

文章编号: 0258-7025(2009)11-2908-06

超常介质中色散磁导率对时空不稳定性的影响

张景贵 文双春 项元江 戴小玉 庄彬先

(湖南大学计算机与通信学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 基于 Drude 模型研究了超常介质中的色散磁导率对时空不稳定性(STD)的影响,得到了具有赝五阶非线性效应和自陡效应情形下时空不稳定性增益谱的一般表达式。结果表明,在负折射区,对于自聚焦介质,赝五阶非线性使调制增长的频谱范围和增益值增大,而对于自散焦介质,作用则相反,这与常规介质中的现象不同;在正折射区,赝五阶非线性会抑制自聚焦介质中的时空不稳定性,与常规介质中的现象相同。此外,超常介质中自陡效应可能为负值,但无论自陡效应是正或负,都能抑制时空不稳定性的产生。

关键词 非线性光学; 时空不稳定性; 超常介质; 赝五阶非线性效应; 自陡

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2908

Influence of Dispersive Magnetic Permeability on Spatiotemporal Instability in Metamaterials

Zhang Jinggui Wen Shuangchun Xiang Yuanjiang Dai Xiaoyu Zhuang Binxian

(Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices, Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract The influence of dispersive magnetic permeability on spatiotemporal instability (STI) in metamaterials is identified based on the Drude model. In the case of co-existence of cubic nonlinearity, pseudo-fifth-order nonlinearity and self-steepening, a generic expression for instability growth rate is derived. It is found that in the negative-index region, the pseudo-fifth-order nonlinearity increases the range of spectrum and the gain value of STI for the case of self-focusing material while it do opposite for the case of self-defocusing material, which are different from the results in ordinary materials, in the negative-index region, the pseudo-fifth-order nonlinearity will suppress the emergence of STI for the case of self-focusing material, which exhibits the same features for the case of ordinary material. In any way the self-steepening in metamaterials always tends to suppresses appearance of STI regardless of its sign.

Key words nonlinear optics; spatiotemporal instability; metamaterials; pseudo-fifth-order nonlinearity; self-steepening

1 引 言

调制不稳定性是与波的非线性传输相关的最重要的问题之一。在非线性光学中,调制不稳定性可分为时间、空间和时空不稳定性 3 种。时间调制不稳定性是由于群速度色散和自相位调制之间相互作用的结果,通常在光纤中出现,它可将一个长脉冲分裂成一串脉宽很短的子脉冲^[1,2]。而空间衍射效应

取代时间不稳定性中的群速度色散时,与自相位调制之间的相互作用则导致空间调制不稳定^[3]。时空不稳定性则是衍射、群速度色散和自相位调制 3 者之间的相互作用导致的^[4,5],这种不稳定性的重要性在于其显示了衍射和群速度色散是如何共同参与时间和空间的耦合的,它将一连续或准连续光束转变成一串超高功率的超短脉冲或光子弹。

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(10674045)资助课题。

作者简介: 张景贵(1977—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲传输方面的研究。E-mail: zjg51@163.com

导师简介: 文双春(1966—),男,教授,博士,主要从事非线性光学、强激光技术等方面的研究。

E-mail: scwen@vip.sina.com(通信联系人)

光波的调制不稳定性已有大量文献报道,但这些研究工作基本上局限于常规介质。文双春等^[6]首次研究了超常介质中的时空不稳定性,发现了一些有趣的反常现象,如时空不稳定性在常规介质中不可能发生的情形也能出现。在此基础上又进一步研究了超常介质中色散磁导率所导致的高阶非线性效应对时空不稳定性的影响。超常介质是人工合成材料,它与常规介质的一个最重要的区别是其介电常数与磁导率都是色散的。当超常介质的介电常数和磁导率都为负时,折射率取负值^[7~10],所以又称为负折射材料。超常介质已经在红外甚至光波段实现。此外,通过将常规的非线性介质嵌入到超常介质还可构造出非线性超常介质^[11]。这为开展超常介质非线性光学的基础理论研究创造了条件,将大大拓展传统非线性光学的研究领域。近年来,国外报道了许多关于负折射材料中非线性传输的研究^[12~14]。此外与常规介质一样,当超短脉冲在超常介质中传输时,各种高阶效应的作用将突显出来。在超常介质中,色散磁导率所导致的高阶非线性效应主要表现为赝五阶非线性、可正可负的自陡效应、二阶非线性色散效应等^[15~19]。文双春等^[15~17]系统研究了这些高阶非线性效应对时间调制不稳定性与孤子传输的影响,发现有些效应甚至从根本上改变调制不稳定性特征。如即使在正常色散区,由于二阶非线性色散效应的作用,时间调制不稳定性也可能出现。但到目前为止,色散磁导率所引起的高阶非线性效应对时空不稳定性的影响未见报道。本文利用传统的线性稳定性分析方法,结合超常材料的独有特性,着重分析在不同情况下色散磁导率所导致的赝五阶非线性效应和自陡效应对时空不稳定性的影响。

2 理论模型

在具有三阶线性极化的各向同性均匀超常介质中,电场包络 A 的演化满足(3+1)维非线性薛定谔方程^[6,18]

$$\frac{\partial A}{\partial \xi} = \frac{i}{2k_0} \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^{-1} \nabla_{\perp}^2 A - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + i\gamma \left[|A|^2 A - p|A|^4 A + is \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial \tau} \right], \quad (1)$$

式中采用了移动坐标 $\tau = t - z/V$, $\xi = z$, V 为群速度, β_2 为二阶色散系数, ω_0 为脉冲的中心频率, k_0 为波数, γ 为非线性系数, s 为自陡系数, p 为赝五阶非线性系数, $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 为横向拉普拉斯

算符。(1)式形式上与常规介质中脉冲光束的传输方程一致,但是在超常介质中,由于负介电常数和负磁导率导致该方程中的波矢 k_0 可为负;另外,超常介质的介电常数和磁导率都是色散的,从而引起方程中的自陡效应可正可负,甚至很大,这些特性与常规介质有本质区别。

接下来简单介绍超常介质的线性与非线性特性。超常介质的介电常数与磁导率通常可通过 Drude 模型来描述

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\gamma_e)}, \quad (2)$$

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega(\omega + i\gamma_m)}, \quad (3)$$

式中 ω_{pe} 和 ω_{pm} 分别为电和磁等离子体频率, γ_e 和 γ_m 分别为相应的电场和磁场损耗,由于两者非常小,为简化起见,在以后的分析中忽略它们的作用。利用 Drude 模型,很容易得到非线性系数 γ , 群速度色散系数 β_2 , 自陡系数 s , 赝五阶非线性系数 p 的表达式分别为

$$\gamma = \frac{\chi^{(3)}\omega_0}{2cn} \left(1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega_0^2} \right), \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2cn\omega_0} \left(1 + \frac{3\omega_{pe}^2\omega_{pm}^2}{\omega_0^4} \right) - \frac{(1 - \omega_{pe}^2\omega_{pm}^2/\omega_0^4)^2}{cn^3\omega_0}, \quad (5)$$

$$s = 1 + \frac{\omega_{pm}^2\omega_{pe}^2 - \omega_0^4}{n^2\omega_0^4} - \frac{\omega_{pm}^2 + \omega_0^2}{\omega_{pm}^2 - \omega_0^2}, \quad (6)$$

$$p = \frac{\chi^{(3)}}{4n^2} \left(1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega_0^2} \right), \quad (7)$$

式中 c 为真空中的光速, n 为介质的折射率, $\chi^{(3)}$ 为介质的三阶非线性极化率。图 1 为群速度色散 β_2 , 非线性系数 γ , 赝五阶非线性系数 p , 自陡系数 s 在

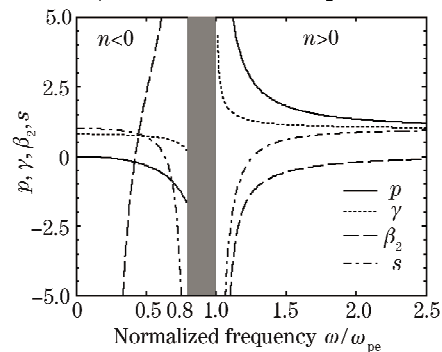


图 1 赝五阶非线性系数 p , 非线性系数 γ , 群速度色散 β_2 , 自陡系数 s 与归一化频率 ω/ω_{pe} 的关系

Fig. 1 Pseudo-fifth-order nonlinear coefficient p , nonlinear coefficient γ , group velocity dispersion β_2 , and self-steepening coefficient s versus normalized frequency ω/ω_{pe}

$\omega_{pm}/\omega_{pe} = 0.8$ 的情况下与归一化频率 ω/ω_{pe} 的关系图, 假设 $\chi^{(3)} > 0$, p, γ 和 β_2 的计算单位分别为 $\chi^{(3)}$, $\chi^{(3)}\omega_0/(2c)$ 和 $1/(c\omega_{pe})$ 。可以看出, 在 $0 < \omega/\omega_{pe} < 0.8$ 范围内超常介质的折射率为负值, 为负折射区; 在 $0.8 < \omega/\omega_{pe} < 1$ 范围内超常介质的折射率为虚数, 为超常介质的吸收区, 电磁波在该区域不能传播; 而在 $\omega/\omega_{pe} > 1$ 范围内超常介质的折射率为正值, 为正折射区。在负折射区域, 群速度色散可正可负, 赝五阶非线性系数恒为负, 自陡系数可正可负; 在正折射区, 赝五阶非线性系数恒为正, 自陡系数可正可负, 而群速度色散始终为负。由(4)式还可发现, 无论光波频率处在正折射区还是负折射区, 由于 n 与 μ_r 具有相同的符号, 所以非线性系数的符号主要由 $\chi^{(3)}$ 决定, 而与折射率符号无关, 这与常规介质

情况是相同的。

为了简化, 并更清楚地体现超常介质的色散磁导率所引起的赝五阶非线性和自陡效应对时空不稳定性的影响, 忽略高阶色散以及时空聚焦效应, 采用传统的线性稳定性分析方法来研究色散磁导率所引起的赝五阶非线性、自陡效应对时空不稳定性的影响。此时方程(1)的稳态解为

$$A(x, y, \xi, \tau) = A_0 \exp(i\gamma A_0^2 \xi - i\gamma A_0^4 \xi), \quad (8)$$

式中 A_0 是稳态解的幅值。为了研究解的稳定性, 微扰该稳态解, 则有

$$A(x, y, \xi, \tau) = A_0 [1 + a(x, y, \xi, \tau)] \exp(i\beta_2 \xi), \quad (9)$$

式中 $a(x, y, \xi, \tau)$ 为小的复调制, 即 $a(x, y, \xi, \tau) \ll 1$, 将(9)式代入方程(1), 并使微扰 a 线性化, 得

$$\frac{\partial a}{\partial \xi} = \frac{i}{2k_0} \nabla_{\perp}^2 a - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial \tau^2} + (ib_1 - ib_2)(a + a^*) - sb_1 \left(2 \frac{\partial a}{\partial \tau} + \frac{\partial a^*}{\partial \tau} \right), \quad (10)$$

式中 $b_1 = \gamma A_0^2$, $b_2 = b_1 p A_0^2$ 。设微扰的通解形式为

$$a = a_1 \cos(q_x x + q_y y - q_z \xi + \tilde{\omega} \tau) + ia_2 \sin(q_x x + q_y y - q_z \xi + \tilde{\omega} \tau), \quad (11)$$

式中 q_x 和 q_y 分别为微扰在 x 和 y 方向调制的空间频率, $\tilde{\omega}$ 为调制的时间频率, q_z 为波矢。将(11)式代入(10)式, 通过简单的数学运算, 得到时空不稳定性调制增益谱的表达式为

$$G = \sqrt{\left(\frac{q^2}{2k_0} - \frac{\beta_2}{2} \tilde{\omega}^2 \right) \left[-\frac{q^2}{2k_0} + \frac{\beta_2}{2} \tilde{\omega}^2 + 2(b_1 - 2b_2) \right] - b_1^2 \tilde{\omega}^2 s^2}, \quad (12)$$

式中 $q^2 = q_x^2 + q_y^2$ 。为了比较和方便起见, 对(12)式中的空间和时间调制频率以及增益分别做归一化

$$k = q / (2 \sqrt{|k_0 b_1|}), \quad (13)$$

$$\sigma = \tilde{\omega} / \tilde{\omega}_c, \quad (14)$$

$$g = G / |b_1|, \quad (15)$$

式中 $\tilde{\omega}_c = 2 \sqrt{|b_1/\beta_2|}$, 得到无量纲的时空不稳定性增益表达式

$$g = \sqrt{4[\operatorname{sgn}(n)k^2 - \operatorname{sgn}(\beta_2)\sigma^2][-\operatorname{sgn}(n)k^2 + \operatorname{sgn}(\beta_2)\sigma^2 + \operatorname{sgn}(\chi^3) - 2\operatorname{sgn}(\chi^3)P] - S^2\sigma^2}, \quad (16)$$

式中 $S = s\tilde{\omega}_c$, $P = pA_0^2$, $\operatorname{sgn}(\beta_2) = \pm 1$ 分别代表正常色散与反常色散, $\operatorname{sgn}(\chi^3) = \pm 1$ 分别代表自聚焦介质与自散焦介质, $\operatorname{sgn}(n) = \pm 1$ 分别代表超常介质中的正折射区与负折射区。

3 分析与讨论

由(16)式发现, 折射率、群速度色散、自陡效应和非线性的符号以及赝五阶非线性的大小共同决定着时空不稳定性产生的范围及大小, 这是一种复杂的函数关系。当不考虑高阶非线性效应时, 超常介质中的时空不稳定性已有了全面的报道^[6], 当不考虑空间衍射效应时, 色散磁率所引起的赝五阶非线性、自陡效应对时间不稳定性的影响也有了系统研究^[16,17]。为了考察赝五阶非线性、自陡效应对时空不

稳定性的影响。通过数值求解方程(16)来定量说明两种非线性效应的作用, 其典型的结论如图 2~4 所示。其中图 2 代表负折射区域自聚焦介质反常群速度色散情形; 图 3 代表负折射区域自散焦介质反常群速度色散情形; 而图 4 表示负折射区域自散焦介质正常群速度色散情形和正折射区域自聚焦介质反常群速度色散情形。每幅图的(a), (b), (c)部分分别代表既没有考虑赝五阶非线性也没有考虑自陡效应 ($P = 0, S = 0$), 只考虑赝五阶非线性效应 ($P \neq 0, S = 0$), 只考虑自陡效应 ($P = 0, S \neq 0$) 时不稳定性调制增益谱随时间频率和空间频率变化的三维图。为便于对照说明问题, 将没有考虑赝五阶非线性与自陡效应 ($P = 0, S = 0$) 的增益谱称为原来的谱。

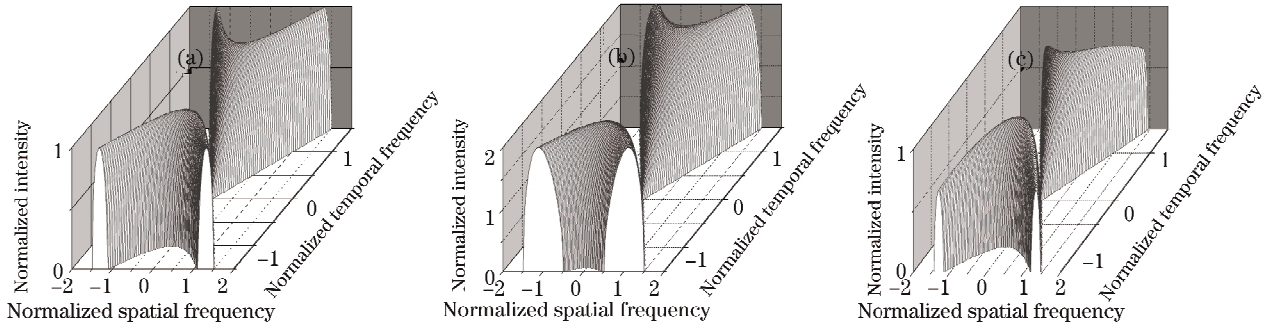


图 2 负折射区中自聚焦介质反常群速度色散情形下归一化不稳定增益随归一化时间频率和归一化空间频率变化的三维图。(a) $S=0, P=0$; (b) $S=0, P=-0.5$; (c) $S=-0.5, P=0$

Fig. 2 Normalized instability gain as a function of the normalized spatial and temporal frequency for the case of focusing material with anomalous dispersion in negative-index region. (a) $S=0, P=0$; (b) $S=0, P=-0.5$; (c) $S=-0.5, P=0$

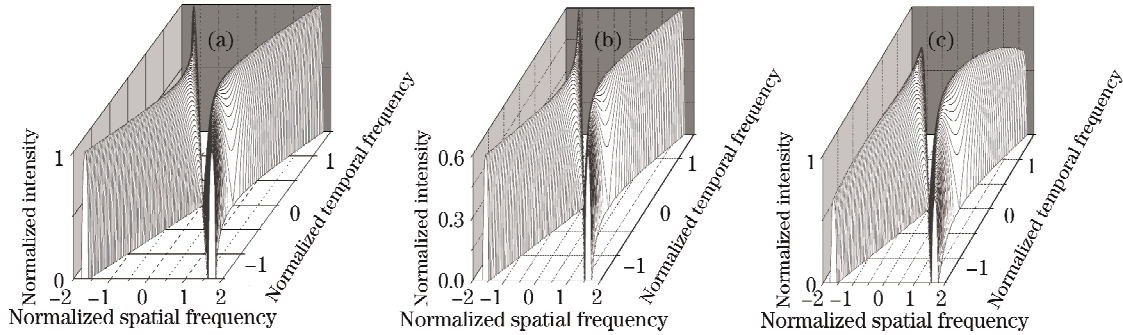


图 3 负折射区中自散焦介质反常群速度色散情形下归一化不稳定增益随归一化时间频率和归一化空间频率变化的三维图。(a) $S=0, P=0$; (b) $S=0, P=-0.2$; (c) $S=-0.5, P=0$

Fig. 3 Normalized instability gain as a function of the normalized spatial and temporal frequency for the case of defocusing material with anomalous dispersion in negative-index region. (a) $S=0, P=0$; (b) $D=0, P=-0.2$; (c) $S=-0.5, P=0$

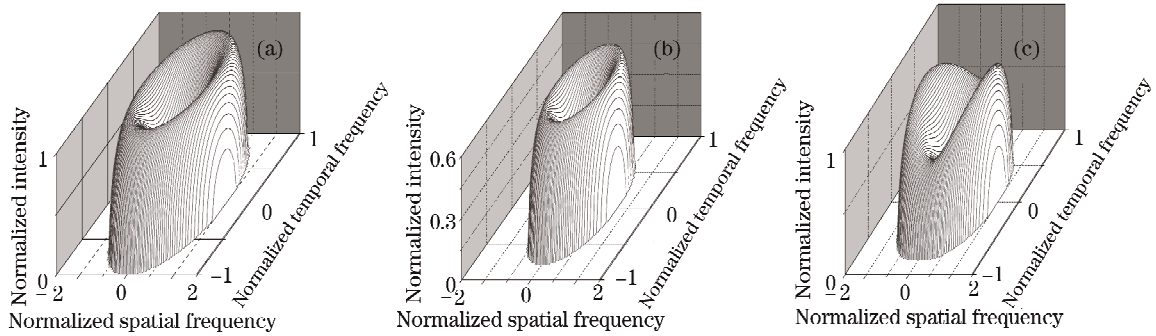


图 4 负折射区中自散焦介质正常群速度色散与正折射区自聚焦介质反常群速度色散两种情形下归一化不稳定增益随归一化时间频率和归一化空间频率变化的三维图。(a) $S=0, P=0$; (b) $S=0, P=0.2$; (c) $S=-1.5, P=0$

Fig. 4 Normalized instability gain as a function of the normalized spatial and temporal frequency for the two cases of defocusing material with normal dispersion in negative-index region and focusing material with anomalous dispersion in positive-index region. (a) $S=0, P=0$; (b) $S=0, P=0.2$; (c) $S=-1.5, P=0$

3.1 赝五阶非线性对时空不稳定性的影响

3.1.1 负折射区域

对于自聚焦介质,在正常群速度色散情形,无论考虑赝五阶非线性与否,由(16)式可以知道,时空不

稳定性始终不会产生。而在反常群速度色散情形,时空不稳定性将会产生。由于此时 $P < 0$,根据(16)式可以容易求得,赝五阶非线性可以使时空不稳定性的增益最大值从不考虑其影响时的 1 增大到

$1-2P$, 调制时间频率与空间频率的范围从 $\sigma^2 - 1 < k^2 < \sigma^2$ 增大到 $\sigma^2 - 1 - 2P < k^2 < \sigma^2$, 也就是说随着 $|P|$ 的增大, 调制增益值和调制时间与空间频谱的范围都将增大如图 2(b) 所示。由图 3 和图 4 可以知道, 如果介质为自散焦介质, 无论考虑赝五阶非线性与否, 也无论在正常群速度色散还是反常群速度色散情况下, 时空不稳定性都将产生。由于 P 恒大于零, 赝五阶非线性在这两种情形下都将抑制时空不稳定性出现。由图 3(b) 可以看出, 对于反常群速度色散情形, 赝五阶非线性效应不但缩小了调制时间频率与空间频率范围(从 $\sigma^2 < k^2 < \sigma^2 + 1$ 到 $\sigma^2 < k^2 < \sigma^2 + 1 - 2P$), 而且使调制的增益也变小(从 1 变为 $1 - 2P$)。而对于正常群速度色散情形, 赝五阶非线性将使调制时间频率与空间频率范围从不考虑其影响时的 $\sigma^2 + k^2 < 1$ 缩小到 $\sigma^2 + k^2 < 1 - 2P$, 调制增益从 1 减小为 $1 - 2P$, 如图 4(b) 所示。特别是在上述两种情况下, 只要赝五阶非线性效应大于某一阈值, 时空不稳定性将完全可以被抑制。

3.1.2 正折射区域

若脉冲光束在正折射区域传输, 由图 1 可以知道, 此时脉冲光束始终处在反常色散区, 由(16)式可以知道, 对于自散焦介质, 时空不稳定性将不会产生。而对于自聚焦介质, 无论考虑赝五阶非线性与否, 时空不稳定性始终会产生, 由于 P 恒大于零, 所以此时赝五阶非线性将抑制时空不稳定性出现, 对比图 4(a) 与图 4(b) 发现, 赝五阶非线性不但使调制的时间频率与空间频率缩小(从 $\sigma^2 + k^2 < 1$ 变为 $\sigma^2 + k^2 < 1 - 2P$), 而且使最大增益变小(从 1 变为 $1 - 2P$)。特别是当赝五阶非线性量 P 足够大时, 时空不稳定性完全可以消除, 这种情形与负折射区域自散焦介质正常群速度色散情形下所发生的物理现象完全相同。

3.2 自陡效应对调制不稳定性的影响

对于常规介质, 无论是在时间不稳定性还是时空不稳定性情况下, 自陡效应都是趋向消除不稳定性。在超常介质中, 由于材料的波矢是负数, 导致产生时空不稳定性的条件发生了改变, 特别是超常介质中色散磁导率导致自陡效应可正可负, 甚至很大。但由(16)式可以知道, 自陡效应对增益的影响与其符号无关, 只取决于其绝对值的大小。图 2(c), 图 3(c) 和图 4(c) 分别表示在不同情形下自陡系数取不同值时不稳定性调制增益谱随时间频率和空间频率变化的三维图。将这些图与原增益谱图进行对比可以清楚地看出, 无论在何种情况下, 自陡效应都会使

每一个谱分量的增益下降从而使谱的范围收缩; 且自陡系数的绝对值越大, 对增益谱的影响越明显, 而与其符号无关; 特别是自陡系数绝对值达到一定的阈值时, 时空不稳定性将会完全消失。

4 结 论

基于(3+1)维非线性包络方程研究了非线性超常介质中的时空不稳定性, 得到了具有赝五阶非线性效应、自陡效应情形下的时空不稳定性表达式。全面分析了色散磁导率所导致的赝五阶非线性、自陡效应对时空不稳定性的影响。结果表明, 在负折射区域, 对于自散焦介质, 由于赝五阶非线性为正, 它会抑制时空不稳定性出现, 对于自聚焦介质, 由于赝五阶非线性为负, 它会促进时空不稳定性出现, 而对于正折射区域中自聚焦介质, 由于赝五阶非线性为正, 它反而会抑制时空不稳定性出现。自陡效应在超常介质中可能为负值, 但无论正负, 也无论在正折射区域还是负折射区域, 它都会抑制时空不稳定性的出现。

参 考 文 献

- Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenghong Transl., 3rd Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 88~170
- Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹译. 第三版, 北京: 电子工业出版社, 2002. 88~170
- M. J. Potosek. Modulation instability in an extended nonlinear Schrödinger equation [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 921~923
- S. C. Wen, D. Y. Fan. Small-scale self-focusing of intense laser beams in the presence of vector effect [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**(10): 731~733
- L. W. Liou, X. D. Cao, C. J. McKinstrie *et al.*. Spatiotemporal instabilities in dispersive nonlinear media [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **46**(7): 4202~4208
- S. C. Wen, D. Y. Fan. Spatiotemporal instabilities in nonlinear Kerr media in the presence of arbitrary higher-order dispersions [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(7): 1653~1659
- S. C. Wen, Y. W. Wang, W. H. Su *et al.*. Modulation instability in nonlinear negative-index material [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(3): 036617
- G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Uspekhi*, 1968, **10**(4): 509~514
- D. R. Smith, N. Kroll. Negative refractive index in left-handed materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14): 2933-1~4
- D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18): 4184-1~4
- R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77~79
- A. Zharov, I. V. Shadrivov, Y. S. Kivshar. Nonlinear properties of left-handed metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 037401

- 12 N. Lazarides, G. P. Tsironis. Coupled nonlinear Schrödinger field equations for electromagnetic wave propagation in nonlinear left-handed materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(3): 036614
- 13 I. Kourakis, P. K. Shukla. Nonlinear propagation of electromagnetic waves in negative-refraction-index composite materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**(1): 016626
- 14 M. S. Scalora, M. S. Sychin, N. Akozbek *et al.*. Generalized nonlinear schrödinger equation for dispersive susceptibility and permeability; application to negative index materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(1): 013902-1~4
- 15 S. C. Wen, Y. J. Xiang, W. H. Su *et al.*. Role of the anomalous self-steepening in modulation instability in negative-index material [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1568~1575
- 16 Y. J. Xiang, S. C. Wen, X. Y. Dai *et al.*. Modulation instability induced by nonlinear dispersion in nonlinear metamaterials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**: 3058~3063
- 17 Dai Xiaoyu, Wen Shuangchun, Xiang Yuanjiang. Influence of dispersive magnetic permeability on modulation instability in metamaterials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **57**(1): 186~193
戴小玉, 文双春, 项元江. 色散磁导率对异向介质中的调制不稳定性的影响[J]. *物理学报*, 2007, **57**(1): 186~193
- 18 S. C. Wen, Y. J. Xiang, X. Y. Dai *et al.*. Theoretical models for ultrashort electromagnetic pulse propagation in nonlinear metamaterials [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(3): 033815
- 19 Zhuo Hui, Wen Shuangchun. Property of ultrashort electromagnetic pulse propagation in metamaterial [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1475~1480
卓辉, 文双春. 超常介质中超短电磁脉冲的传输特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1475~1480