

文章编号: 0258-7025(2008)06-0803-08

超常介质非线性光学研究进展

文双春 戴小玉 项元江

(湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 光与超常介质相互作用时,光的磁场也变得很重要。超常介质的色散磁导率导致光与超常介质的非线性相互作用呈现出许多新特性。总结了超常介质中二阶非线性光学现象的国内外研究进展,报道了在三阶非线性超常介质中光的传输特性方面的研究结果,包括传输模型的建立、调制不稳定性、孤子和自聚焦现象等。

关键词 非线性光学;超常介质;负折射;调制不稳定性;孤子;自聚焦;倍频;参量放大

中图分类号 O 437;O 441.4 **文献标识码** A

Research Advances in Nonlinear Optics of Metamaterials

Wen Shuangchun Dai Xiaoyu Xiang Yuanjiang

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract When light field interacts with metamaterials, both the electric field and the magnetic field must be considered. The dispersive permeability of metamaterials induces many new characteristics under the nonlinear interaction between light field and metamaterials. The research progresses on the second-order nonlinear optical phenomena are briefly described, and some research results on the propagation characteristics of electromagnetic waves in the metamaterials with third-order nonlinear optical responses are specially presented, such as the establishment of the propagation model, the results for modulation instabilities, solitons, self-focusing.

Key words nonlinear optics; metamaterial; negative refraction; modulation instability; soliton; self-focusing; second-order harmonic generation; parametric amplification

1 引言

光是人类认识和改造世界的工具,是信息的理想载体。当光与传统材料的原子相互作用时,由于磁场分量与原子的作用非常弱而被忽略掉,只考虑电场分量。而超常介质的出现改变了传统的观点。由于超常介质是磁性介质,光的电场和磁场分量均与人造材料的原子耦合,此时必须同时考虑电场和磁场效应^[1]。超常介质是一种人工功能材料,它具有自然材料所不具有的性质,且其性质可以根据需要人为调节^[2]。最奇特的超常介质是负折射介质(NIM)^[3],它最初在微波段实现,由于纳米制造技术和亚波长成像技术的发展,超常介质很快被光学研究者采用。负折射率超常介质的获得开辟了一个全新的光学研究领域,并导致产生全新的操控光的技术和方法,也使研究者有机会重新思考一些基本的

物理规律。负折射率超常介质的介电常数和磁导率都为负,折射率取负值,电磁波在这种介质中传播时,其波矢、电场和磁场形成不同于传统介质右手关系的左手关系,因此又把这种介质称为左手物质(LHM),以区别于传统的右手物质(RHM)。负折射介质具有很多奇异特性,将在新型的无线通信、光通信、雷达、传感、成像技术等众多领域有重要应用前景^[4~13]。

如今已能构造出光频段负折射超常介质,将负折射行为扩展到光波段对于负折射介质的实际应用非常重要。第一个实现光波段负折射现象的实验采用了简化的平行金属圆柱序列^[14],几乎同时有些科学家采用电解质空穴对也实现了光波段的负折射材料^[15],这两种方法都是比较有望实现负折射材料的方法,基本上采用了外磁场和感应磁场共振的原

收稿日期:2007-08-25;收到修改稿日期:2007-10-07

基金项目:国家 863 计划(2007AA804003),国家自然科学基金(10674045)和国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(10576012)资助项目。

作者简介:文双春(1966—),男,湖南人,教授,主要从事非线性光学、强激光技术等方面的研究。E-mail:scwen@hnu.cn

理产生负的磁导率。为了减少损耗, Karlsruhe 研究小组采用鱼网结构实现负折射率^[16], 得到了质量因子较大的大负折射率材料, 此种结构大大减小了折射率的虚部。此外, 将构造的负折射介质嵌入到非线性的电介质中可以实现三阶非线性超常介质^[17], 将二极管插入共振导电单元中, 可得到二阶非线性超常介质^[18]。非线性超常介质的实现将大大拓展传统非线性光学的研究领域, 并导致产生全新的操纵光的技术, 从而发展出许多新型的光电子器件。非线性超常介质已经激发了人们的研究热情并取得了一些重要进展, Shadrivov 等^[19]发现利用电场的非线性可以有效控制表面波群速度和补偿脉冲的色散展宽效应, 在界面上形成表面极化孤子; Feise 等^[20]发现在由正负折射率介质交替构成的周期性结构中引入一层三阶非线性介质时, 光传输存在光学双稳态; Hegde 等^[21]发现由非线性正折射材料和线性负折射介质构成的周期性结构中能形成零折射率带隙孤子; Aguanno 等^[22]发现负折射介质的传输谱中存在一个固有的带隙, 类似于二维光子晶体带隙结构带隙边缘的传输响应, 由带隙和通带组成的光谱区表现出一些特性: 可能存在亮暗隙孤子, 可以用来制造有效的空心波导等。本文总结了国内外关于超常介质非线性光学的研究工作进展, 报道了在基于超常介质的三阶非线性光学现象方面的研究成果, 包括超短脉冲传输的物理模型、调制不稳定性、孤子和自聚焦等。

2 超常介质中二阶非线性光学现象研究进展

自从 1961 年 Franken 等^[23]通过实验发现二次谐波现象以来, 研究者对传统介质中的二阶非线性现象进行了广泛研究^[24, 25]。传统介质中二次谐波产生 (SHG) 的主要问题是转换效率低, 一般通过相位匹配技术来提高能量转换率^[26, 27]。最近, 非线性超常介质中的二阶非线性光学现象引起了人们的研究热情。根据光波频率的不同, 超常介质存在正负折射率区。当两波或三波在超常介质中传输时, 有可能一个(些)波经历正折射, 而另一个(些)波经历负折射。Agranovich 等^[28]率先分析了半无限左手超常介质中的二次谐波产生问题, 指出在传输中三波很难达到相位匹配。随后, Shadrivov 等^[29]指出, Agranovich 等忽略了一个重要的能达到相位匹配的条件。对于半无限厚度负折射介质, 如图 1 所示,

粗箭头表示能流方向, 细箭头表示波矢方向, 下标 i , r 和 tr 分别表示入射、反射和折射波。当基频波处于负折射区, 而二次谐波处于正折射区时, 由于在负折射介质中波矢方向与坡印亭矢量的方向相反, 所以光波入射后产生的二次谐波为后向波, 根据相位和波矢的匹配条件, 二次谐波的坡印亭矢量的方向也是后向的, 这样能较好地实现相位匹配, 导致二次谐波的产生。而对于有限厚度的左手超常介质中的二次谐波, Shadrivov 等^[29]预言对于后平板将会产生多稳态非线性效应。此外, Zharov 等^[30]研究了具有二阶非线性的负折射平板的二次谐波的产生过程, 证明这个平板能充当非线性棱镜, 而且其产生的二次谐波会形成亚波长像。

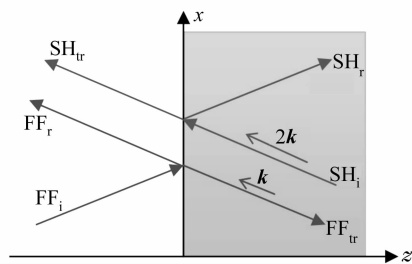


图 1 二次谐波产生的几何描述

Fig. 1 Geometry of the SHG

理论工作很快就在实验上得到了证实^[31, 32], Klein 等^[31]发现磁性的超常材料中能产生二次谐波, 发现利用波长为 $1.5 \mu\text{m}$ 的光波去激发由开口环谐振腔组成的超常介质时产生了二次谐波, 并且当同时存在电偶极子共振和磁偶极子共振时, 能检测到非常大的信号。

最近, Roppo 等^[33]分析了相位失配条件下脉冲在传统介质和超常介质中传输时产生的二次谐波现象, 并且发现产生的部分二次谐波会被抽运脉冲锁定、捕获和牵引。在这种情况下, 将导致所产生的捕获脉冲和界面上所反射的脉冲的波矢方向均与传输方向相反, 从而形成诱捕现象。此项工作扩展了传统介质中关于二次谐波的研究。

Shalaev 小组在超常介质二阶非线性光学方面也做了很多工作, 包括二阶非线性超常介质中的二次谐波产生、曼利-罗 (Manley-Rowe) 关系和参量放大现象^[34], 发现负折射介质中的波矢方向和坡印亭矢量的方向相反将导致奇特的光学性质, 包括后向的相位匹配和新奇的曼利-罗关系, 以及耦合场强的空间分布, 这些量将控制非线性介质中光传输时的能量平衡。负折射介质中的曼利-罗关系和正折射介质完全不同, 负折射介质的基频波强度和二次谐

波的强度之差是常数,而在正折射介质中则是两者之和为常数,如图 2 所示。当满足相位匹配且材料无损耗的条件时,入射波在 $z = 0$ 处能实现能量 100% 地转换到二次谐波。此外,利用反向波引引起的后向参量放大可补偿负折射介质中的损耗^[35]。

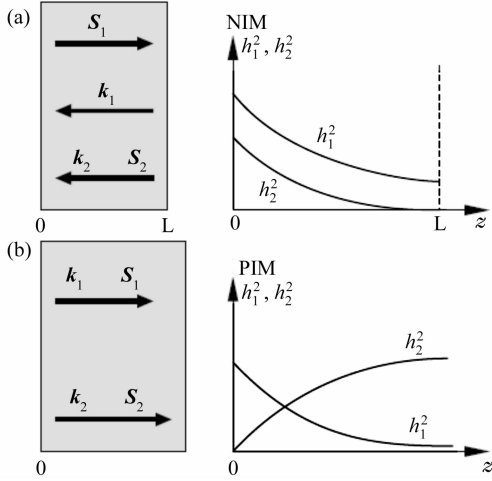


图 2 负折射介质和正折射介质相位匹配方式和基频波强度 h_1^2 及二次谐波强度 h_2^2 的分布情况。(a) 负折射介质平板;(b) 正折射介质平板

Fig. 2 Difference in the phase-matching geometry and in the intensity-distribution for the fundamental and the second harmonic waves, h_1^2 and h_2^2 , between a slab of the negative-index metamaterial (a), and a positive-index material (b)

3 超常介质中三阶非线性光学现象研究

3.1 超常介质中超短脉冲的传输模型

超常介质是磁性介质,在超常介质中光具备了完整的电场和磁场。传统介质中光的非线性传输是不考虑磁场作用的,所以,结合超常介质和超短脉冲的特性重新建立物理意义清晰、数学形式简单的超短脉冲传输模型将为研究超常介质中超短脉冲的传输特性奠定理论基础。到目前为止,已经建立了两类超短脉冲传输的物理模型,一是关于电场和磁场包络的耦合非线性薛定谔方程组^[36,37],它同时考虑了电场和磁场的克尔(Kerr)非线性;二是关于电场包络的推广的非线性薛定谔方程,类似于常规介质中的脉冲传输方程^[38~41]。第二类方程的推导可以从麦克斯韦(Maxwell)方程组出发,与研究常规无磁介质中的传输一样,从一开始消去磁场,并将色散磁导率合并到电极化矢量中,得到形式上与常规无磁介质中完全一样的波动方程,从而通过类比的方

法得到超常介质的脉冲传输方程^[39,40]。在第一类耦合非线性薛定谔方程组中,如不考虑磁场的非线性,则此类耦合方程组可归结为一个关于电场的非线性薛定谔方程,形式上与第二类方程相同^[29]。

考虑一维空间情形并假设电场在 x 方向偏振,在具有三阶非线性极化的各向同性均匀超常介质中,超短脉冲的传输由归一化非线性薛定谔方程描述^[37,39,40]

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = -\frac{i \operatorname{sgn}(\beta_2)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + i \sum_{m=3}^{\infty} \frac{i^m b_m}{m!} \frac{\partial^m u}{\partial \tau^m} + iN \left[|u|^2 u - p |u|^4 u + iS_1 \frac{\partial}{\partial \tau} (|u|^2 u) - s_2 \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} (|u|^2 u) \right], \quad (1)$$

式中 u 为归一化电场包络, Z 和 τ 分别为归一化传播距离和时间, $\operatorname{sgn}(\beta_2) = \pm 1$, 分别代表正常和反常群速度色散, b_m 为 m 阶色散系数, N 为非线性系数, $S_1 = s + s_1$ 为总的自陡系数,其中 s 为常规自陡参数, s_1 和 s_2 均由色散磁导率导致产生的额外的自陡和二阶非线性色散系数,它们在常规非磁性介质中是不曾出现的, p 为赝五阶非线性。与传统正折射材料中超短脉冲的传输方程^[40]相比,(1)式的不同之处在于由于色散磁导率导致了可控的自陡峭效应项,且出现特有的高阶非线性色散项。当不考虑磁化效应时,(1)式可以返回到传统介质中的传输方程^[42]。

超常介质的电磁特性通常用德鲁德(Drude)模型描述^[43]

$$\begin{aligned} \epsilon(\omega) &= \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega(\omega + i\gamma_e)} \right], \\ \mu(\omega) &= \mu_0 \left[1 - \frac{\omega_{\text{pm}}^2}{\omega(\omega + i\gamma_m)} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 ω_{pe} 和 ω_{pm} 分别为电场和磁场的等离子体频率, γ_e 和 γ_m 为相应的电场和磁场损耗项, γ_e 和 γ_m 非常小,所以在分析中为简化起见往往忽略。在无损耗德鲁德模型下,可以求出(1)式各项的参数。图 3 给出了当 $\omega_{\text{pm}}/\omega_{\text{pe}} = 0.8$ 时,各个参数随归一化频率 $\omega/\omega_{\text{pe}}$ 的变化关系, β_2 的单位为 $1/(2\pi c\omega_{\text{pe}})$ 。可以发现,当 $\omega/\omega_{\text{pe}} < 0.8$ 时,折射率 n 为负值, $0 < \omega/\omega_{\text{pe}} < 0.8$ 为负折射区;而当 $\omega/\omega_{\text{pe}} > 1$ 时,折射率 n 为正值, $\omega/\omega_{\text{pe}} > 1$ 为正折射区;而在区域 $0.8 < \omega/\omega_{\text{pe}} < 1$ 折射率的实部几乎为零,电磁波不能在其中传输,这个区域为阻带区。在负折射区域内,群速度色散 β_2 可正可负,表明负折射区既存在正常色散也可能存在反常色散,而在正折射区只可能出现反常色散。另外,在负折射区域,赝五阶非线性系数 p 恒为负,而在正折

射区域中五阶非线性系数恒为正。在负折射区总的自陡 S_1 , 二阶非线性色散系数 s_2 均可正可负, 正折射区总的自陡系数均可正可负, 二阶非线性色散

系数恒为正, 且自陡系数的大小均取决于开口环谐振腔、金属导线的结构参数。

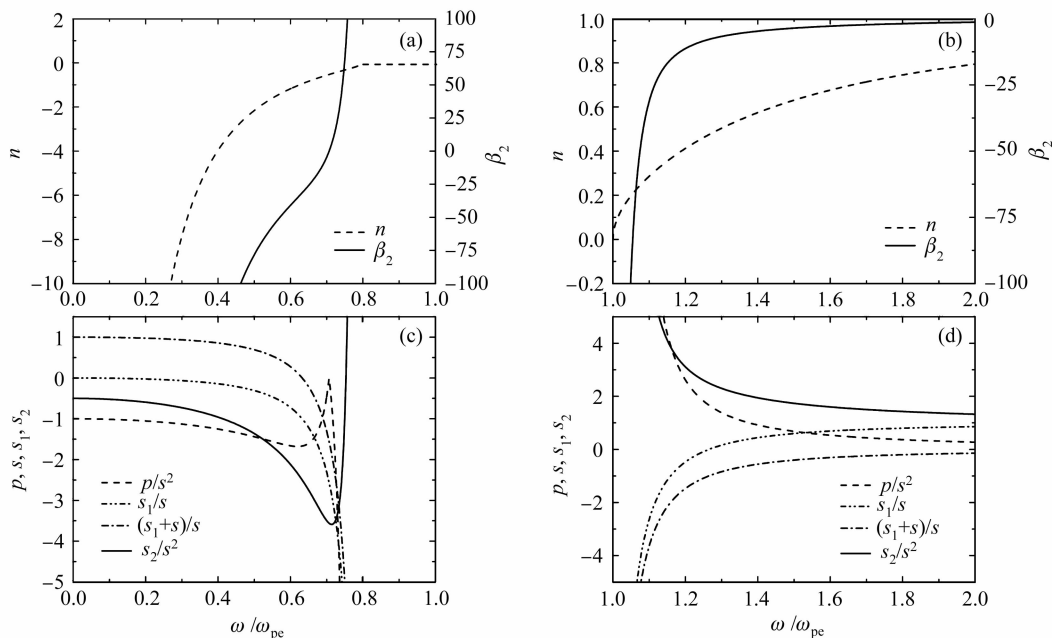


图 3 (1)式的各项系数与归一化频率 ω/ω_{pe} 的关系图

Fig. 3 Dependence of the parameters of Equation (1) on the normalized frequency ω/ω_{pe}

3.2 超常介质中的调制不稳定性

调制不稳定性是非线性科学中一个基本的物理现象。在非线形色散介质中, 它主要是由非线性效应和群速度色散导致的, 体现出连续波传输时伴随着噪声的不稳定性增长, 最后准连续脉冲分裂成一系列的短脉冲^[44]。调制不稳定性与亮暗孤子的产生有紧密的联系, 可以看成是孤子形成的先兆。对常规的非线形色散介质, 例如光纤中的调制不稳定性, 已有大量的理论和实验研究工作, 而且各种色散和非线形效应, 包括高阶色散、自陡峭以及延时拉曼效应等对调制不稳定性的影响也基本揭示出来^[45~49]。基于(1), (2)式研究了超常介质中的调制不稳定性, 揭示了超常介质的特性所导致的新的不稳定性现象。

超常介质的色散磁导率导致额外的可控自陡项, 从而使总的自陡效应大小和符号均可控。这一反常自陡峭效应可操控调制不稳定性^[40], 如图 4 所示。随着自陡系数数值的逐渐增加, 调制不稳定性的谱宽变窄, 同时增益振幅减小, 当达到某一临界值时, 调制不稳定性不再存在。超常介质中调制不稳定性的可控性预示着孤子的可控制。

由于负折射介质中光的波矢方向与坡印亭矢量的方向相反, 将导致在负折射介质中存在反常空间

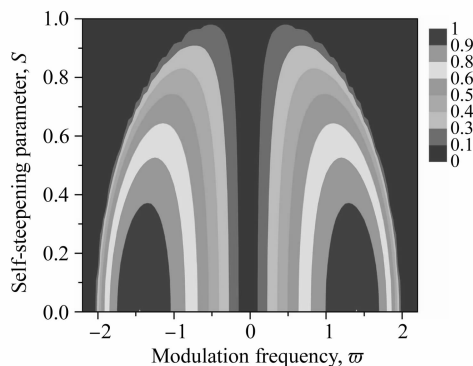


图 4 负折射介质的反常色散区中调制不稳定性增益与自陡系数的关系图

Fig. 4 Modulation instability gain spectrum for different self-steepening parameters in the abnormal dispersion region of negative-index material (NIM)

和时空调制不稳定性^[37]。负折射介质中的空间调制不稳定性与传统介质存在很大的差异, 例如在传统介质中空间调制不稳定性只存在于自聚焦非线性情形, 而在负折射介质中只存在于自散焦非线性情形。主要是由于负的折射率改变了衍射项的符号, 但是非线性项的符号并没有发生改变。负折射介质中特殊的空间调制不稳定性特性也将导致反常时空调制不稳定性。图 5 为超短脉冲在负折射介质中三种不同情况下的时空调制不稳定性, 其中(a)为自聚

焦介质的反常色散区,(b)为自散焦介质的正常色散区,(c)为自散焦介质的反常色散区,它们分别与传统自散焦介质中的正常色散区、传统自聚焦介质中的反常色散区和正常色散区中的时空调制不稳定性相同。特别值得指出的是,在常规的自散焦介质中,在正常色散情形下是不可能出现时空调制不稳定性的,而在负折射介质情形,情况发生了改变。可见,负折射介质的实现,使得在各种非线性与色散的组合情形下时空调制不稳定性均能发生,为产生时空孤子提供了更多的途径。

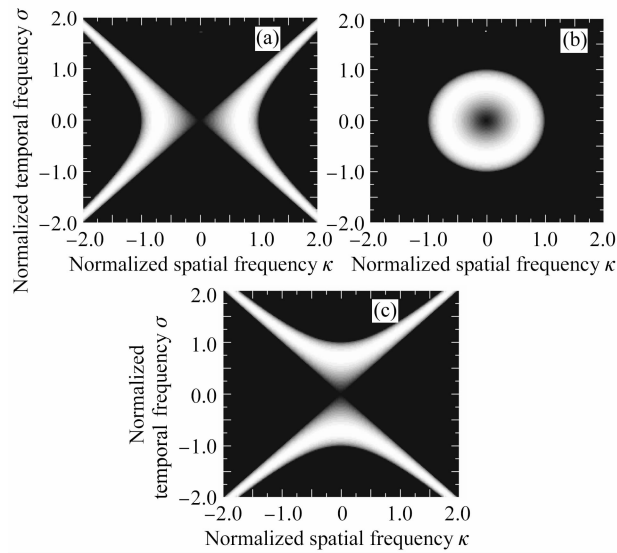


图 5 不同情况下时空调制不稳定性的增益谱图

Fig. 5 Spatiotemporal modulation instability gain in the spatial and temporal frequency plane

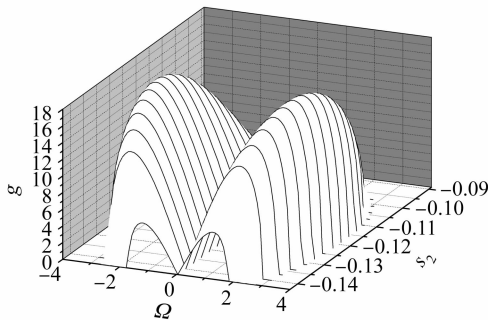


图 6 负折射介质的正常色散区中调制不稳定性增益随二阶非线性色散系数的变化关系图

Fig. 6 Influence of the second-order nonlinear dispersion on the modulation instability in the normal dispersion regime of NIM

超常介质的色散磁导率除了导致额外的自陡峭效应外,还导致一些其他的高阶非线性项,如二阶非线性色散效应,同样对调制不稳定性产生较大的影响^[50]。如图 6 所示,随着二阶非线性色散系数 s_2 的

逐渐增大,调制不稳定性增益谱谱宽和振幅先增大后减小,最后不再存在调制不稳定性。特别是,由于二阶非线性色散的作用,使得在超常介质的正常色散区,甚至在没有群速度色散(GVD)的情况下也可能发生调制不稳定性,是由于二阶非线性色散从某种程度上充当了线性群速度色散的角色。这一性质为在正常色散区产生超短光脉冲串提供了思路,图 7 所示的数值模拟结果证明了该理论结果。图 7 显示在零群速度色散点,余弦调制的平面波经过一段距离后演化成一系列超短脉冲,同时由于超常介质中负的自陡效应导致脉冲中心向前沿偏移。

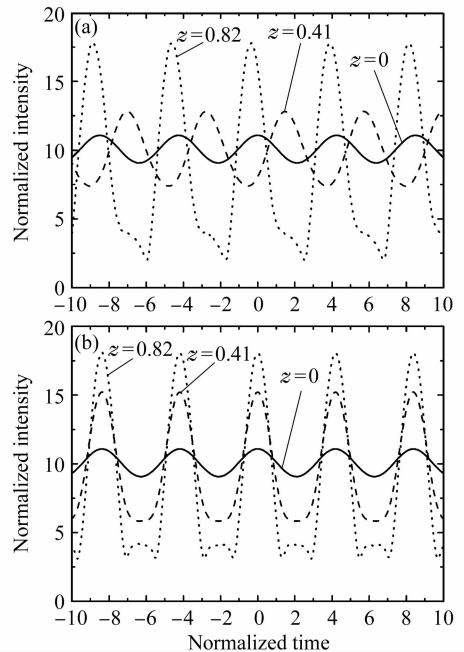


图 7 零群速度色散点不同传输距离处余弦调制的平面波时域分布图

Fig. 7 Temporal distributions of the field intensity of cosinoidally modulated plane wave at different propagation distances for different parameters at the zero group-velocity dispersion (GVD) point. (a) $s_1 = -0.3122$, $s_2 = -0.1424$; (b) $s_1 = 0$, $s_2 = -0.1424$

3.3 超常介质中的孤子传输特性

利用一种扩展的双曲函数级数方法求解超常介质中的超短脉冲传输方程(1),得到了各种不同情形下的暗孤子解。在各种情况下,可控自陡效应和二阶非线性色散效应均对孤子形成和传输特性产生重要影响,其中自陡和二阶非线性色散项将决定暗孤子中心位置的偏移方向。图 8 为不同群速度色散情形下暗孤子的强度图,从图中可以看出无论是在正常还是反常群速度色散情形下,暗孤子的中心位置

都因自陡效应的作用而产生向左或向右偏移,孤子的偏移方向取决于 $\text{sgn}(\beta_2)$, S_1 和 s_2 的符号的组合。尤其值得注意的是由于二阶非线性色散的作用,在零群速度色散和反常群速度色散的情形下同样可形成暗孤子。

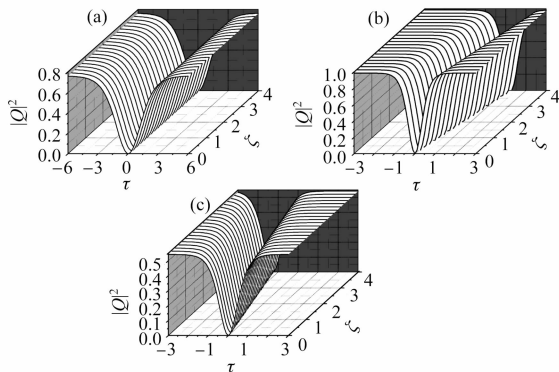


图 8 $s_1 = -1.593$, $s_2 = 0.25131$, $p = -1.332$ 时, 各种群速度色散下的暗孤子强度图。(a) 零群速度色散情形; (b) 正常群速度色散情形; (c) 反常群速度色散情形

Fig. 8 Intensity distributions of the dark solitons under the condition of (a) zero GVD point, (b) normal GVD region, (c) normal GVD region when $s_1 = -1.593$, $s_2 = 0.25131$, $p = -1.332$

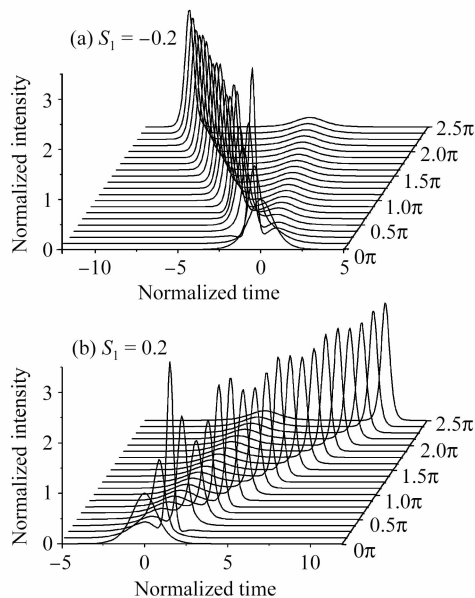


图 9 反常色散情形下二阶孤子在 (a) 负折射介质和 (b) 常规正折射介质中传输 $\zeta = 2.5\pi$ 的波形演变图

Fig. 9 Temporal evolution of the 2nd-order soliton at abnormal dispersion region (a) of the NIM, (b) of the ordinary positive-index materials

此外,通过数值模拟的方法比较了孤子在超常介质和传统介质中的传输差异。图 9 揭示了自陡峭

效应对二阶孤子分别在负折射介质和常规正折射介质中传输的影响。对于负折射介质,负的自陡峭效应将导致二阶孤子分裂成其构成成分,形成孤子衰变。由于在负折射介质中 S_1 的值可以很大,从而使这两个被分裂的孤子在两个孤子周期长度内分开,且随着孤子的继续传输,两个孤子间的距离越来越大,但是两个孤子都发生了向前的偏移,其中靠近脉冲冲前沿的那个孤子的峰值较高。因此, S_1 的值越大,则在一定的传输距离内孤子的偏移量越大,孤子衰减分裂的两个基态孤子的间距也越大。所以在负折射介质中负的自陡峭效应不仅会造成孤子脉冲的非对称中心偏移,还会导致高阶孤子衰减,使其裂变成几个基态孤子,这与常规正折射介质中出现的现象相同。但是由于在负折射介质中自陡系数可正可负,负的自陡会导致脉冲中心往相反方向偏移,与正折射介质中出现的现象正好相反,即自陡系数的符号决定了脉冲中心偏移的方向。

3.4 超常介质中的自聚焦现象

自聚焦是典型的三阶非线性光学现象。在负折射超常介质中,自聚焦和自散焦现象分别发生在散焦型和聚焦型非线性折射率情形,跟常规介质中的现象正好相反^[51,52]。因此,利用聚焦型非线性负折射材料可补偿常规非线性介质中的自聚焦^[51]。图 10 为用一薄片非线性负折射材料预补偿和后补偿常规非线性介质中的小尺度自聚焦的数值模拟结果。可以看到,一束初始受到空间调制的光束,如图 10(a)所示,通过常规非线性介质后,调制获得明显的增长,如图 10(b)所示,这是典型的小尺度自聚

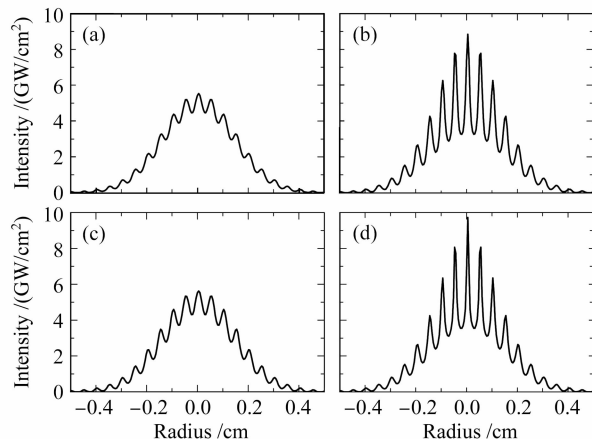


图 10 利用负折射介质补偿常规介质中光束的自聚焦的数值模拟结果

Fig. 10 Calculated results for compensation of self-focusing of light beam in conventional media by a slab of negative refractive medium

焦现象。通过在常规非线性介质前增加一薄片非线性负折射材料进行预补偿,可以发现光束通过常规非线性介质后,调制增长受到抑制,如图 10(c)所示。如果在常规非线性介质后增加一薄片非线性负折射材料,即进行所谓的后补偿,可以发现调制增长并未受到抑制,如图 10(d)所示。可见,通过在常规非线性介质前插入一薄片非线性负折射材料,可有效地抑制光束的自聚焦。

3.5 其他三阶非线性光学现象

超常介质的色散磁导率导致许多与传统非线性光学不同的特性,由于超常介质具有很强的非线性磁化效应,将存在极化和磁化之间的相互耦合,也将导致一系列新现象的产生。目前已有这方面的研究^[36,37],并得到了几个光学周期脉冲在同时具有非线性极化和磁化的超常介质中的耦合三维非线性薛定谔方程,对色散磁导率的作用进行了研究。但电磁耦合在孤子传输中产生的影响有待于进一步研究。对于超常介质中的三阶非线性光学现象还有许多方面需要探讨,如三次谐波的产生、参量放大、四波混频等^[53]。由于超常介质的独特性质,必将产生许多新颖的现象,特别是对于超短脉冲的传输,理论处理相当复杂,还有待进一步完善。因为超短脉冲的频谱很宽,而超常介质对不同频率的电磁波表现出不同的折射率和色散特性,导致超短脉冲有可能一部分频率成分落在正折射区,一部分频率成分落在阻带内,而另一部分频率成分落在负折射区,从而产生非常复杂的现象。

4 结 论

对近年来电磁波与超常介质的非线性相互作用特性研究现状进行了系统概括,对超短脉冲在超常介质中传输的物理模型、超常介质的反常时空不稳定性现象及反常自陡效应对调制不稳定性及孤子传输的影响进行了详细介绍。新材料的出现往往伴随着新现象和新技术的发展,随着超常介质的发展,许多原有的技术将得到新的发展。根据超常介质中超短脉冲的传输特性,可望改善现有相关器件的性能,甚至开发出全新的电子和光子器件,如利用非线性负折射介质的双稳态特性或含负折射介质的周期性结构中的孤子特性,可以制作性能优良的光开关;利用负折射介质的带阻特性有望制作各种形式的滤波器等。超常介质的奇异特性,导致今后有更多的非线性光学效应有待于人们去研究,这些工作不仅能拓展传统的非线性光学领域,还必将发展出许多新

型的光电子器件。

参 考 文 献

- Vladimir M. Shalaev. Optical negative-index metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**:41~48
- M. Lapine, S. Tretyakov. Contemporary notes on metamaterials [J]. *IET Microw. Antennas Propag.*, 2007, **1**(1):3~11
- V. G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of “ ϵ ” and “ μ ” [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4):509~514
- J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Trans. Microwave Theo. and Tech.*, 1999, **47**(11):2075~2084
- J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18):3966~3969
- Patanjali V. Parimi, Wentao T. Lu, Plarenta Vodo *et al.*. Imaging by flat lens using negative refraction [J]. *Nature.*, 2003, **426**(6965):404
- Nader Engheta, Richard W. Ziolkowski. A positive future for double-negative metamaterials [J]. *IEEE. Trans. Microw. Theo. and Tech.*, 2005, **53**(4):1535~1556
- D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice *et al.*. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801):977~980
- R. Ruppin. Bragg reflectors containing left-handed materials [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2003, **38**(6):494~495
- Richard W. Ziolkowski, Allison D. Kipple. Application of double negative metamaterials to increase the power radiated by electrically small antennas [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2003, **51**(10):2626~2640
- Michael W. Feise, Peter J. Bevelacqua, John B. Schneider. Effects of surface waves on the behavior of perfect lenses [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**(3):035113
- Sanshui Xiao, Linfang Shen, Sailing He. A novel directional coupler utilizing a left-handed material [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1):171~173
- Li Yiyu, Gu Peifu, Li Mingyu *et al.*. Near-field subwavelength imaging in wave-like two-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9):1409~1413
- 厉以宇, 顾培夫, 李明宇等. 波状结构二维光子晶体近场亚波长成像的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9):1409~1413
- Vladimir M. Shalaev, Wenshan Cai, Uday K. Chettiar *et al.*. Negative index of refraction in optical metamaterials [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24):3356~3358
- Shuang Zhang, Wenjun Fan, N. C. Panoiu *et al.*. Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(13):137404
- Gunnar Dolling, Christian Enkrich, Martin Wegener *et al.*. Low-loss negative-index metamaterial at telecommunication wavelengths [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12):1800~1802
- Alexander A. Zharov, Ilya V. Shadrivov, Yuri S. Kivshar. Nonlinear properties of left-handed metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3):037401
- M. Lapine, M. Gorkunov, K. H. Ringhofer. Nonlinearity of a metamaterial arising from diode insertions into resonant conductive elements [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(6):065601
- Ilya V. Shadrivov, Nina A. Zharova, Alexander A. Zharov *et al.*. Defect modes and transmission properties of left-handed bandgap structures [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(4):046615
- Michael W. Feise, Ilya V. Shadrivov, Yuri S. Kivshar.

- Tunable transmission and bistability in left-handed band-gap structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(9):1451~1453
- 21 Ravi S. Hegde, Herbert G. Winful. Zero-n gap soliton [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14):1852~1854
- 22 Giuseppe D'Aguanno, Nadia Mattiucci, Michael Scalora *et al.*. Bright and dark gap solitons in a negative index Fabry-Pérot etalon [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(21):213902
- 23 P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters *et al.*. Generation of optical harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **7**(4):118~119
- 24 Heping Zeng, Jian Wu, Han Xu *et al.*. Colored conical emission by means of second harmonic generation in a quadratically nonlinear medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(14):143903
- 25 S. Trillo, P. Ferro. Modulational instability in second-harmonic generation [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5):438~440
- 26 J. A. Giordmaine. Mixing of light beams in crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1):19~20
- 27 P. D. Maker, R. W. Terhune, M. Nisenoff *et al.*. Effects of dispersion and focusing on the production of optical harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1):21~22
- 28 V. M. Agranovich, Y. R. Shen, R. H. Baughman *et al.*. Linear and nonlinear wave propagation in negative refraction metamaterials [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **69**(16):165112
- 29 Ilya V. Shadrivov, Alexander A. Zharov, Yuri S. Kivshar. Second-harmonic generation in nonlinear left-handed metamaterials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(3):529~534
- 30 Alexander A. Zharov, Nina A. Zharova, Ilya V. Shadrivov *et al.*. Subwavelength imaging with opaque nonlinear left-handed lenses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(9):091104
- 31 Matthias W. Klein, Christian Enkrich, Martin Wegener *et al.*. Second-harmonic generation from magnetic metamaterials [J]. *Science*, 2006, **313**(5786):502~504
- 32 Matthias W. Klein, Martin Wegener, Nils Feth *et al.*. Experiments on second- and third-harmonic generation from magnetic metamaterials [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8):5238~5247
- 33 Vito Roppo, Marco Centini, Concita Sibilìa *et al.*. Role of phase matching in pulsed second-harmonic generation; walk-off and phase-locked twin pulses in negative-index media [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(3):033829
- 34 A. K. Popov, V. M. Shalaev. Negative-index metamaterials; second-harmonic generation, Manley-Rowe relations and parametric amplification [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **84**(1):131~137
- 35 Alexander K. Popov, Vladimir M. Shalaev. Compensating losses in negative-index metamaterials by optical parametric amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14):2169~2172
- 36 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
- 37 Shuangchun Wen, Yuanjiang Xiang, Xiaoyu Dai *et al.*. Theoretical models for ultrashort electromagnetic pulse propagation in nonlinear metamaterials [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(3):033815
- 38 Michael Scalora, Maxim S. Syrchin, Neset 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
- 39 Shuangchun Wen, Youwen Wang, Wenhua Su *et al.*. Modulation instability in nonlinear negative-index material [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(6):036617
- 40 Shuangchun Wen, Yuanjiang Xiang, Wenhua Su *et al.*. Role of the anomalous self-steepening effect in modulation instability in negative-index material [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4):1568~1575
- 41 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
- 42 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd edn.. San Diego:Academic, 2001
- 43 Richard W. Ziolkowski, Ehud Heyman. Wave propagation in media having negative permittivity and permeability [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**(5):056625
- 44 V. A. Vysloukh, N. A. Sukhotskova. Influence of third-order dispersion on the generation of a train of picosecond pulses in fiber waveguides due to self-modulation instability [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1987, **17**(11):1509~1511
- 45 M. J. Potosek. Modulation instability in an extended nonlinear Schrodinger equation [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11):921~923
- 46 Anders Höök, Magnus Karlsson. Ultrashort solitons at the minimum-dispersion wavelength; effects of fourth-order dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(17):1388~1390
- 47 F. Kh. Abdullaev, S. A. Darmanyan, S. Bsichoff *et al.*. Modulational instability in optical fibers near the zero dispersion point [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **108**(5):60~64
- 48 F. Kh. Abdullaev, S. A. Darmanyan, S. Bischoff *et al.*. Modulational instability of electromagnetic waves in media with varying nonlinearity [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(1):27~33
- 49 Shuangchun Wen, Dianyuan 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
- 50 H. Zhuo, S. Wen, X. Dai *et al.*. Influence of nonlinear dispersion on modulation instability in metamaterials [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **87**(4):635~641
- 51 Shuangchun Wen, Jinhua Wu, Kangsong Tang *et al.*. Self-focusing and self-defocusing of the optical beam propagation in a nonlinear negative-refractive-index material [C]. *SPIE*, 2005, **5627**:71~75
- 52 Ilya V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Yuri S. Kivshar *et al.*. Nonlinear surface waves in left-handed materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(1):016617
- 53 Alexander K. Popov, Sergey A. Myslivets, Thomas F. George *et al.*. Four-wave mixing, quantum control, and compensating losses in doped negative-index photonic metamaterials [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20):3044~3046