j z') + 2P_{3-j} \exp(-\alpha_{3-j} z')] dz'\} \quad (3)$$

式中, P_j 为 $z = 0$ 处的入射功率。为了研究解的稳定性, 微扰稳态, 设微扰项 $|a_j(z, t)| \ll P_j^{1/2}$, 则有:

$$u_j(z, t) = (\sqrt{P_j} + a_j) \exp\{i \gamma_j \int_0^z [P_j \exp(-\alpha_j z') + 2P_{3-j} \exp(-\alpha_{3-j} z')] dz'\} \quad (4)$$

$$k \sin\left[kz - \Omega_j \left(t - \frac{z}{v_{gj}}\right)\right] U_j - \frac{1}{2} \beta_{2j} \Omega_j^2 \sin\left[kz - \Omega_j \left(t - \frac{z}{v_{gj}}\right)\right] V_j = 0 \quad (7)$$

$$4 \gamma_j \sqrt{P_j P_{3-j}} \exp(-\alpha_{3-j} z) U_{3-j} \cos\left[kz - \Omega_{3-j} \left(t - \frac{z}{v_{g3-j}}\right)\right] + \left\{ \left[2 \gamma_j P_j \exp(-\alpha_j z) + \frac{1}{2} \beta_{2j} \Omega_j^2 \right] U_j - k V_j \right\} \cos\left[kz - \Omega_j \left(t - \frac{1}{v_{gj}}\right)\right] = 0 \quad (8)$$

要使方程组有一个非平凡解, 其系数行列式必为 0, 由此可得: $k^4 - k^2(f_1 + f_2) + f_1 f_2 = C_{XPM}$ (9) 式中,

$$f_1 = \frac{1}{2} \beta_{21}(0) \exp(-\mu_1 z) \Omega_1^2 \left[\frac{1}{2} \beta_{21}(0) \times \exp(-\mu_1 z) \Omega_1^2 + 2 \gamma_1 P_1 \exp(-\alpha_1 z) \right] \quad (10)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \beta_{22}(0) \exp(-\mu_2 z) \Omega_2^2 \left[\frac{1}{2} \beta_{22}(0) \times \exp(-\mu_2 z) \Omega_2^2 + 2 \gamma_2 P_2 \exp(-\alpha_2 z) \right] \quad (11)$$

$$C_{XPM} = 4 \beta_{21}(0) \beta_{22}(0) \exp[-(\eta_1 + \eta_2)z] \times \gamma_1 \gamma_2 P_1 P_2 \Omega_1^2 \Omega_2^2 \quad (12)$$

式中, $\eta_1 = \mu_1 + \alpha_1$, $\eta_2 = \mu_2 + \alpha_2$, 解(9)式得:

$$k^2 = \{(f_1 + f_2) \pm [(f_1 + f_2)^2 - 4(f_1 f_2 - C_{XPM})]^{1/2}\} / 2 \quad (13)$$

由(13)式可知, 对某些 Ω 值, 该式取负号且 $f_1 f_2 < C_{XPM}$ 时, $k^2 < 0$, k 为虚数。由(6)式可知, 此时微扰 a_j 沿光纤长度方向指数增长, 即发生调制不稳定性, 其必要条件为 $f_1 f_2 < C_{XPM}$, 即:

$$16 \gamma_1 \gamma_2 P_1 P_2 \exp[-(\alpha_1 + \alpha_2)z] > \left[\frac{1}{2} \beta_{21}(0) \times \exp(-\mu_1 z) \Omega_1^2 + 2 \gamma_1 P_1 \exp(-\alpha_1 z) \right] \cdot \left[\frac{1}{2} \beta_{22}(0) \times \exp(-\mu_2 z) \Omega_2^2 + 2 \gamma_2 P_2 \exp(-\alpha_2 z) \right] \quad (14)$$

微扰的功率增益为:

$$g(\Omega_1, \Omega_2) = 2\text{Im}(k) = \sqrt{2\{(f_1 + f_2)^2 + 4(C_{XPM} -$$

将(4)式代入(3)式, 并使 a_j 线性化, 得:

$$\frac{\partial a_j}{\partial z} + \frac{1}{v_{gj}} \frac{\partial a_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 a_j}{\partial t^2} = i \gamma_j [P_j \exp(-\alpha_j z) (a_j + a_j^*) + 2(P_j P_{3-j})^{1/2} \exp(-\alpha_{3-j} z) (a_{3-j} + a_{3-j}^*)] \quad (5)$$

令微扰的通解形式为:

$$a_j = U_j \cos\left[kz - \Omega_j \left(t - \frac{z}{v_{gj}}\right)\right] + i V_j \left[kz - \Omega_j \left(t - \frac{z}{v_{gj}}\right)\right] \quad (6)$$

式中, k 是波数, Ω_j 是微扰的频率。

将(6)式代入(5)式可得到关于 U_j, V_j 的齐次方程组, 即:

$$f_1 f_2]^{1/2} - (f_1 + f_2)\}^{1/2} \quad (15)$$

由(10)~(13)式及(15)式可知, XPM 产生的调制不稳定性增益谱与二阶色散参量、非线性系数、损耗系数、光纤色散纵向变化参量、入纤功率、传输距离及微扰频率有关。

2 调制不稳定性分析

(15)式为一普遍结果, 既可用于一束光入纤的调制不稳定性分析, 也可用于两束光入纤的 XPM 调制不稳定性分析; 既可用于普通光纤, 也可用于色散缓变光纤。

一束光入射时, 在正常色散区, $\beta_{2j}(0) > 0$, 因而 $f_j > 0$, k 为实数, 故调制不稳定性不能发生在正常色散区, 仅能在反常色散区发生。两束光入射时情形则不同, (13)式和(15)式表明, 两束光波的微扰共同决定了增益, 且两束光对增益有相同的贡献。由(13)式可知, 对于一定范围的 Ω_1, Ω_2 , 即使 $\beta_{21}(0), \beta_{22}(0)$ 均大于 0, k 亦可能是复数, 即 XPM 可以在正常色散区发生, 同理也可在反常色散区发生。

为了更清晰地表明增益与各参量的关系, 假设 $\beta_{21}(0) = \beta_{22}(0) = \pm 20 \text{ps}^2/\text{s}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2 \text{dB}/\text{km}$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 2 \text{W}^{-1}/\text{km}$, 图 1a, 图 1b 分别给出了普通光纤与色散缓变光纤中反常色散区与正常色散区 XPM 的增益随 Ω_1 的变化关系, 其中 $\Omega_2 = 0.9 \text{THz}$,

$P_1 = P_2 = 2W, z = 5km$ 。曲线 1 与 $\mu = 0$ 对应, 是普通光纤 XPM 的增益随 Ω_1 的变化关系。由图知, 普通光纤中反常色散区 XPM 调制不稳定性增益谱宽大于正常色散区, 且增益峰值高。曲线 2, 3, 4, 5 分别与 $\mu = 0.1, \mu = 0.2, \mu = 0.3$ 及 $\mu = 0.4$ 对应, 是色散缓变光纤 XPM 的增益随 Ω_1 的变化关系。由两图可知, 无论在反常色散区还是在正常色散区, 色散缓变光纤的 XPM 增益谱宽比普通光纤 XPM 增益谱宽大。色散缓变光纤的反常色散区 XPM 增益谱宽比正常色散区宽, 且峰值高。这表明色散缓变光纤是 XPM 调制不稳定性较好的色散介质。

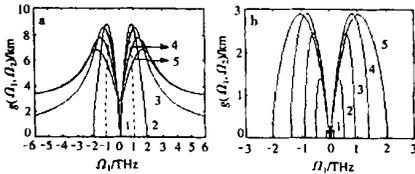


Fig. 1 a- gain spectrum of modulation instability in the regime of anomalous dispersion as a function of Ω_1 and axillary varying dispersion parameter, $\beta_{21}(0) = \beta_{22}(0) = -20ps^2/km, \gamma_1 = \gamma_2 = 2W^{-1}/km, \alpha = 0.2dB/km, P_1 = P_2 = 2W, z = 5km, \Omega_2 = 0.9THz, 1- \mu = 0dB/km, 2- \mu = 0.2dB/km, 3- \mu = 0.2dB/km, 4- \mu = 0.3dB/km, 5- \mu = 0.4dB/km$
 b- gain spectrum of modulation instability in the regime of normal dispersion as a function of Ω_1 and axillary varying dispersion parameter, $\beta_{21}(0) = \beta_{22}(0) = 20ps^2/km$, the other parameters are as same as Fig. 1a

图 2a、图 2b 分别给出了色散缓变光纤中当 $\mu = 0.3dB/km$ 时反常色散区与正常色散区增益谱随 Ω_1, Ω_2 的变化曲线, 其它参数同图 1。由图 2a 知在反常色散区增益峰随 Ω_2 的增大而增大; 由图 2b 知, 正常色散区在 $\Omega_2 = 0.9THz$ 时有极大值。对比两图可知, Ω_2 相同时, 反常色散区增益谱宽比正常色散区宽, 且峰值增益大。

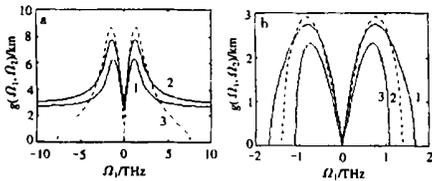


Fig. 2 a- gain spectrum of modulation instability in the regime of anomalous dispersion as a function of Ω_1 and Ω_2
 b- gain spectrum of modulation instability in the regime of normal dispersion as a function of Ω_1 and Ω_2
 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3dB/km, 1- \Omega_2 = 0.6THz, 2- \Omega_2 = 0.9THz, 3- \Omega_2 = 1.2THz$, the other parameters are as same as Fig. 1

图 3 为增益随 Ω_1 及入纤功率的变化关系, 其中 $\Omega_2 = 0.9THz, \mu = 0.3dB/km, P_1 = P_2$, 其它参数

同图 1。由图可知, 无论在反常色散区还是正常色散区, 随着入纤功率的增大, 增益峰增高, 谱宽增大。入纤功率相同时, 反常色散区增益谱宽大于正常色散区, 增益峰也大。

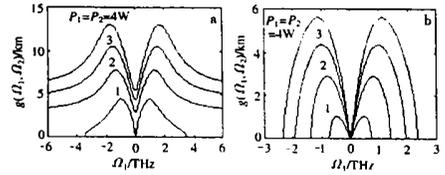


Fig. 3 a- gain spectrum of modulation instability in the regime of anomalous dispersion as a function of Ω_1 and incident power
 b- gain spectrum of modulation instability in the regime of normal dispersion as a function of Ω_1 and incident power
 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3dB/km, \Omega_2 = 0.9THz$, the other parameters are as same as Fig. 1

3 结论

从非线性薛定谔方程出发, 研究了色散缓变光纤中 XPM 的不稳定性, 得到了增益谱的一般关系式。结果表明, XPM 产生的调制不稳定性增益谱与二阶色散参量、非线性系数、损耗系数、光纤色散纵向变化参量、入纤功率、传输距离及微扰频率有关。XPM 产生的调制不稳定性既可以在光纤反常色散区产生, 也可在正常色散区产生。色散缓变光纤中 XPM 不稳定增益谱宽比普通光纤中 XPM 不稳定增益谱宽宽, 增益峰值高。反常色散区的增益谱宽比正常色散区宽, 且增益峰高。色散缓变光纤是产生 XPM 调制不稳定性效应较好的色散介质, 尤其是在其反常色散区, 预计在超短光脉冲产生方面具有一定的前景。

参考文献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics. Boston, San Digo, New York: Academic Press, 1989.
- [2] Mamyshev P V, Stanislav V, Dianov E M. IEEE J Q E, 1991, QE27(10): 2347~ 2355.
- [3] Tai K, Hasegawa A, Tomita A. Phys Rev Lett, 1986, 56(2): 135 ~ 138.
- [4] Potasek M J. Opt Lett, 1987, 12(11): 921~ 923.
- [5] Dianov E M, Mamyshev P V, Prokhorov A M *et al.* Opt Lett, 1989, 14(18): 1008~ 1010.
- [6] Agrawal G P. Opt Lett, 1990, 15(4): 224~ 226.
- [7] Kodama Y, Romagnoli M, Wabnitz S *et al.* Opt Lett, 1994, 19(3): 165~ 167.
- [8] 张书敏, 徐文成, 罗爱平 *et al.* 光学学报, 2001, 21(6): 656~ 659.
- [9] Agrawal G P. Phys Rev Lett, 1987, 59(8): 880~ 883.