

doi: 10.3788/gzxb20154402.0208002

艾里光束通过负折射率介质的传输特性

许森东, 冯元新

(浙江科技学院 理学院, 杭州 310023)

摘 要: 为了研究艾里光束(Airy beams)通过负折射率介质中的传输特性, 利用 ABCD 矩阵光学理论推导出了 Airy 光束通过负折射率介质的传输解析表达式. 利用该解析表达式得到了 Airy 光束通过负折射率介质的传输特性. 计算结果表明, Airy 光束通过负折射率介质后的自加速和光强都可以通过负折射率介质的工作频率调控. Airy 光束通过负折射率介质的横向偏转系数随传输距离 z 的增大而加速偏转; 同时当传输距离 z 相同而负折射率介质的工作频率不同时, 偏转系数也不相同. Airy 光束的强度和偏转度都可以通过负折射率介质的工作频率调控. 结果显示可以利用负折射率介质的工作频率方便有效地调控 Airy 光束, 研究结果在光学器件设计和医学科学中都有潜在的应用价值.

关键词: 艾里光束; 负折射率介质; 矩阵光学; 传输特性; 光强

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0208002-4

Study on Propagation Properties of Airy Beams through Negative Index Medium

XU Sen-dong, FENG Yuan-xin

(School of Science, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, china)

Abstract: In order to study the propagation characteristics of airy beams through negative index medium, the analytical expression was obtained for airy beams passing through the negative index medium based on the ABCD matrix optics theory. The propagation properties of airy beams passing through a negative index medium were obtained by using the formula. Numerical examples show that the intensity and the deflection position of the beam can be modulated by the frequency of the negative index medium. The deflection coefficient of the Airy beams is accelerate deflect as the frequency increases, different deflection position are obtained when the Airy beams propagating along z direction with different frequency. Both the deflection coefficient and the intensity of the Airy beam can be sensitively controlled by the frequency. The results show that it is convenient and efficient to modulate the Airy beam by the frequency of the negative index medium, the results presented in this paper may have some potential applications in optical device design and can be utilized in medicine science.

Key words: Airy beams; Negative index medium; Matrix optics; Propagation properties; Intensity

OCIS Codes: 080.2730; 080.1510; 140.3460; 160.4760; 270.3430

0 引言

Airy 光束是一种不同寻常的新型光场, 它在自由空间传输时具有衍射自由的基本特征. 另外, 它在传输时, 光斑会在与传输方向垂直的平面内出现横向自加速偏转, Airy 光束将沿着曲线传输^[1,2]. 目前, 国内外学术团队相继研究了标量 Airy 光束在均匀介质^[3]、梯度折射率介质^[4]、湍流大气介质中的传输^[5]; Airy 光束

的傍轴传输^[6]和非傍轴传输^[7], Airy 光束的能流密度以及高斯 Airy 光束的传输^[8], 并取得了令人瞩目的进展. 一维、二维 Airy 光束在各种 ABCD 光学系统中的传输^[9]及双 Airy 光场^[10]和三 Airy 光束的传输^[11]; Airy 光束对生物微粒的驱动^[12]和俘获^[13]等研究也取得了一定的成果.

负折射率材料又称左手材料, 首先在微波范围得到了实现, 目前已经实现了可见光范围内的负折射率

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11204272) 资助

第一作者: 许森东 (1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为人工复合电磁介质. Email: xusendong@163.com

收稿日期: 2014-06-12; 录用日期: 2014-07-16

<http://www.photon.ac.cn>

材料. 科研人员对光束在负折射率材料中的传输进行了大量研究, 向延英等人研究了光束在左手材料中的强度和相位旋转特性^[14]; 刘森等人研究了左手材料中圆偏振光束的反常旋转特性^[15]; 易煦农等人研究了左手材料平板对傍轴高斯光束聚焦特性^[16]; 包建勤等人研究了余弦高斯光束通过左手平板材料的传输特性^[17].

本文利用 ABCD 矩阵光学理论, 研究了 Airy 光束通过负折射率介质的传输特性. 推导了 Airy 光束通过负折射率介质的传输解析表达式. 利用该表达式对 Airy 光束通过负折射率介质的传输特性进行了研究. 计算结果表明, Airy 光束通过负折射率介质后的自加速和光强都可以通过负折射率介质的工作频率调控.

1 理论与方法

1.1 负折射率材料的折射率

本文研究的负折射率介质 (Negative Index Medium, NIM) 为 Drude 模型^[18], 介质的等效介电常数 ϵ_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 可表示为^[19]

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{\omega_{\text{mp}}^2 - \omega_{\text{mo}}^2}{\omega^2 - \omega_{\text{mo}}^2 + i\gamma\omega} \quad (1)$$

式中, ω_{mo} 为构成负折射率材料的金属环的谐振圆频率, ω_{mp} 为磁场等离子体的圆频率, γ 为负折射率介质的损耗特征, ω 为负折射率介质的工作圆频率.

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 - \frac{\omega_{\text{ep}}^2 - \omega_{\text{eo}}^2}{\omega^2 - \omega_{\text{eo}}^2 + i\gamma\omega} \quad (2)$$

式中, ω_{eo} 为电子的谐振圆频率, ω_{ep} 为电子的等离子圆频率, γ 为损耗特征, ω 为工作圆频率.

负折射率介质的折射率为

$$n = \sqrt{\mu_{\text{eff}}\epsilon_{\text{eff}}}$$

1.2 Airy 光束通过负折射率介质的传输特性

在一维傍轴衍射情况, Airy 光束在傍轴近似情况下的波函数 $\mu(\xi, s)$ 可表示为^[20]

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = 0 \quad (3)$$

式中, $s = \frac{x_1}{x_0}$ 为无量纲的横向坐标, x_0 为任意的横向尺度. $\xi = \frac{z}{kx_0^2}$ 归一化的纵向传输距离, $k = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$ 为波数, n 为介质中的折射率.

光束通过负折射率介质的传输矩阵可表示为^[21]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 n 为负折射率介质的折射率, z 为 Airy 光束通过负折射率介质的传输距离.

在初始平面, Airy 光束的初始入射光场可表示为

$$u(x_1) = \text{Ai}\left(\frac{x_1}{x_0}\right) \exp\left(\frac{a_0 x_1}{x_0}\right) \quad (5)$$

a_0 为 Airy 光束的指数调制因子, 是比较小的正数. 当 Airy 光束通过负折射率介质时, 由柯林斯公式可得 Airy 光束为

$$u(x) = \int \sqrt{\frac{ik}{2\pi B}} \exp\left[-i \frac{k}{2B}(Ax_1^2 - 2x_1x + Dx_2^2)\right] \times \text{Ai}\left(\frac{x_1}{x_0}\right) \exp\left(\frac{a_0 x_1}{x_0}\right) dx_1 \quad (6)$$

式中, $\text{Ai}(x)$ 为 Airy 函数, 即

$$\text{Ai}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{iu^3}{3} + iux\right) du \quad (7)$$

把式(5)和式(7)代入式(6)经积分整理可得到 Airy 光束通过负折射率介质的传输方程为

$$u(x) = \frac{1}{\sqrt{A}} \text{Ai}\left(\frac{x}{Ax_0} - \frac{B^2}{4A^2 k^2 x_0^4} + i \frac{a_0 B}{Akx_0^2}\right) \cdot \exp\left(-i \frac{kCx^2}{2A}\right) \times \exp\left(\frac{a_0 x}{Ax_0} - a_0 \frac{B^2}{2A^2 k^2 x_0^4} - i \frac{B^3}{12A^3 k^3 x_0^6} + i \frac{a_0^2 B}{2Akx_0^2} + i \frac{Bx}{2A^2 kx_0^3}\right) \quad (8)$$

式中, A, B, C, D 为 Airy 光束通过负折射率介质的传输矩阵元.

Airy 光束的偏转系数定义为^[20]

$$x_c = \frac{B^2}{4Ak^2 x_0^2} \quad (9)$$

Airy 光束通过负折射率介质的强度为

$$I(x) = u^*(x)u(x) \quad (10)$$

2 计算结果

利用式(9)和(4)得到 Airy 光束通过负折射率介质的横向偏转系数. 负折射率介质的相关参数选取: $f_{\text{mo}} = 12.05$ GHz, $f_{\text{mp}} = 12.95$ GHz, $f_{\text{eo}} = 10.3$ GHz, $\gamma = 10$ MHz, $f_{\text{ep}} = 12.8$ GHz. 频率与圆频率的关系为 $f = \frac{\omega}{2\pi}$; Airy 光束的参数选取: $x_0 = 0.1$ mm, $a_0 = 0.1$, $\lambda_0 = 632$ nm.

图 1 为不同工作频率下 Airy 光束通过负折射率

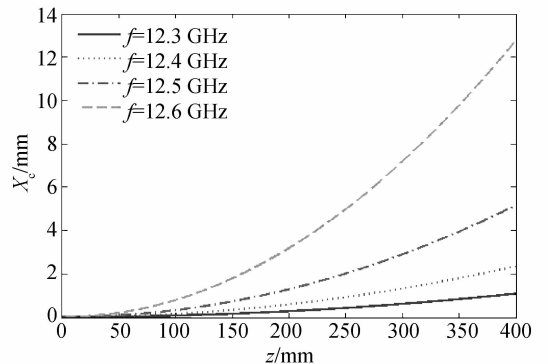
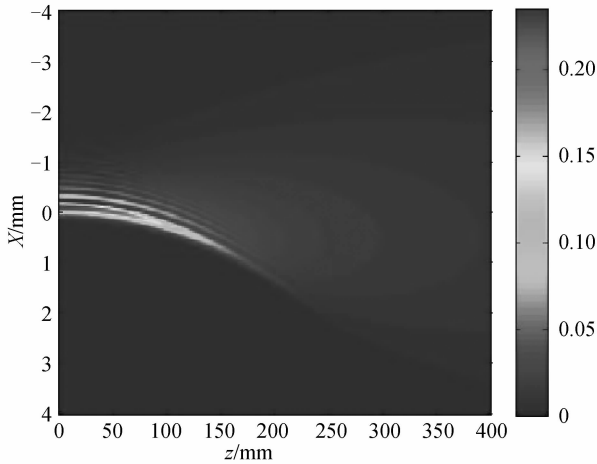


图 1 Airy 光束通过负折射率介质的横向偏转系数随传输距离 z 的改变

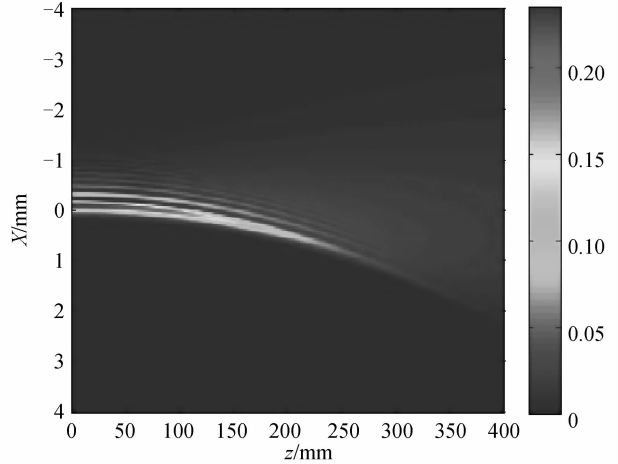
Fig. 1 Changes in the lateral position of the Airy beam when propagating through the NIM with the frequency

介质的横向偏转系数随传输距离 z 的改变. 从图中可以看出, Airy 光束通过负折射率介质的横向偏转系数随传输距离 z 的增大而加速偏转; 同时当传输距离 z 相同而负折射率介质的工作频率不同值时, 偏转系数也不相同.

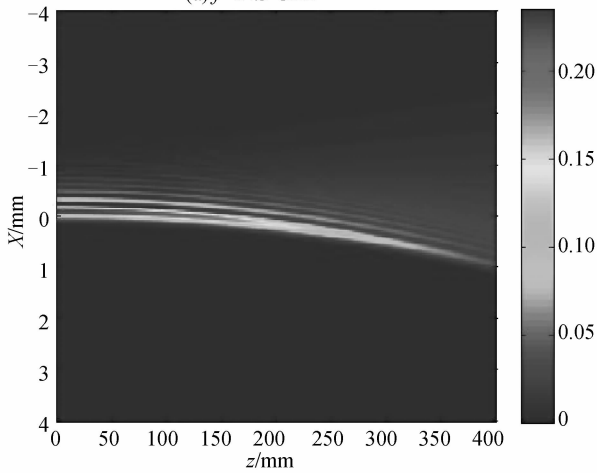
利用式(4)、(8)、(9)得到 Airy 光束通过负折射率



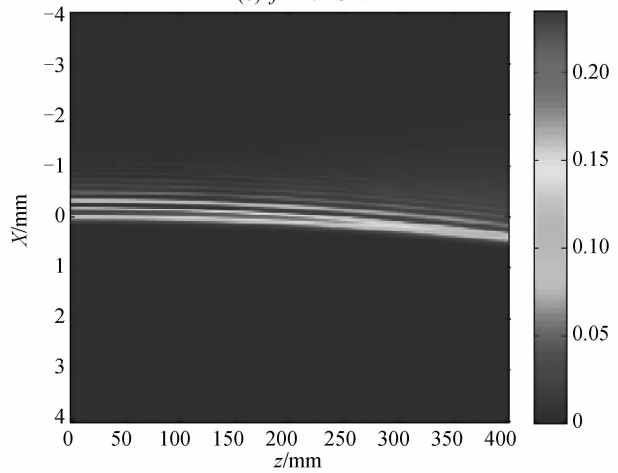
(a) $f=12.3$ GHz



(b) $f=12.4$ GHz



(c) $f=12.5$ GHz



(d) $f=12.6$ GHz

图2 Airy 光束通过不同工作频率的负折射率介质的光强

Fig. 2 Propagation dynamics of a diffraction-free Airy wave passing through the NIM, for different frequency

图3 为在传输距离为 $z=100$ mm、 $z=200$ mm、 $z=300$ mm 时输出平面 Airy 光束的光强随负折射率介质的工作频率变化图. 选取偏转位置 $x=0.5$ mm, 负折射率介质的工作频率选取从 12 GHz 到 12.8 GHz, 结果显示 Airy 光束强度随负折射率介质的工作频率呈震荡变化规律, 不同传输距离下 Airy 光束的光强都有一个强度相同的极大值; 但不同传输距离下处于极大值的工作频率是不同的; 传输距离越小, 处于极大值的工作频率越大. 此结果显示, 可以通过调控负折射率介质的工作频率调控 Airy 光束的光强, 这与前面的分析是一致的.

介质的光强. 图2为 Airy 光束通过不同工作频率的负折射率介质的光强. 从图2可以看出 Airy 光束的强度和偏转度都可以通过负折射率介质的工作频率调控; Airy 光束通过负折射率介质的光强随传输距离 z 的增大而加速偏转. Airy 光束的偏转系数随负折射率介质的工作频率增大而减小.

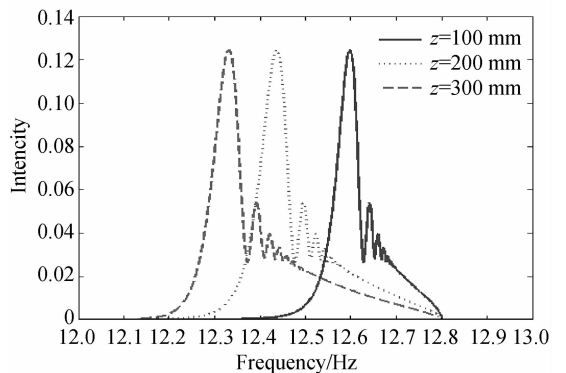


图3 不同传输距离时输出平面 Airy 光束的光强随负折射率介质的工作频率变化

Fig. 3 The intensity of the Airy beam on the different position modulated by the frequency

4 结论

研究了一维有限能量 Airy 光束在负折射介质中的传输特性。研究表明 Airy 光束的偏转度和强度都可以通过负折射材料的工作频率来调控。由于利用经典光场和光子技术对生物系统进行检测、治疗、加工和改造；并在组织光学、医疗光谱技术、新颖激光诊断、激光医疗机理及其作用机理方面有着直接的应用。所以该研究结果在人们利用光场操控技术实现对生物微粒的驱动、俘获、清除、排序以及生物医学中都具有十分重要的潜在应用价值。例如：利用负折射率介质调控 Airy 光束能使分开的神经元连在一起，也可以将营养物质和化合物注入弯曲的活体组织中。

参考文献

- [1] SHI Yao-yao, WU Tong, LIU You-wen, *et al.* Control of self-bending airy beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1401-1407.
施瑶瑶, 吴彤, 刘友文, 等. 艾里光束自弯曲性质的控制[J]. 光子学报, 2013, **42**(12): 1401-1407.
- [2] YU Wen-long, ZHANG Li-fu, TAN Chao, *et al.* Small-scale self-focusing of finite energy airy beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0519001-1-0519001-7.
于文龙, 章礼富, 谭超, 等. 有限能量 Airy 光束的小尺度自聚焦特性研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0519001-1-0519001-7.
- [3] KHONINA S N. Specular and vortical Airy beams[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(19): 4263-4271.
- [4] YE Zhuo-yi, LIU Sheng, LOU Ci-bo, *et al.* Acceleration control of Airy beams with optically induced refractive-index gradient [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(16): 3230-3233.
- [5] CHU Xiu-xiang. Evolution of an Airy beam in turbulence[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(14): 2701-2703.
- [6] TORRE A. Airy beams beyond the paraxia approximation[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(21): 4146-4165.
- [7] NOVISKY A V, NOVISKY D V. Nonparaxial Airy beams: role of evanescent waves[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(21): 3430-3431.
- [8] BANDRES M A, GUTIÉRREZ-VEGA J C. Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical Systems[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(25): 16719-16728.
- [9] MORRIS J E, MAZILU M, BAUMGARTL J, *et al.* Propagation characteristics of Airy beams: dependence upon spatial coherence and wavelength[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 13236-13244.
- [10] HWANG C Y, CHOI D, KIM K Y, *et al.* Dual Airy beam [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 23504-23515.
- [11] ABRAMOCHKIN E, RAZUEYA E. Product of three Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(19): 3731-3734.
- [12] ZHANG Peng, PRAKASH J, ZHANG Ze, *et al.* Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(15): 2883-2885.
- [13] ZHU Zheng, ZHANG Bai-fu, CHEN Hao, *et al.* Optical trapping with focused Airy beams[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(1): 43-49.
- [14] XIANG Yan-ying, LUO Hai-lu, WEN Shuang-chun. Intensity and phase rotation of beams in left-handed metamaterials [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1834-1838.
向延英, 罗海陆, 文双春. 光束在左手材料中的强度和相位旋转特性[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(8): 1834-1838.
- [15] LIU Sen, LUO Hai-lu, WEN Shuang-chun. Anomalous rotation characteristics of circularly polarized beam in left-handed materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(7): 074208-1-074208-8.
刘森, 罗海陆, 文双春. 左手材料中圆偏振光束的反常旋转特性研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(7): 074208-1-074208-8.
- [16] YI Xu-nong, LIU Jin-song, CHEN Huan, *et al.* Analysis of focusing properties for paraxial Gaussian beam focused by a left-handed material slab [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(6): 883-887.
易煦农, 刘劲松, 陈欢, 等. 左手材料平板对傍轴高斯光束聚焦特性分析[J]. 应用光学, 2010, **31**(6): 883-887.
- [17] BAO Jian-qin, ZHANG Ting-rong, HUO Ya-jie. Propagation properties of cosine-Gaussian beam through a left-handed material slab [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, **24**(6): 1231-1237.
包建勤, 张廷蓉, 霍雅洁. 余弦高斯光束通过左手平板材料的传输特性[J]. 光电子·激光, 2013, **24**(6): 1231-1237.
- [18] MICHAEL W F, YURI S K. Sub-wavelength imaging with a left-handed material flat lens[J]. *Physics Letters A*, 2005, **334**(4): 326-330.
- [19] SONG Lei, LI Kang, KONG Fan-min, *et al.* Analysis of negative refractive index materials with the PML-FDTD method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1422-1425.
宋磊, 李康, 孔繁敏, 等. PML-FDTD 法在分析负折射率材料中的应用[J]. 光子学报, 2007, **36**(8): 1422-1425.
- [20] XU Sen-dong, XU Bi-jun. Propagation of Airy beams in electromagnetically induced transparency atomic vapor of Λ -type three-level system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, **30**(9): 554-558.
许森东, 徐弼军. Airy 光束在 Λ 型三能级 EIT 介质中的传输特性研究[J]. 量子电子学报, 2013, **30**(9): 554-558.
- [21] ZHUANG Fei, DU Xin-yue, ZHAO Dao-mu. Modulation in the spectral density and spectral degree of coherence of a Gaussian Schell-model beam through an electromagnetic induced transparency atomic vapor [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, **27**(11): 2279-2283.