

文章编号: 0258-7025(2009)02-0391-07

高阶色散和饱和非线性下的交叉相位调制不稳定性

钟先琼 向安平

(成都信息工程学院光电技术系, 四川 成都 610225)

摘要 从光纤中包含饱和非线性和高阶色散的耦合非线性薛定谔方程组出发, 采用线性稳定性分析法, 研究了高阶色散和饱和非线性对双光束交叉相位调制不稳定性的综合影响。研究表明, 当四阶和二阶色散系数同号时, 调制不稳定性增益谱可能出现一个新的远离零点的第二谱区, 且该谱区由两个始终相连的小谱区组成; 第一谱区的谱峰与第二谱区中靠近零点的小谱区的谱峰相当; 在其他色散区, 增益谱只存在一个谱区。而饱和非线性的存在则使每个谱区的谱宽、峰值增益大小随入纤功率的增大呈现出先增大后减小的特点, 即对每个谱区而言, 将出现两个不同的输入功率对应同一个不稳定增益峰值和谱宽的情形。

关键词 非线性光学; 交叉相位调制不稳定性; 饱和非线性; 高阶色散

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0391

Modulation Instability Induced by Cross-Phase Modulation in Case of High-Order Dispersion and Saturable Nonlinearity

Zhong Xianqiong Xiang Anping

(Department of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology,
Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract The combined effects of high-order dispersion and saturable nonlinearity on modulation instability induced by cross-phase modulation of two optical waves are investigated based on the coupled nonlinear Schrödinger equations including saturable nonlinearity and high-order dispersion in optical fibers. And the method of linear-stability analysis is adopted. The results show that, when the fourth-order dispersion has the same sign as that of the second-order one, a new gain spectral regime called the second gain spectrum which is far away from the zero point may appear. It actually consists of two small spectra which are always linked together. The first gain spectrum has nearly the same peak value as that of the small spectrum close to the zero point of the second gain spectrum. In the other dispersion regimes, the gain spectra consist of only one regime. The existence of the saturable nonlinearity will make the spectral width and the peak gain of every spectral regime increase with the input power before decreasing. That is to say, for every spectral regime, this may lead to a unique value of peak gain and spectral width for two different input powers.

Key words nonlinear optics; cross-phase modulation instability; saturable nonlinearity; high-order dispersion

1 引言

作为重要的非线性效应, 光纤中的自相位和交叉相位调制可用于频谱展宽及波长转换^[1]等, 同时, 它又会导致光信号的相位抖动^[2]。另一方面, 该非线性效应和色散相互作用后在一定条件下可导致对

稳态的调制, 使弱的光扰动随光纤指数式增长, 从而产生所谓的调制不稳定性^[3~23]。诸多研究均表明, 调制不稳定性在产生超连续谱^[3]、高重复频率超短光脉冲串^[4]和制作光开关^[5]等领域有重要应用。但却有害于波分复用或稠密波分复用光通信系统^[6]。

收稿日期: 2008-03-12; 收到修改稿日期: 2008-05-26

基金项目: 四川省教育厅自然科学重点项目(2006A124)、四川省科技厅应用基础项目(05JY029-084)和成都信息工程学院科技发展基金(KYTZ20060604)资助项目。

作者简介: 钟先琼(1969-), 女, 四川人, 教授, 博士, 主要研究方向为激光与光通信及非线性光学。

E-mail: zxqlxh@yeah.net

因此,该现象一直受到人们的密切关注。

各种高低阶色散和高阶非线性条件下的单光束自相位调制不稳定性已得到人们的广泛研究^[7~13]。而对于双光束交叉相位调制不稳定性研究则多数还限于低阶色散和低阶非线性的情形^[14,15]。但当光脉冲的脉宽较窄或光载频处于光纤零色散频率附近时,高阶色散的影响不可忽略^[15];当入射光强较强,或在有相对较高非线性光学系数的材料中,即使是中等光强的光入射,也需考虑高阶非线性折射率或饱和和非线性的影响^[16]。因此,近年来,人们开始关注高阶色散^[17,18]、五阶非线性^[18~20]、饱和和非线性下^[21,22]的交叉相位调制不稳定性特性。

本文从光纤中包含饱和和非线性和高阶色散的耦合非线性薛定谔方程组出发,采用线性稳定性分析法,研究了高阶色散和饱和非线性效应对交叉相位调制不稳定性条件和增益谱特性的综合影响。

2 理论分析

在忽略损耗的情况下,同偏振、不同波长的两光波在包含二至四阶色散以及饱和和非线性的光纤中传输时,需满足扩展的耦合非线性薛定谔方程^[17, 21]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{1}{V_{gj}} \frac{\partial A_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial t^2} - \\ & \frac{\beta_{3j}}{6} \frac{\partial^3 A_j}{\partial t^3} + \frac{i}{24} \beta_{4j} \frac{\partial^4 A_j}{\partial t^4} = \\ & i\gamma_j \frac{|A_j|^2 + 2|A_{3-j}|^2}{1 + \Gamma(|A_j|^2 + 2|A_{3-j}|^2)} A_j, \quad (1) \end{aligned}$$

式中 A_j ($j = 1, 2$) 表示两光波的慢变振幅, V_{gj} 为两光波的群速度, β_{mj} ($m = 2, 3, 4$) 分别为两光波的 m 阶群速度色散系数, γ_j 为两光波的三阶非线性系数, t 和 z 分别为时间和传输距离, $\Gamma = 1/P_s$ 为饱和参量, P_s 为光纤的饱和功率。令(1)式中的时间微分项为零,可得到稳态解为

$$\bar{A}_j = \sqrt{P_j} \exp(i\varphi_j), \quad (2)$$

式中 P_j 表示两光波的入射光功率,将(2)式代入稳态的方程组可得非线性相移 φ_j 为

$$\varphi_j = \gamma_j \frac{(P_j + 2P_{3-j})z}{[1 + \Gamma(P_j + 2P_{3-j})]}. \quad (3)$$

在(2)式中加入微扰 $a_j(z, t)$ 项 ($|a(z, t)|^2 \ll P_j$) 以检验解的稳定性

$$A_j = (\sqrt{P_j} + a_j) \exp(i\varphi_j). \quad (4)$$

将(3),(4)代入(1)式并线性化后可得到微扰 a_j 满足的方程组

$$\begin{aligned} & \frac{\partial a_j}{\partial z} + \frac{1}{V_{gj}} \frac{\partial a_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 a_j}{\partial t^2} - \\ & \frac{\beta_{3j}}{6} \frac{\partial^3 a_j}{\partial t^3} + \frac{i}{24} \beta_{4j} \frac{\partial^4 a_j}{\partial t^4} = \\ & i \frac{\gamma_j P_j}{[1 + \Gamma(P_j + 2P_{3-j})]^2} (a_j + a_j^*) + \\ & i \frac{2\gamma_j \sqrt{P_j P_{3-j}}}{[1 + \Gamma(P_j + 2P_{3-j})]^2} (a_{3-j} + a_{3-j}^*). \quad (5) \end{aligned}$$

假设(5)式的通解形式为

$$a_j(z, t) = U_j \cos(kz - \Omega t) + iV_j \sin(kz - \Omega t), \quad (6)$$

式中 Ω 是扰动角频率,将(6)式代入(5)式并分离实、虚部可得到 U_1, U_2, V_1, V_2 的四个齐次方程,该方程组有非平凡解的条件是系数行列式为零,则波数 k 满足的色散关系为

$$\begin{aligned} & \left[\left(k - \frac{\Omega}{V_{g1}} - \frac{1}{6} \beta_{31} \Omega^3 \right)^2 - f_1 \right] \times \\ & \left[\left(k - \frac{\Omega}{V_{g2}} - \frac{1}{6} \beta_{32} \Omega^3 \right)^2 - f_2 \right] = C_{\text{XPM}}, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad f_j &= \left(\frac{1}{2} \beta_{2j} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{4j} \Omega^4 \right) \times \\ & \left[\frac{1}{2} \beta_{2j} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{4j} \Omega^4 + 2\gamma_j P_j \right], \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{XPM}} &= 16\gamma_1' \gamma_2' P_1 P_2 \left(\frac{1}{2} \beta_{21} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{41} \Omega^4 \right) \times \\ & \left(\frac{1}{2} \beta_{22} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{42} \Omega^4 \right), \quad (9) \end{aligned}$$

$$\gamma_j' = \frac{\gamma_j}{[1 + \Gamma(P_j + 2P_{3-j})]^2}. \quad (10)$$

当两光波波长差异小时,有近似关系^[17]: $V_{g1} \approx V_{g2} = V_g, \beta_{21} \approx \beta_{22} = \beta_2, \beta_{31} \approx \beta_{32} = \beta_3, \beta_{41} \approx \beta_{42} = \beta_4, \gamma_1 \approx \gamma_2 = \gamma$ 。此时,(7)式的四个根为

$$\begin{aligned} k &= \frac{\Omega}{V_g} + \frac{1}{6} \beta_3 \Omega^3 \pm \\ & \left\{ \frac{f_1 + f_2}{2} \pm \left[\left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right)^2 + (C_{\text{XPM}} - f_1 f_2) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}. \quad (11) \end{aligned}$$

式中 C_{XPM} 为交叉相位调制耦合参量。若 $P_s \rightarrow \infty$, 则 $\Gamma \rightarrow 0$, 即不考虑非线性饱和时,则(1)~(11)式回到文献[17]的情形。同样,若不计高阶色散,即 $\beta_{31} = \beta_{32} = 0, \beta_{41} = \beta_{42} = 0$ 时,(1)~(11)式又将与文献[21]的一致。

由(11)式可知,对满足不等式 $f_1 f_2 < C_{\text{XPM}}$ 的那些扰动频率, k 成为复数,调制不稳定性产生。扰动的功率增益系数为

$$g(\Omega) = 2\text{Im}(k) = \sqrt{2} \{ [(f_1 + f_2)^2 +$$

$$4(C_{\text{XPM}} - f_1 f_2)^{\frac{1}{2}} - (f_1 + f_2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

由(8)~(12)式可见,三阶色散同样对交叉相位调制不稳定性的条件和增益谱无影响,但要影响扰动波数 k 的实部,只有二和四阶色散系数才对交叉相位调制不稳定性的条件和增益谱有贡献,这与自相位调制不稳定性情形类似。还可看出,无论低阶还是高阶色散,也无论有无饱和非线性,交叉相位调制的不稳定性条件 $f_1 f_2 < C_{\text{XPM}}$ 和增益系数公式(12)

在形式上都一致,但由于式中参量 f_1, f_2 和 C_{XPM} 的定义不同,即决定了各自的不稳定性条件及增益谱特点将不同。

3 计算与讨论

交叉相位调制不稳定性既可发生在负色散区,也可发生在正色散区。计算中设 $P_2 = P_1$ 。

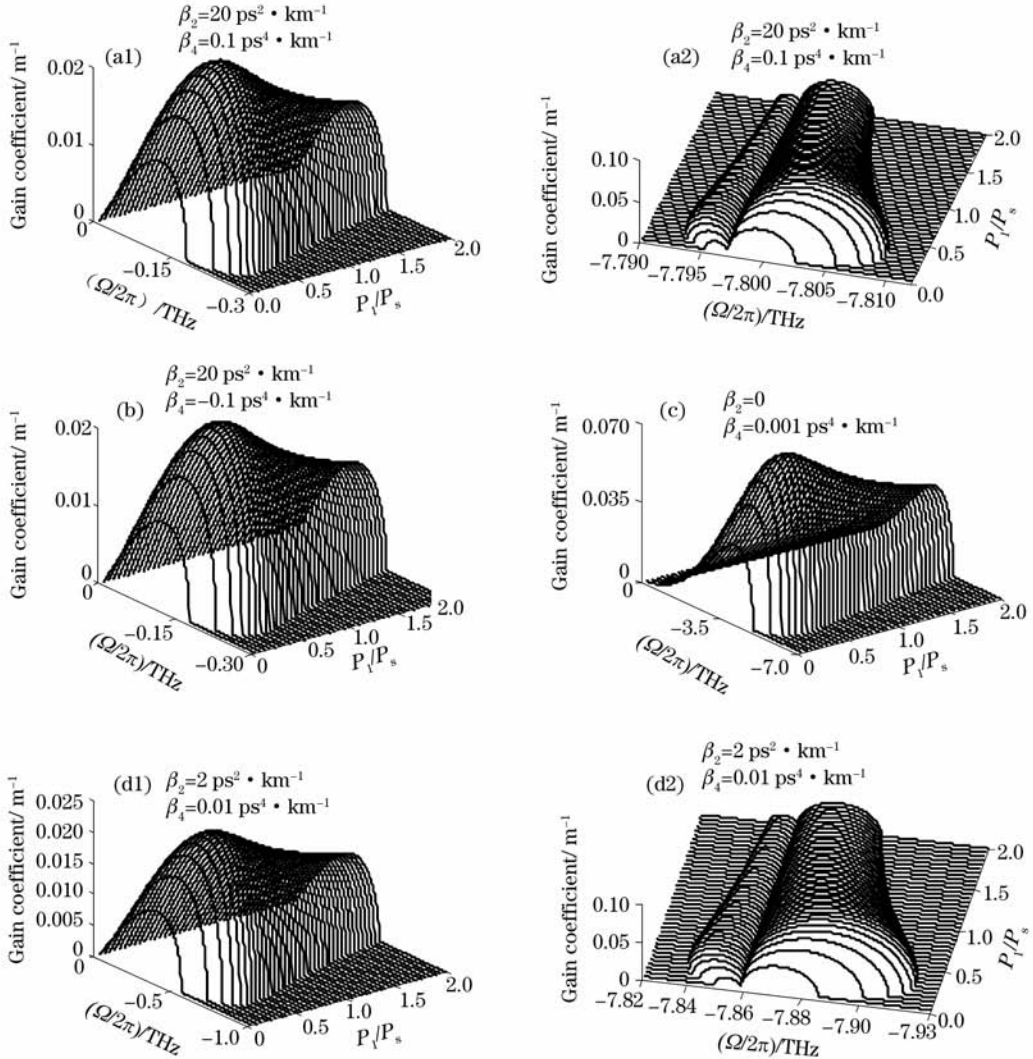


图1 正色散区的不稳定性增益谱随两光波输入功率的变化

Fig. 1 Variation of gain spectra of modulation instability with the input powers of the two optical waves in the normal dispersion region

3.1 在 $\beta_2 > 0$ 的正色散区

图1给出了几种正色散情况下的增益谱随功率比 P_1/P_s 的变化规律。(a): $\beta_2 = 20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ ^[13]、 $\beta_4 = 0.1 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ ^[13];(b): $\beta_2 = 20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $\beta_4 = -0.1 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ ^[13];(c): $\beta_2 = 0$ 、 $\beta_4 = 0.001 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ ^[13];(d): $\beta_2 = 2 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 、

$\beta_4 = 0.01 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ 。公共参数为: $\gamma = 15 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, $P_s = 10 \text{ W}$ 。

由图1可见,在两光波的功率给定时,当四阶和二阶色散系数同号时,如图1(a),调制不稳定性增益谱可能出现一个新的远离零点的第二谱区,且该谱区由两个始终相连的高矮和宽窄不同的小谱区组

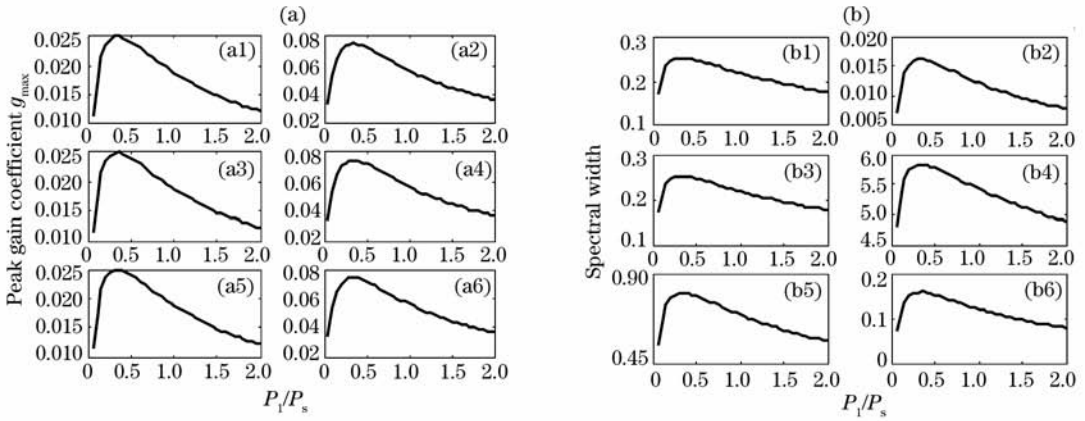


图 2 正色散区的不稳定性增益谱的谱峰峰值(a)和谱宽(b)随两光波输入功率的变化
 Fig. 2 Variation of the peak gain coefficient (a) and spectral width (b) of gain spectra of modulation instability with the input powers of the two optical waves in the normal dispersion region

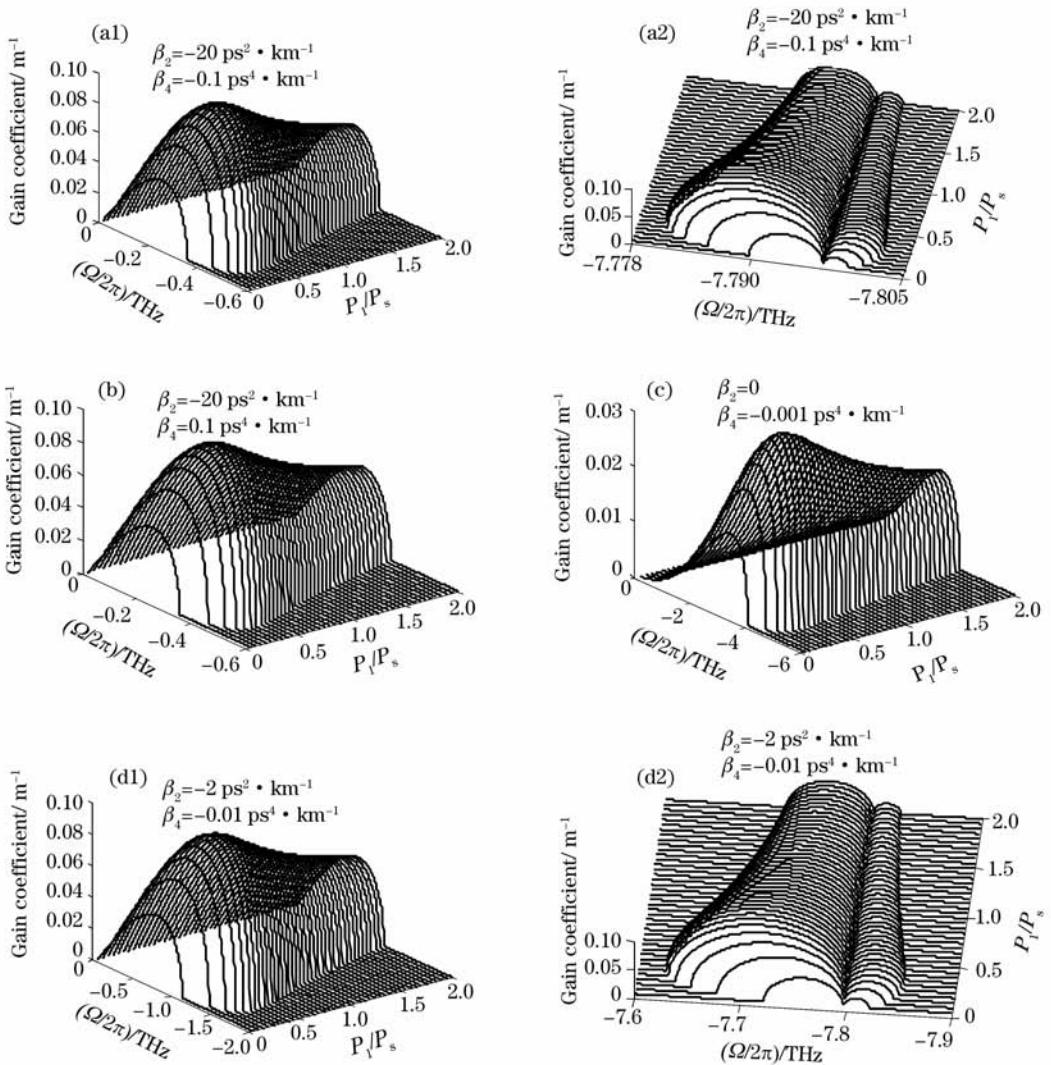


图 3 负色散区的不稳定性增益谱随两光波输入功率的变化
 Fig. 3 Variation of gain spectra of modulation instability with the input powers of the two optical waves in the anomalous dispersion region

成;第一谱区的谱峰与第二谱区中靠近零点的小谱区的谱峰相当。因此,为了更清楚地观察两谱区的情况,将图 1(a)分成图 1(a1)和(a2)两个分图。在其他色散区,如图 1(b)和图 1(c),增益谱只存在一个谱区。这些规律与无饱和非线性但有四阶色散时的情形是一致的^[17]。但有饱和非线性时,可以看到增益谱随两光波功率的变化呈现新的特点。如图 2,给出了图 1 中各相应增益谱的谱峰峰值图 2(a)和谱宽图 2(b)随功率比 P_1/P_s 的变化规律。图 2 中(a1)~(a6)及(b1)~(b6)的参数分别依次与图 1 中的各分图对应。由图 2 可更清楚地看到,每个谱区的谱宽、峰值增益大小随入纤功率的增大都呈现出先增大后减小的特点,即对每个谱区而言,将出现两个不同的输入功率对应同一个不稳定增益峰值和谱宽的情形,这一特点对于双稳态光孤子的研究具有重要意义。而在无饱和非线性时,随两光波功率的增大,谱峰和谱宽都将是单调递增的。从图 2 还可看到, $\beta_2 > 0, \beta_4 > 0$ 时,第一谱区的谱宽和谱峰峰值与 $\beta_2 > 0, \beta_4 < 0$ 的几无差别; $\beta_2 > 0, \beta_4 > 0$

时,第一谱区的谱宽比第二谱区的大,但谱峰峰值则不及第一谱区的;比较图 1(a)和图 1(d)可见,减小色散值对谱峰的影响小,而对谱宽的增大明显,从图 2 可以更清楚地看出这一点; $\beta_2 = 0, \beta_4 > 0$ 时具有较大的谱峰峰值和谱宽,且研究发现,当增大 β_4 时,谱宽增大明显,而谱峰峰值变化很小。

3.2 在 $\beta_2 < 0$ 的负色散区

图 3 给出了几种负色散情况下的增益谱随功率比 P_1/P_s 的变化规律。(a): $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ ^[13]、 $\beta_4 = -0.1 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$; (b): $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $\beta_4 = 0.1 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$; (c): $\beta_2 = 0$ 、 $\beta_4 = -0.001 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ ^[13]; (d): $\beta_2 = -2 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $\beta_4 = -0.01 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ 。公共参数为: $\gamma = 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, $P_s = 20 \text{ W}$ 。图 4 则给出了图 3 中各相应增益谱的谱峰峰值图 4(a)和谱宽图 4(b)随功率比 P_1/P_s 的变化规律。图 4 中(a1)~(a6)及(b1)~(b6)的参数也分别依次与图 3 中的各分图对应。

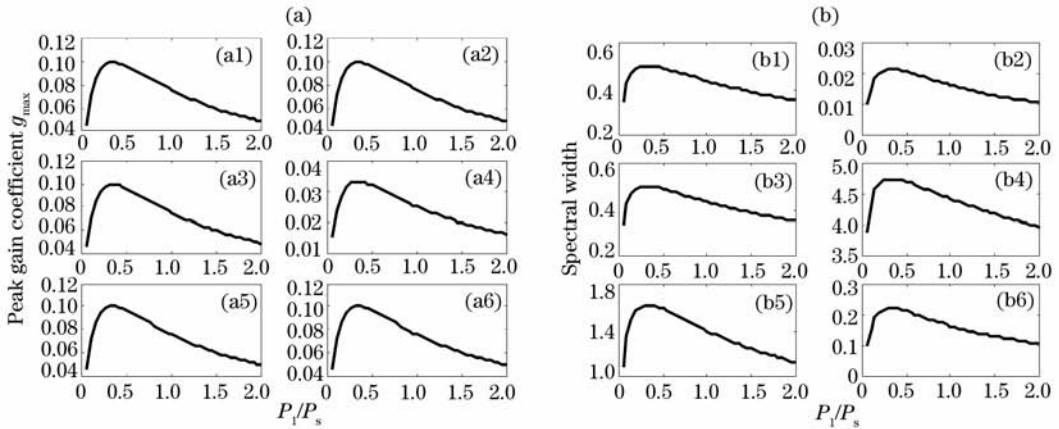


图 4 负色散区的不稳定性增益谱的谱峰峰值(a)和谱宽(b)随两光波输入功率的变化

Fig. 4 Variation of the peak gain coefficient (a) and spectral width (b) of gain spectra of modulation instability with the input powers of the two optical waves in the anomalous dispersion region

由图 3 和图 4 可见,负色散区增益谱随两光波输入功率的变化规律与正色散区的完全类似,这里不再赘述。不同的是, $\beta_2 < 0, \beta_4 < 0$ 时的两个谱区的谱峰峰值与 $\beta_2 < 0, \beta_4 > 0$ 的几无差别。此外,在 $\beta_2 > 0, \beta_4 > 0$ 时,第二谱区中是远离零点的小谱区具有更宽的谱宽和更高的谱峰,而在 $\beta_2 < 0, \beta_4 < 0$ 时,第二谱区中则是靠近零点的小谱区具有更宽的谱宽和更高的谱峰。研究还表明,若 $\beta_2 = 0$,则在其他参数相同时, $\beta_4 > 0$ 时的谱宽将比 $\beta_4 < 0$ 的更宽。

4 分析

仍设 $P_2 = P_1$ 。考虑到(8)~(10)式,则可导出稳定性条件转换成

$$(\Omega^2 - \Omega_1^2)(\Omega^2 - \Omega_2^2)(\Omega^2 - \Omega_3^2)(\Omega^2 - \Omega_4^2) < 0, \quad (13)$$

其中

$$\Omega_{1,2,3,4}^2 = \frac{\left[6\beta_2 \pm 2 \sqrt{9\beta_2^2 + \frac{12\beta_1 \gamma P_1}{(1+3\Gamma P_1)^2} \pm \frac{24\beta_1 \gamma P_1}{(1+3\Gamma P_1)^2}} \right]}{\beta_4} \quad (14)$$

式中前、后都取“+”时为 Ω_1^2 , 前“+”后“-”时为 Ω_2^2 , 前“-”后“+”时为 Ω_3^2 , 前、后都取“-”时为 Ω_4^2 。为讨论方便, 定义参数

$$A = 9\beta_2^2 - \{12\beta_4\gamma P_1 / (1 + 3\Gamma P_1)^2\}, \quad (15)$$

$$B = \beta_2^2 - \{4|\beta_4| \gamma P_1 / (1 + 3\Gamma P_1)^2\}, \quad (16)$$

由(13), (14)式分析可知, 当 $\beta_2 > 0, \beta_4 > 0$ 时, 必有 $\Omega_1^2 > 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$ 成立, 则谱区数取决于参数 A , 若 $A > 0$, 则必有 $\Omega_2^2 > 0, \Omega_4^2 > 0$ 以及 $\Omega_1^2 < \Omega_2^2 < \Omega_3^2$ 成立, 由(13)式, 此时调制不稳定将产生 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 和 $|\Omega_2| < |\Omega| < |\Omega_1|$ 两个谱区, 如图 1 中(a1)和(a2)及(d1)和(d2)所示; 若 $A \leq 0$, 必有 $(\Omega^2 - \Omega_2^2)(\Omega^2 - \Omega_4^2) > 0$ 成立, 此时的调制不稳定将只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 一个谱区, 如在 $\beta_2 = 20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$, $\beta_4 = 0.01 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ 时即属于此情况, 不再图示。同理, 当 $\beta_2 < 0, \beta_4 < 0$ 时, 必有 $\Omega_4^2 > 0$ 和 $\Omega_2^2 < 0$, 则谱区数取决于参数 B , 若 $B > 0$, 则必有 $\Omega_1^2 > 0, \Omega_3^2 > 0$ 以及 $\Omega_1^2 < \Omega_3^2 < \Omega_4^2$ 成立, 此时, 调制不稳定将形成 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 和 $|\Omega_3| < |\Omega| < |\Omega_4|$ 两个谱区, 如图 3 中(a1)和(a2)及(d1)和(d2)所示; 若 $B \leq 0$, 必有 $(\Omega^2 - \Omega_1^2)(\Omega^2 - \Omega_3^2) > 0$ 成立, 此时的调制不稳定将只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 一个谱区, 如在 $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$, $\beta_4 = -0.01 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ 时即属于此情况, 不再图示。当 $\beta_2 > 0, \beta_4 < 0$ 时, 调制不稳定只能形成如图 1(b)所示的一个谱区, 因为此时 $\Omega_1^2 > 0$ 和 $\Omega_2^2 < 0$ 始终成立, 若参数 $B > 0$, 则必有 $\Omega_1^2 < 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$ 成立, 故不稳定形成 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 一个谱区; 若 $B \leq 0$, 必有 $(\Omega^2 - \Omega_1^2)(\Omega^2 - \Omega_3^2) > 0$ 成立, 也仍然只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 一个谱区。当 $\beta_2 < 0, \beta_4 > 0$ 时, 调制不稳定也只能形成如图 3(b)所示的一个谱区, 因为此时 $\Omega_1^2 > 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$ 始终成立, 若参数 $A > 0$, 则必有 $\Omega_2^2 < 0$ 和 $\Omega_4^2 < 0$ 成立, 故不稳定只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 一个谱区; 若 $A \leq 0$, 必有 $(\Omega^2 - \Omega_2^2)(\Omega^2 - \Omega_4^2) > 0$ 成立, 也仍然只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 一个谱区。当 $\beta_2 = 0$ 时, 可以导出不稳定性条件 $f_1 f_2 < C_{\text{XPM}}$ 变为: $\Omega^2 < \Omega_c^2 = \sqrt{2 + \text{sgn}(\beta_4)} \Omega_{c0}^2$, 其中, $\Omega_{c0}^2 = 4\sqrt{3\gamma P_1 / |\beta_4|} / (1 + 3\Gamma P_1)$ 。故 $\beta_2 = 0, \beta_4 > 0$ 及 $\beta_2 = 0, \beta_4 < 0$ 时不稳定性也都只有一个谱区, 分别是 $0 < |\Omega| < |\sqrt{3}\Omega_{c0}|$ 和 $0 < |\Omega| < |\Omega_{c0}|$, 可见, 在其他参数相同时, $\beta_2 = 0, \beta_4 > 0$ 时的谱宽将大于 $\beta_2 = 0, \beta_4 < 0$ 时的。实际上, 若用(10)式定义的 γ' 代替 γ , 则这里对不稳定性条件的讨论与只有高阶色散下的情形是统一的。对增益谱谱峰而言, 则难

以像不稳定性条件一样获得这样直观的解析分析。与 $\Gamma = 0$ 的无饱和和非线性的情形相比, 有饱和和非线性时不稳定性增益谱的最大特征是每个谱区的谱宽和谱峰峰值随两光波输入功率的增大都不是单调增加, 而是先增加后减小。

5 结 论

对高阶色散和饱和非线性光纤中的交叉相位调制不稳定性随两光波输入功率的变化规律的研究表明, 此时的不稳定性特点是高阶色散和饱和非线性两种效应单独存在时各自特点的综合。即四阶色散的存在可能使不稳定性增益谱出现一个新的远离零点的第二谱区。而饱和和非线性的存在则使每个谱区的谱宽、峰值增益大小随入纤功率的增大呈现出先增大后减小的特点, 即对每个谱区而言, 将出现两个不同的输入功率对应同一个不稳定增益峰值和谱宽的情形。

参 考 文 献

- 1 Wang Zinan, Xu Yongzhao, Zhang Xia *et al.*. Wavelength conversion based on cross-phase modulation in microstructure fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 414~417
王子南, 徐永钊, 张霞等. 基于微结构光纤中交叉相位调制效应的波长转换[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 414~417
- 2 Xu Ming, Ji Jianhua. Phase jitter of multi-perturbations in differential phase-shift keying dispersion managed soliton system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 781~786
徐铭, 吉建华. 差分相移键控色散管理孤子多扰动系统的相位抖动[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 781~786
- 3 A. Demircan, U. Bandelow. Supercontinuum generation by the modulation instability [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**(1-6): 181~185
- 4 T. Sylvestre, S. Coen, P. Emplit *et al.*. Self-induced modulation instability laser revisited: normal dispersion and dark-pulse train generation [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7): 482~484
- 5 N. Da Dalt, C. De Angelis, G. F. Nalesso *et al.*. Dynamics of induced modulational instability in waveguides with saturable nonlinearity [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **121**: 69~72
- 6 D. F. Grosz, C. Mazzali, S. Celaschi *et al.*. Modulation instability induced resonant four-wave mixing in WDM systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3): 379~381
- 7 Xu Wencheng, Luo Aiping, Guo Qi *et al.*. Modulation instability in decreasing dispersion fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1435~1439
徐文成, 罗爱平, 郭旗等. 色散缓变光纤中的调制不稳定性分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1435~1439
- 8 S. Pitois, G. Millot. Experimental observation of a new modulation instability spectral window induced by fourth-order dispersion in a normal dispersive single-mode optical fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**(1-6): 415~422
- 9 Liu Xiumin, Zhang Xiaoguang, Lin Ning *et al.*. Modulation instability in non-Kerr-like optical fibers near the zero dispersion point [J]. *Chinese J. Lasers B*, 2000, **9**(1): 79~84
- 10 Zhang Shumin, Xu Wencheng, Luo Aiping *et al.*. Modulation

- instability of femtosecond optical pulses in decreasing dispersion fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 656~659
- 张书敏,徐文成,罗爱平等. 色散缓变光纤中飞秒光脉冲的调制不稳定性研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 656~659
- 11 Ren Zhijun, Wang Jing, Yang Ailing *et al.*. Effect of quintic nonlinearity on modulation instability in the anomalous-dispersion regime of fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 595~598
- 任志君,王晶,杨爱玲等. 五次非线性对光纤反常色散区调制不稳定性的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 595~598
- 12 Xiong Jie, Luo Bin, Pan Wei *et al.*. Coupled-mode analysis of modulation instability in frequency-mixing progress with fiber loss [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1347~1352
- 熊杰,罗斌,潘炜等. 损耗作用下混频时调制不稳定性耦合模分析法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1347~1352
- 13 W. P. Hong. Modulation instability of optical waves in the high dispersive cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **213**(1-3): 173~182
- 14 G. P. Agrawal, P. L. Baldeck, R. R. Alfano. Modulation instability induced by cross-phase modulation in optical fibers [J]. *Phys. Rev. A*, 1989, **39**(7): 3406~3413
- 15 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenxia transl. . Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002 49~51, 165~183
- G. P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]贾东方,余震虹译. 北京:电子工业出版社, 2002, 49~51, 165~183
- 16 M. L. Lyra, A. S. Gouveia-Neto. Saturation effects on modulation instability in non-Kerr-like monomode optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **108**: 117~120
- 17 Ren Zhijun, Wang Hui, Jin Hongzhen *et al.*. Cross-phase modulation instability with high-order dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 165~168
- 任志君,王辉,金洪震等. 具有高阶色散项的交叉相位调制不稳定性分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 165~168
- 18 Zhong Xianqiong, Xiang Anping, Cai Qing *et al.*. Modulation instability induced by cross-phase modulation in case of high-order dispersion and quintic nonlinearity [J], *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1200~1205
- 钟先琼,向安平,蔡青等. 高阶色散和五阶非线性下的交叉相位调制不稳定性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1200~1205
- 19 Zhong Xianqiong, Chen Jianguo, Li Dayi. Modulation instability induced by cross-phase modulation in fibers with cubic-quintic nonlinearity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1035~1039
- 钟先琼,陈建国,李大义. 三、五阶非线性光纤中的交叉相位调制非稳研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1035~1039
- 20 Xianqiong Zhong, Anping Xiang. Effects of group-velocity mismatch and cubic-quintic nonlinearity on cross-phase modulation instability in optical fibers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 534~537
- 21 Zhong Xianqiong, Xiang Anping. Modulation instability induced by cross-phase modulation in the normal dispersion region of fibers with saturable nonlinearity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 335~338
- 钟先琼,向安平. 饱和非线性光纤正色散区的交叉相位调制不稳定性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 335~338
- 22 Xianqiong Zhong, Anping Xiang. Cross-phase modulation induced modulation instability in single-mode optical fibers with saturable nonlinearity [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2007, **13**(3): 271~279
- 23 Cai Wangyang, Wen Shuangchun, Chen Lin. Modulation instability in fiber grating with nonlinearity management [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1387~1391
- 蔡汪洋,文双春,陈林. 非线性管理光纤光栅中的调制不稳定性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1387~1391