

文章编号: 0253-2239(2006)11-1749-6

双曲色散型单轴左手介质中的折射^{*}

曹京晓^{1,2} 胡 巍^{1,2} 罗海陆²

(¹ 华南师范大学光子信息技术实验室, 广州 510006
² 华南师范大学传输光学实验室, 广州 510006)

摘要: 研究了横磁波在各向同性右手介质和双曲色散型单轴左手介质界面处波矢和能流的折射。计算发现, 当入射角在很大范围内变化时, 波矢的折射角和能流的折射角几乎不变。调节光轴角可使波矢折射角和能流折射角随入射角变化不敏感的现象更明显, 经分析计算给出光轴角的调节范围。这一现象是由双曲色散型单轴左手介质的各向异性及负的主折射率引起的, 可以用来实现光束准直、光束整合、光束压缩以及方便的光束耦合。如果光从双曲色散型单轴左手介质向各向同性右手介质入射, 还能实现超棱镜(superprism)现象。计算了横磁波穿越界面时的透过率, 证实双曲色散型单轴左手介质可能实现上述应用。

关键词: 单轴左手介质; 双曲色散方程; 超棱镜现象

中图分类号: O435.1 文献标识码: A

Refraction in Hyperbolic Uniaxial Left-Handed Material

Cao Jingxiao^{1,2} Hu Wei^{1,2} Luo Hailu²

(¹ Laboratory of Light Transmission Optics, South China Normal University, Guangzhou 510006
² Laboratory of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006)

Abstract: Relying on dispersion equation, the refraction angles of wave vector and energy flow of TM wave at the interface between homogeneous right-handed material and hyperbolic uniaxial left-handed material are studied. In a large range of incident angle, the two refraction angles are not sensitive to that the smaller the optical axial angle is, the more evident the phenomena is and the range of the optical axial angle is given. This refraction phenomenon is caused by a negative principal index and anisotropy in hyperbolic uniaxial left-handed material. It is suitable for beam collimation, beam conformity and simple beam coupling. If TM wave is incident on the interface from a hyperbolic uniaxial left-handed material, the effect of superprism will be realized. Further, by analyzing the transmission coefficient, the possibility of above application is proven.

Key words: optical materials; uniaxial left-handed material; hyperbolic dispersion equation; effect of superprism

1 引 言

负折射率介质^[1]的介电常量和磁导率小于零, 电场方向、磁场方向和波矢方向三者构成左手螺旋关系。左手介质有不同于传统右手介质的现象, 例如负折射现象(入射光和折射光在法线同侧)^[2~5]、反多普勒(Doppler)效应、反瓦维洛夫-切伦科夫

(Vavilov-Cerenkov)效应等。左手介质大多是周期性结构。Pendry, Smith 等^[2~5]研究的分裂环类型的谐振型左手介质损耗大, 只能在微波段实现负折射。而 Caloz, Itoh, Eleftheriades, Yijun Feng 等^[6~8]研究的以微带传输线为基础的左手介质是非谐振型的, 损耗不大。各向异性介质也能实现负折射^[9~17]。

* 国家自然科学基金面上项目(60278013)资助课题。

作者简介: 曹京晓(1979~), 女, 华南师范大学硕士研究生, 主要从事负折射率介质中光传输的研究。

E-mail: caojingxiao@vip.163.com

导师简介: 胡 巍(1970~), 男, 华南师范大学信息光电子学院光子信息技术实验室教授, 博士生导师, 主要从事光传输理论和非线性光学的理论及其应用的研究, 包括超短脉冲光束的线性和非线性传输、高功率激光系统中强激光光束传输的理论和数值模拟研究等。E-mail: huwei2000@vip.163.com

收稿日期: 2006-03-03; 收到修改稿日期: 2006-04-18

Nian-Hai Shen 等^[18]分析了无损耗时单轴左手介质应满足的充分必要条件,提出了类各向同性左手介质和光轴面的概念,加深了对各向异性左手介质的理解。Lei Zhou 等^[19]研究了双曲色散型左手介质的各向异性和斜的全透射现象。Grzegorezyk 等^[20]分析了主坐标系下光在双曲色散型各向异性左手介质中的折射规律,发现入射角在很大范围内变化时,双曲色散型各向异性左手介质中能流能实现负折射。

本文计算了传输坐标系下横磁(TM)波在双曲色散型单轴左手介质中的色散关系。分析了横磁波由各向同性右手介质向双曲色散型单轴左手介质入射时界面处波矢和能流的折射。发现波矢和能流的折射在很大范围内几乎不随入射角的变化而变化,能实现光束准直、光束整合、光束压缩^[21]以及光束耦合等。如果光从双曲色散型单轴左手介质向各向同性右手介质入射,还能实现超棱镜(superprism)现象^[22,23]。计算分析发现,光轴角变化,实现波矢和能流的折射随入射角变化不敏感这一现象时,入射角在可变的区间范围发生变化。进一步得到了光轴角的可调范围。最后计算分析了横磁波穿越界面时的磁场振幅透射系数和功率透射系数(即透射率),证实了在双曲色散型单轴左手介质中实现上述应用是可能的。

2 双曲色散型单轴左手介质中光学传输性质

为讨论方便且不失一般性,无损耗双曲色散型单轴左手介质相对介电常量张量 $\boldsymbol{\epsilon}$ 和相对磁导率张量 $\boldsymbol{\mu}$ 在主坐标系(X-Y-Z)中表示为

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

同时介电常量张量和磁导率张量元素满足条件:

$$\epsilon_{\perp} < 0, \quad \epsilon_{\parallel} > 0, \quad \mu_{\perp} < 0, \quad (2)$$

其他条件下可用相同的方法分析得到。各向同性右手介质相对介电常量和相对磁导率分别为 ϵ_r, μ_r 。这

里仅讨论横磁波的情况,横电(TE)波可用相同的方法讨论。如图1引入传输坐标系 xoz , 其中 z 轴与各向同性右手介质和双曲色散型单轴左手介质的界面垂直。传输坐标系 xoz 是在主坐标系 XOZ 基础上绕 y 轴顺时针旋转了 $\pi/2 + \varphi$ 得到^[15,16]。不失一般性,假设波矢位于 xoz 平面内($k_{ly} = 0$),从而得到横磁波在传输坐标系 xoz 中的色散方程:

$$\alpha k_{tx}^2 + \beta k_{tz}^2 + \gamma k_{tx} k_{tz} = k_0^2, \quad (3)$$

这里 $k_0 = \omega/c$, 其中 ω 为入射波的频率, c 为真空中的光速。同时

$$\alpha = \frac{\eta^2 \cos \varphi - \sin^2 \varphi}{\eta^2 \delta^2 \epsilon_r \mu_r},$$

$$\beta = \frac{\eta^2 \sin^2 \varphi - \cos^2 \varphi}{\eta^2 \delta^2 \epsilon_r \mu_r},$$

$$\gamma = -\frac{(1 + \eta^2) \sin 2\varphi}{\eta^2 \delta^2 \epsilon_r \mu_r},$$

而各向异性参量 $\eta = \sqrt{-\epsilon_{\parallel} / \epsilon_{\perp}}$, 相对主折射率 $\delta = \sqrt{\epsilon_{\perp} \cdot \mu_{\perp}} / (\epsilon_r \cdot \mu_r)$ 。(3)式给出了光轴角成任意角度时各波矢分量间的关系。由于 $\mu_{\perp} < 0$, 利用方程(3)得到波矢 z 方向分量为

$$k_{tz} = \frac{-\gamma k_{tx} - \sqrt{(\gamma^2 - 4\alpha\beta)k_{tx}^2 + 4\beta k_0^2}}{2\beta}, \quad (4)$$

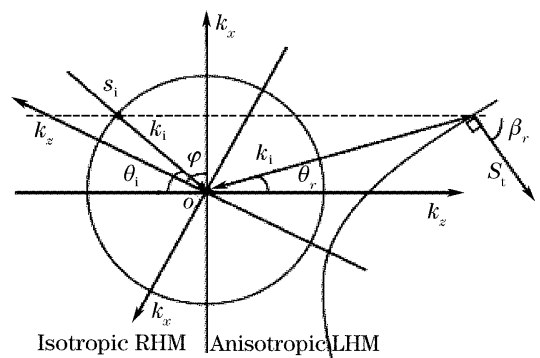


图1 双曲色散型单轴左手介质的折射机理

Fig. 1 Mechanism for refraction by hyperbolic uniaxial left-handed material

在图1中波矢量面为一个二维超表面,波矢和能流的入射角可由 $\theta_i = \arctan(k_{ix}/k_{iz})$ 给出,波矢折射角可由 $\theta_r = \arctan(k_{rx}/k_{rz})$ 得到。由色散方程(3)式和连续性条件 $k_{ix} = k_{rx}$ 即可得到波矢折射角的具体表达式:

$$\theta_r = \arctan \left[\frac{\sin \theta_i (\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi)}{\eta \sqrt{\sin^2 \theta_i - \delta^2 (\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi)} - (1 + \eta^2) \sin \theta_i \sin \varphi \cos \varphi} \right], \quad (5)$$

由于各向异性,双曲色散型单轴左手介质中横磁波能流 S_t 的方向与波矢 k_t 的方向不一致,而与群速度 v_g 的方向一致^[11,24],所以横磁波能流的折射角可由 $\tan \beta_r = v_{gx} / v_{gz}$ 给出。由(4)式及因果律得到横磁波在传输坐标系 xoz 中能流折射角为

$$\beta_r = \arctan \left[\frac{-\eta \sin \theta_i + (1 + \eta^2) \sin \varphi \cos \varphi \sqrt{\sin^2 \theta_i - \delta^2 (\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi)}}{(\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi) \sqrt{\sin^2 \theta_i - \delta^2 (\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi)}} \right], \quad (6)$$

从(5)式和(6)式可知,在双曲色散型单轴左手介质中,波矢折射角和能流折射角的具体表达式不同,所以当波矢发生负折射($\theta_i/\theta_r < 0$),能流有可能发生反常负折射($\theta_i/\beta_r < 0$)。

3 双曲色散型单轴左手介质中的折射

从(5)式、(6)式可以看出,波矢和能流的折射角大小取决于双曲色散型单轴左手介质各向异性参量、相对主折射率、入射角大小和光轴角取值。通过对这些参量的分析可以得到波矢和能流的折射情况。选取归一化参量 $\eta=1.5, \delta=1$, 光轴角 $\varphi=\pi/4, \pi/3, \pi/2$ 。由(5)式和(6)式可得出不同光轴角下波矢折射角与能流折射角随入射角变化的关系,如图 2 所示。

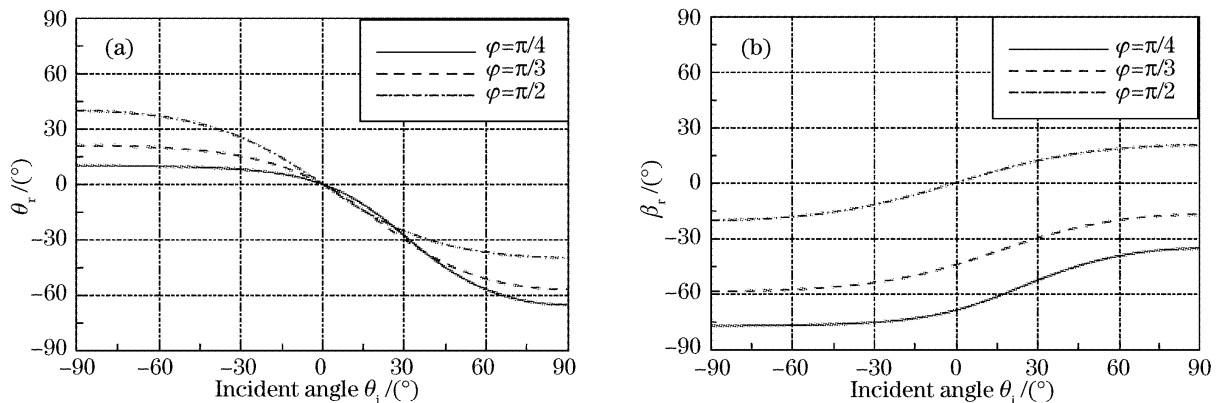


图 2 不同光轴角时双曲色散型单轴左手介质中波矢折射角 θ_r 与入射角 θ_i (a), 能流折射角 β_r 与入射角 θ_i (b) 的关系

Fig. 2 Wave vector refractive angle θ_r as a function of incident angle θ_i (a), refractive angle β_r for energy flow as a function of incident angle θ_i with different angles of optical axis

由图 2(a)可以看出波矢折射角随入射角变化的曲线总通过坐标原点,说明满足条件(2)时的双曲色散型单轴左手介质中波矢均发生负折射,且在 $\theta_i < 0$ 的很大范围内波矢折射角几乎不随入射角变化而变化。由图 2(b)可知入射角在 $\theta_i < 0$ 的很大区间范围内变化,能流发生正折射,且折射角几乎不变。

由图 2 还可以知道光轴角变小,波矢折射角和能流折射角在 $\theta_i < 0$ 的较大区间范围内随入射角的变化不敏感。这是因为色散关系决定光在介质中的折射。光轴角越小, ξ 就越小(这里 ξ 为色散曲线的渐近线与 x 轴的夹角),色散关系曲线就变的更扁,导致波矢折射角和能流折射角在 $\theta_i < 0$ 的较大区间范围内随入射角的变化不敏感。要使双曲色散型单轴左手介质中上述现象更明显,需要光轴角更小,使得在 $\theta_i < 0$ 的更大区间范围内波矢能流的折射角随入射角的变化几乎不变。经计算分析可知光轴角的取值范围为

$$|\varphi| > \arctan[1/\eta], \quad (7)$$

经分析可知,光轴角 $|\varphi| > \arctan[1/\eta]$ 确保入射角在 $-\pi/2\pi \sim \pi/2\pi$ 区间范围变化时,横磁波在各向同

性右手介质和双曲色散型单轴左手介质的界面上不会发生全反射。

通过以上的分析可知,横磁波由各向同性右手介质向双曲色散型单轴左手介质入射,在双曲色散型单轴左手介质中波矢和能流的折射在很大范围内随入射角的变化不敏感。这一现象有很大的潜在应用价值,能实现光束的准直、整合、压缩及耦合等。

这里对双曲色散型单轴左手介质的讨论不考虑损耗,所以光在此类介质中发生正常色散,即光的波长增大,折射率减小。为方便分析,假定这里所研究的双曲色散型单轴左手介质的介电常量张量各元素中^[25], $\epsilon_{\parallel} = 1.5$, 有效的 $\epsilon_{\perp}, \mu_{\perp}$ 为

$$\epsilon_{\perp} = 1 - 30/f^2, \quad \mu_{\perp} = 1 - 23/(f^2 - 2),$$

其中 f 为入射光的频率,单位是 GHz。经分析可知,当入射光的频率 $f < 5$ GHz 时,介电常量张量和磁导率张量的各元素满足(2)中的条件。图 3 给出光轴角为 $\varphi = \pi/4$, 频率分别为 $f = 4.3$ GHz, 4.5 GHz, 4.7 GHz 的横磁波由双曲色散型单轴左手介质向空气中入射时能流折射角 β_r 随入射角 θ_i 的变化。由图 3 可知,在传输坐标系 xoz 中,入射角小于零。对于每一特定频率的横磁波,在一特定角

附近能流的折射角随入射角的变化非常敏感,从而实现了超棱镜现象^[22,23]。这是因为对一特定频率的光,它的色散曲线是一定的。当色散曲线的渐近线与光轴接近平行时,入射角在 $-|\varphi+\xi|\sim-|\varphi|$ 很小的范围变化时,能流折射角会发生很大变化。同样,这里 ξ 仍为色散曲线的渐近线与 x 轴的夹角。

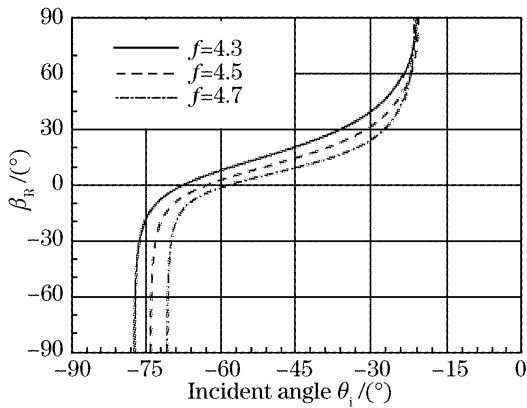


图3 在相同光轴角下不同频率的横磁波由双曲色散型单轴左手介质向空气入射时能流折射角 β_R 与入射角 θ_i 的关系

Fig. 3 Refractive angle β_R for energy flow as a function of incident angle θ_i with different frequencies and equal angle of optical axis from hyperbolic uniaxial left-handed material to air

4 双曲色散型单轴左手介质的透射系数

为证实双曲色散型单轴左手介质中上述潜在应用实现的可能性,需要分析双曲色散型单轴左手介质的透射系数。当横磁波由各向同性右手介质向双曲色散型单轴左手介质入射时,传输坐标系 xoz 下入射波、反射波和折射波磁场表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_i &= H_0 \mathbf{y} \exp(ik_{ix}x + ik_{iz}z - i\omega t), \\ \mathbf{H}_r &= RH_0 \mathbf{y} \exp(ik_{ix}x - ik_{iz}z - i\omega t), \\ \mathbf{H}_t &= TH_0 \mathbf{y} \exp(ik_{ix}x + ik_{iz}z - i\omega t), \end{aligned} \quad (8)$$

其中 R 为磁场反射振幅与入射振幅之比, T 为磁场折射振幅与入射振幅之比^[10]。由麦克斯韦方程组可知入射波、反射波电场矢量和折射波电位移矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i &= \frac{H_0}{\omega \epsilon_r} (k_{ix} \mathbf{x} - k_{iz} \mathbf{z}) \exp(ik_{ix}x + ik_{iz}z - i\omega t), \\ \mathbf{E}_r &= \frac{RH_0}{\omega \epsilon_r} (-k_{ix} \mathbf{x} - k_{iz} \mathbf{z}) \exp(ik_{ix}x - ik_{iz}z - i\omega t), \end{aligned}$$

$$\mathbf{D}_t = \frac{TH_0}{\omega \epsilon_r} (k_{ix} \mathbf{x} - k_{iz} \mathbf{z}) \exp(ik_{ix}x + ik_{iz}z - i\omega t), \quad (9)$$

利用坐标旋转的方法,由边界连续性条件和主坐标系下的物质方程可以解得磁场折射振幅和入射振幅之比为

$$T = \frac{2\delta^2 \eta \cos \theta_i}{\sqrt{\sin^2 \theta_i - \delta^2 (\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi)} + \delta^2 \eta \cos \theta_i}, \quad (10)$$

其中假定 $\mu_{\perp} = -\mu_r$, 所以归一化参量: $\delta = \sqrt{(\epsilon_{\perp} \cdot \mu_{\perp}) / (\epsilon_r \cdot \mu_r)} = \sqrt{-\epsilon_{\perp} / \epsilon_r}$ 。

不同光轴角下横磁波通过各向同性右手介质与双曲色散型单轴左手介质界面时,磁场折射振幅与入射振幅之比 T 和入射角 θ_i 的变化关系如图4所示,这里 $\delta = 1, \eta = 1.5$ 。由图4可知,当光轴角 $\varphi < \pi/2$ 时,入射角在 $\theta_i = 0$ 附近一定区间范围变化, $T > 1$ 。这说明横磁波由界面进入双曲色散型单轴左手介质时,磁场振幅被放大。同时光轴角越小, T_{\max} 越大, $T > 1$ 时入射角的变化范围也越大。

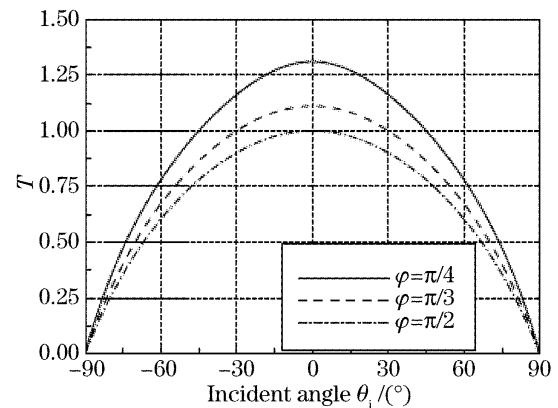


图4 不同光轴角下磁场通过各向同性右手介质与双曲色散型单轴左手介质界面时折射振幅与入射振幅之比 T 与入射角 θ_i 的关系

Fig. 4 Amplitude transmission coefficient T for magnetic field as a function of incident angle θ_i with different angles of optical axis from isotropic right-handed material to hyperbolic uniaxial left-handed material

由(8)式~(10)式还可以得到横磁波入射到各向同性右手介质和双曲色散型单轴左手介质界面时的功率透射系数^[26]为

$$t = \frac{-\mathbf{z} \cdot \langle \mathbf{S}_i \rangle}{-\mathbf{z} \cdot \langle \mathbf{S}_t \rangle} = \frac{4\delta^2 \eta \cos \theta_i \sqrt{\sin^2 \theta_i - \delta^2 (\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi)}}{[\delta^2 \eta \cos \theta_i + \sqrt{\sin^2 \theta_i - \delta^2 (\cos^2 \varphi - \eta^2 \sin^2 \varphi)}]^2}, \quad (11)$$

不同光轴角时横磁波通过各向同性右手介质和双曲色散型单轴左手介质界面, 功率透射系数 t 与入射角 θ_i 的变化关系如图 5 所示, 这里 $\delta=1, \eta=1.5$ 。对比图 4 和图 5 可以看出, 光轴角 $\varphi < \pi/2$ 时, 入射角在 $\theta_i=0$ 附近一定区间范围变化, 虽然磁场折射振幅与入射振幅之比 $T > 1$, 但功率透射系数 t 变小。磁场折射振幅与入射振幅之比 T 越大, 功率透射系数 t 越小。

由图 5 还可以知道, 双曲色散型单轴左手介质中波矢和能流的折射在很大范围内随入射角的变化不敏感的现象是可以实现的。这为设计制造新型光学器件提供了可能。

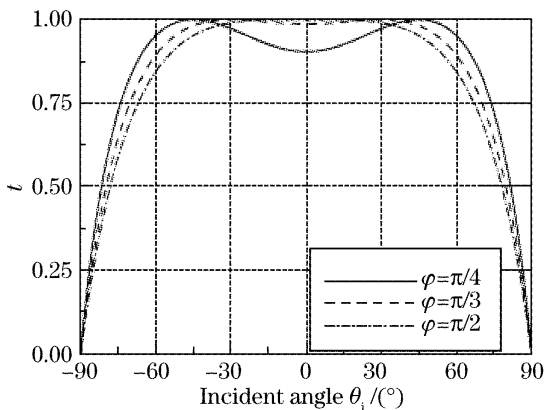


图 5 功率透射系数 t 与入射角 θ_i 的关系

Fig. 5 Power transmission coefficient t for electromagnetic field as a function of incident angle θ_i

5 结 论

在一定范围内, 双曲色散型单轴左手介质中波矢和能流的折射角随入射角的变化不敏感。这一现象不仅由介质本身的各向异性决定, 还与双曲色散型单轴左手介质负的主折射率有关。一束发散角很大的光经双曲色散型单轴左手介质折射后发散角变小, 这相当于透镜的效果; 不同角度的几束光经双曲色散型单轴左手介质被转向同一方向, 几束光整合为一束光。而对振幅透射系数和功率透射系数的分析证明: 在双曲色散型单轴左手介质中, 波矢和能流的折射角随入射角的变化不敏感这一现象的实现是可能的。在理论上也可以设计新的光学器件, 实现光束准直、光束整合、光束压缩^[21] 以及方便的光束耦合。如果光从双曲色散型单轴左手介质向各向同性右手介质入射, 还能实现超棱镜现象^[22,23]。

致谢 感谢与郭旗教授的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 V. G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509~514
- 2 D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18): 4184~4187
- 3 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77~79
- 4 C. G. Parazzoli, R. B. Greegor, K. Li *et al.*. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(10): 1074011~1074014
- 5 Andrew A. Houck, Jeffrey B. Brock, Isaac L. Chuang. Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell's law[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(13): 1374011~1374014
- 6 Christophe Caloz, Tatsuo Itoh. Positive/negative refractive index anisotropic 2-D metamaterials[J]. *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, 2003, **13**(12): 547~549
- 7 George V. Eleftheriades, Ashwin K. Iyer, Peter C. Kremer. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2002, **50**(12): 2702~2712
- 8 Yijun Feng, Xiaohua Teng, Yan Chen *et al.*. Electromagnetic wave propagation in anisotropic metamaterials created by a set of periodic inductor-capacitor circuit networks[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**(24): 2451071~2451079
- 9 I. V. Lindel, S. A. Tretyakov, K. I. Nikoskinen *et al.*. BW media-media with negative parameters, capable of supporting backward waves[J]. *Opt. Technol. Lett.*, 2001, **31**(2): 129~133
- 10 Liangbin Hu, S. T. Chui. Characteristics of electromagnetic wave propagation in uniaxially anisotropic left-handed materials[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**(8): 0851081~0851087
- 11 D. R. Smith, D. Schurig. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(7): 0774051~0774054
- 12 Yong Zhang, B. Fluegel, A. Mascarenhas. Total negative refraction in real crystals for Ballistic electrons and light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(15): 1574041~1574044
- 13 Luo Hailu, Hu Wei, Yi Xunong *et al.*. The vectorial properties of paraxial beams propagating in a uniaxial crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9): 2947~2952 (in Chinese)
罗海陆, 胡 巍, 易煦农 等. 傍轴光束在单轴晶体中传输的矢量性质[J]. *物理学报*, 2004, **53**(9): 2947~2952
- 14 Luo Hailu, Hu Wei, Yi Xunong *et al.*. Investigation of negative refraction in a uniaxial crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1249~1253 (in Chinese)
罗海陆, 胡 巍, 易煦农 等. 单轴晶体中的负折射现象研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1249~1253
- 15 Hailu Luo, Wei Hu, Xunong Yi *et al.*. Amphoteric refraction at the interface between isotropic and anisotropic media[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **254**(4~6): 353~360
- 16 Hu Wei, Luo Hailu, Cao Jingxiao. Anomalous positive refraction in anisotropic left-handed materials[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(8): 2069~2072
- 17 Zheng Liu, Zhifang Lin, S. T. Chui. Negative refraction and omnidirectional total transmission at a planar interface associated with a uniaxial medium[J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **69**(11): 1154021~1154026
- 18 Nian-Hai Shen, Qin Wang, Jing Chen *et al.*. Optical uniaxial left-handed materials [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**(15): 1531041~1531044

- 19 Lei Zhou, C. T. Chan, P. Sheng. Anisotropy and oblique total transmission at a planar negative-index interface[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(11): 1154241~1154245
- 20 Tomasz M. Grzegorzczak, Madhusudhan Nikku, Xudong Chen *et al.*. Refraction laws for anisotropic media and their application to left-handed materials [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2005, **50**(4): 1443~1450
- 21 O. E. Martinez, J. P. Gordon, R. L. Fork. Negative group-velocity dispersion using refraction[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(10): 1003~1006
- 22 Hideo Kosaka, Takayuki Kawashima, Akihisa Tomita *et al.*. Superprism phenomena in photonic crystals[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(16): 10096~10099
- 23 Tushar Prasad, Vicki Colvin, Daniel Mittleman. Superprism phenomenon in three-dimensional macroporous photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67**(16): 1651031~1651037
- 24 Hermann A. Haus. *Wave and Fields in Optoelectronics* [M]. 1st ed., New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1984. 311~312
- 25 David R. Smith, Norman Kroll. Negative refractive index in left-handed materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14): 2933~2936
- 26 Jin Au Kong. *Electromagnetic Waves Theory* [M]. Wu Ji *et al.* translate, 1st ed., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 210~213 (in Chinese)
Jin Au Kong. 电磁波理论[M]. 吴季等译. 北京: 电子工业出版社, 2003. 210~213