

采用负折射率材料提高空间 望远镜分辨率的理论研究

任百川^{1,2}, 钟兴^{1,2}, 金光¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:传统的空间望远镜是根据分辨率衍射极限公式,通过增大系统的通光口径来提高分辨率的,但这样系统的体积和重量相应增大,增加了空间运载的难度。负折射率材料(Negative Index Materials, NIMs)的出现,为高分辨率空间望远镜的发展提供了新的思路。NIMs对含有物体精细结构信息但在真空中随距离指数衰减传播的渐失场有增益放大作用,从而使渐失场能够参与成像,实现光学系统传统分辨率衍射极限的突破。本文介绍了NIMs的研究历史,分析了由负折射产生的负群速度、逆 Doppler 频移、反常 Cerenkov 辐射、负折射等各种效应,重点讨论了采用 NIMs 实现望远系统传统分辨率突破的内涵和意义以及今后研究工作的重点。

关键词:负折射率材料;空间望远镜;分辨率;渐失场

中图分类号:TH743; O437 **文献标识码:**A

Study on negative index metamaterials for improving space telescope resolution

REN Bai-chuan^{1,2}, ZHONG Xing,^{1,2} JIN Guang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Traditional space telescopes can improve the resolution by increasing the system aperture in accordance with the diffraction limit formula of resolution. However, as the corresponding volume and weight of the system are increased, it is difficult to be carried on a spacecraft. The emergence of Negative Index Materials (NIMs) provides a new way for the development of high-resolution space telescopes. This paper introduces the history and research of NIMs and outlines their special properties, such as negative group velocity, inverse Doppler effect, abnormal Cerenkov radiation and negative refraction effect, then it discusses the functions of NIMs and why the NIMs can be used to improve the telescope resolution. It points out that NIMs amplify evanescent fields containing information of the fine structure of objects and decaying exponentially in a vacuum

with distance, so that the evanescent fields can participate in imaging. These properties of the NIMs make the resolution of an optical system better than the traditional diffraction limit.

Key words: Negative Index Materials (NIMs); space telescope; resolution; evanescent field

1 引言

近几年来,负折射率材料(Negative Index Materials, NIMs)由于其独特新颖的物理性质和诱人的应用前景而获得了国际学术界的广泛关注,并已成为当前国际电磁学界和光电子学界非常前沿和热门的研究领域之一。在经典电动力学理论中,介电材料的电磁特性由介电常量 ϵ 和磁导率 μ 两个宏观参数来描述。自然界中物质的 ϵ 和 μ 都是正数,电场矢量、磁场矢量和波矢量三者构成右手螺旋关系。1968年,前苏联物理学家Veselago预言在一个具有负的介电常量和负的磁导率的介质中,电磁波传播的相速度方向与能流的方向是相反的,于是电磁波的电场矢量、磁场矢量和波矢量构成左手螺旋关系,这种材料被称为左手材料(Left Handed Materials, LHMs)^[1,8]。Veselago还进一步论证了当材料的介电常数 ϵ 和磁导率 μ 都是负值时,材料的折射率为负值,所以这种材料也被称为NIMs,并同时指出,电磁波在LHMs中的行为与在右手材料中相反,比如光的负折射、反常Cerenkov辐射、逆Doppler效应等等。

2 负折射率材料的研究现状

2.1 国外 NIMs 的发展状况

1968年,前苏联物理学家V. G. Veselago提出左手化媒质的物理思想,指出该种材料的 ϵ 和 μ 可同时取负值。

1996~1999年,英国科学家Pendry等人相继提出了用周期性排列的金属条和开口金属谐振环(Split-ring Resonator)可以在微波波段产生负等效介电常数和负等效磁导率。

2001年,美国California大学San Diego分校的David Smith等物理学家根据Pendry等人的建议,利用以铜为主的复合材料首次制造出在微波

波段具有负介电常数、负磁导率的物质,如图1所示。他们使一束微波射入铜环和铜线构成的人工介质,在微波段以负角度偏转,从而证明了NIMs的存在^[7];Shelby等人首次在实验上证实了当电磁波斜入射到负折射率材料与右手材料的分界面时,折射波的方向与入射波的方向在分界面法线的同侧。

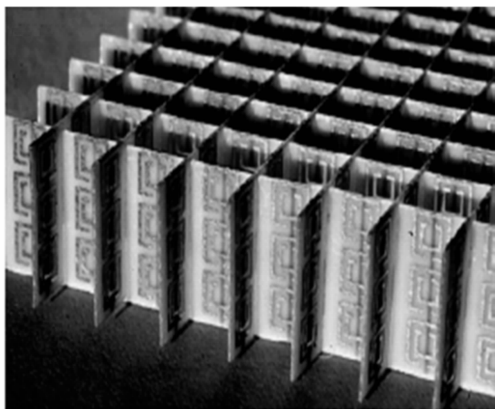


图1 微波波段 NIMs

Fig. 1 NIMs for microwave

2003年,美国西雅图Boeing Phantom Works的C. Parazzoli与加拿大Toronto大学电机系的G. Eleoheriades所领导的两组研究人员在实验中直接观测到了负折射现象;Iowa State大学的S. Foteinopoulou也发表了利用光子晶体作为介质的左手物质理论仿真结果;美国Massachusetts理工学院的E. Cubukcu和K. Aydin在*Nature*杂志发表文章,描述了电磁波在两维光子晶体中的负折射现象的实验结果;Parazzoli等人则在实验和数值模拟上进一步验证了NIMs中的Snell定律。

自2005年以来,理论和实验科学工作者开始研究光频负折射率材料。

2.2 我国 NIMs 的研究进展

同济大学波耳固体物理研究所陈鸿教授带领的研究小组从2001年开始对NIMs展开研究,在

基础理论、材料制备与表征方面取得了重大进展,其成果在国际著名物理学刊物上发表。复旦大学的资剑教授领导的研究小组利用水的表面波散射成功实现了左手介质超平面成像实验,论文发表于著名的 *Physics Review* 杂志上。

2.3 NIMs 的若干应用

LHMs 在其特性频带范围内对电磁波有较高的传输,即实现电磁波从原来的禁带到导带的转变,可以有效地降低特定频带范围的电磁波反射,利用这一特性可以设计出良好的吸波材料并应用到隐身领域中。另外 Pendry 对 LHMs 可制成超级透镜进行了预言,利用 LHMs 的负折射特性,LHMs 平板可使点源发出的波重新汇聚,可以进行微波镜像分析,在军事中起到隐蔽天线的作用。微波段 LHMs 可用作延迟线、耦合器、天线收发转换开关、固态天线、微型反向天线、平板聚焦透镜、带通滤波器及光导航等。

红外与可见光频段负折射率材料制成理想的透镜,可用于制造聚焦性能优异的光驱读写头。利用 LHMs 的独特性质,还有望制作出具有超高分辨率的扁平光学透镜,其分辨率比常规光学透镜高几百倍;LHMs 也有望解决高密度近场光存储遇到的光学分辨率极限问题,可能制作出存储容量比现有 DVD 高几个数量级的新型光学存储系统。

2.4 NIMs 的实现途径^[9-12]

微波波段 NIMs 有两种实现途径,一种是基于开口谐振环和金属线构造,如图 1 所示,另一种是 LC 传输线网络,如图 2 所示。

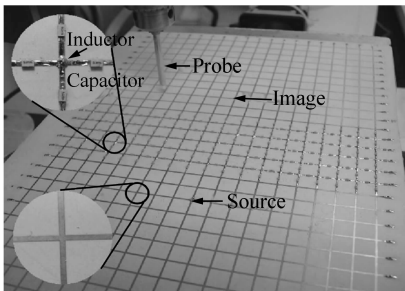


图 2 微波波段实现超分辨

Fig. 2 Improve resolution on microwave

光波段实现负折射率方法之一是采用单层薄

银膜对发出极化波电场平行于入射面光源在很靠近的区域内成像;而另一个途径就是采用光子晶体人工材料。光子晶体是一种介电常数随空间周期性变化的新型光学微结构材料。光子在光子晶体中的运动规律与电子在晶体中的运动规律类似,具有类似于半导体的光子能带和光子能隙。由于在 Brillouin 区边界附近存在着强烈的非线性色散关系,可以通过改变光子晶体中材料的介电常数和巧妙利用几何关系因素来实现负的折射现象。尽管如此,光子晶体也是带有周期微结构的负折射率人工材料,其结构都相对复杂,在制作三维结构上存在较大的难度,因此寻找易于构造的负折射率人工媒质是很有必要的。

3 NIMs 的光学特性

3.1 波矢方向与能流方向相反

在同时具有负介电常数和负磁导率的负折射率介质中传播的平面波,其电场矢量 \mathbf{E} 、磁场矢量 \mathbf{H} 和波矢 \mathbf{k} 三者的矢量方向符合左手螺旋关系即左手法则,而不是正折射率介质所符合的右手螺旋关系即右手法则。根据电磁学理论,在任一种介质中传播电磁波的能流方向即坡印亭矢量 \mathbf{S} 的方向和 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 的关系始终满足 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$,即在因果律下不管在何种介质中, \mathbf{S} 、 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 三者始终满足的是右手螺旋关系。因此正折射率介质中平面电磁波的能流方向和波矢方向是相同的,而在 NIMs 中,平面电磁波的能流方向和波矢方向是相反的。这也意味着在 NIMs 中,群速度和相速度的方向也是相反的。

3.2 负群速度与逆 Doppler 频移效应

电磁波能量为坡印亭矢量 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$,在正常材料中 \mathbf{k} 和 \mathbf{S} 总是同方向,即相速和群速方向是一致的,但在 NIMs 中这两个方向却正好相反。在正常材料中,波源和观察者如果发生相对移动,会出现所谓的 Doppler 效应:两者相向而行,观察者接受到的频率会升高,反之会降低。而在 NIMs 中因为波的能量传播方向和相位传播方向相反,这将导致如果二者相向而行,观察者接受到的频率会降低,反之则会升高,从而出现逆 Doppler 频移效应。

3.3 反常 Cerenkov 辐射

当带电粒子在介质中匀速运动时会在其周围引起诱导电流,诱导电流激发次波,当粒子速度超过介质中光速时,这些次波与原来粒子的电磁场互相干涉,从而辐射出电磁场,称为 Cerenkov 辐射。正常材料中,干涉后形成的波面,即等相面是一个锥面。电磁波能量沿此锥面的法线方向辐射出去,是向前辐射的,形成一个向后的锥角,即能量辐射的方向与粒子运动方向有夹角 θ , θ 由公式 $\cos\theta = c/nv$ 确定,其中 v 是粒子运动的速度。而在负群速度介质中,能量的传播方向与相速相反,因而辐射将背向粒子的运动方向,辐射方向形成一个向前的锥角。图 3 所示为两种情况下的 Cerenkov 辐射情形。

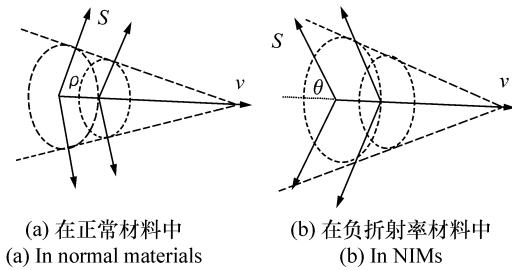


图 3 Cerenkov 辐射
Fig. 3 Cerenkov radiation

3.4 NIMs 中的 Snell'法则

NIMs 的折射率是负值 $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$, 代入 Snell'

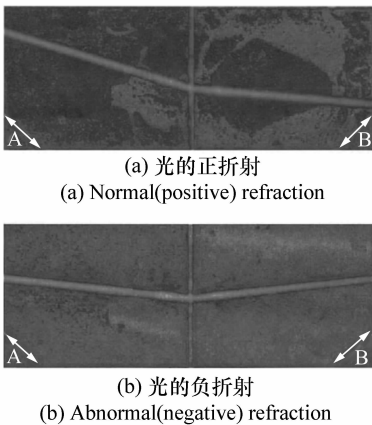


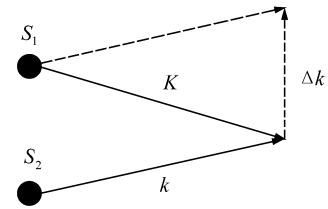
图 4 YVO₄晶体中光的正折射和负折射传播
Fig. 4 Light propagation in a YVO₄ bicrystal

负,即折射光线与入射光线在法线同侧。实验也证实了这个现象,如图 4 所示。

4 NIMs 实现传统光学系统分辨率的突破

4.1 Heisenberg 测不准原理与传统光学系统分辨率极限

由 Heisenberg 测不准原理推出的分辨率极限与 Rayleigh 判据在显微镜中相同,可以得知 Heisenberg 测不准原理是更为普适的分辨率极限判定标准,而且适用于近场成像的分辨率极限判定,公式的推导如下, S_1 、 S_2 为两个物点。



$$\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$$

$$p = \hbar k$$

$$\Delta x \cdot \Delta k \approx 1$$

$$\Delta k_{\max} = 2k$$

$$\Delta x_{\min} \approx 1/2k$$

式(1)为不确定性公式, Δx 在这里为要分辨的两波源间距, p 为波源发出的光波动量, k 为波矢, 由公式可知当取 $k = 1/\lambda$ 时, 能分辨的最小距离 $\Delta x_{\min} = \lambda/2$, 这与 Rayleigh 判据在显微镜中相同。

4.2 渐失场与物体精细结构信息

Wolf 和 Nieto-Vesperinas 从理论上研究得出一个定理:入射一个有限物体的一束光必然被转换成传播场和渐失场。入射场既可以是传播场也可以是渐失场,渐失场存在于物体的表面波长数量级范围内。无穷小的物体是一种结构严重不连续的物体,包含从零到无穷所有的空间 Fourier 频谱分量。扩展的物体可以认为是由具有突变边缘的一系列无限小物体排列而成。渐失场含有有限物体 Fourier 空间频谱信息中的高频部分,即含有物体精细结构信息^[5]。

法则可得出光线在正负折射率材料界面折射角为

一个振荡频率为 ω 的无限小偶极子, 电场强度用二维 Fourier 展开得:

$$E(r, t) = \sum_{\sigma, k_x, k_y} E_{\sigma}(k_x, k_y) \times \exp(ik_z z + ik_x x + ik_y y - i\omega t), \quad (1)$$

式中, r 为光波的传播距离。

取透镜的光轴为 z 轴, 由 Maxwell 方程可知:

$$k_z = +\sqrt{\omega^2 c^{-2} - k_x^2 - k_y^2}, \quad \omega^2 c^{-2} > k_x^2 + k_y^2, \quad (2)$$

式中, c 为光速。

成像过程中透镜的作用是对每一个 Fourier 展开成分进行相位修正, 以使在透镜外一定距离的成份重新聚焦到焦点, 出现偶极子的像。但是, 在这个过程中有一些高频部分没能参与成像: 对于更大横向波矢值,

$$k_z = +i\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - \omega^2 c^{-2}}, \quad \omega^2 c^{-2} < k_x^2 + k_y^2, \quad (3)$$

这样的波就是倏逝波, 其随着 z 轴的传播距离指数地衰减, 没有相位修正可以使它们恢复合适的幅度, 所以它们没能传播到通常仅包含传播波的像, 即没能参与成像。而传播波局限于:

$$k_x^2 + k_y^2 < \omega^2 c^{-2}, \quad (4)$$

因此无论透镜多完美和无论孔有多大, 像的最大分辨率(本例的不确定性关系):

$$\Delta \approx \frac{2\pi}{k_{\max}} = 2\pi \frac{c}{\omega} = \lambda, \quad (5)$$

作为倏逝波的渐失场含有有限物体 Fourier 空间频谱信息中的高频部分, 即含有物体精细结构信息, 这与倏逝波 $\omega^2 c^{-2} < k_x^2 + k_y^2$ 相互印证, 因此从公式(5)可知理论上渐失场成像的最小分辨率是没有极限的。但渐失场在传统的正折射率材料中以指数形式随传播距离衰减, 因此, 从物体发出的包含物体精细结构信息的渐失场经过一个很短的距离后, 通常太弱, 不能够参与成像。

4.3 渐失场参与成像实现传统分辨率极限的突破

渐失场在 NIMs 中的衰减指数符号与正折射率材料相反, 所以不同于正折射率材料, 渐失场在 NIMs 中传播时强度会指数地增加。

NIMs 提高光学系统分辨率的基本原理是通过包含被观测物体精细结构信息的渐失场进行增益调制, 使其参与成像, 从而实现超分辨。近年

发展已经很成熟的近场光学显微镜就是利用这个原理, 通过探针探测靠近被观测物表面的包含被观测物精细结构信息的渐失场, 从而突破显微镜分辨的衍射极限。

由于 NIMs 对含有物体精细结构信息但在真空中随距离指数衰减传播的渐失场有增益放大作用, 从而使渐失场能够参与成像。在理论上 NIMs 光学系统不存在分辨衍射限, 其最小分辨细节不再受限于波长 λ 。虽然在实际应用中, 介质的损耗等因素也会影响 NIMs 光学系统的分辨率, 但微波波段的实验(图 2 所示)已经证明 NIMs 的应用可以突破传统分辨的衍射极限。该实验中分辨率从衍射极限 0.36λ 提高到了 0.21λ ^[4]。

目前, 国外利用 NIMs 突破衍射极限提高光学系统分辨率处于微波波段近场成像的试验阶段。2004 年 2 月, 俄罗斯莫斯科理论与应用电磁学研究所的物理学家宣布他们研制成功一种具有超级分辨率的镜片, 但是他们的技术要求被观察的物体几乎接触到镜片, 在实际应用中难以操作。同年加拿大 Toronto 大学的科学家制造出一种左手镜片, 其工作原理与具有微波波长的射线有关, 这种射线在电磁波频谱中的位置紧邻无线电波。

4.4 NIMs 提高空间望远镜分辨率的可行性

国外有人提出用 NIMs 做一个补偿器, 用于空间望远镜, 对反射镜反射下来的渐失场进行增益补偿, 使其参与成像, 从而实现空间望远镜分辨

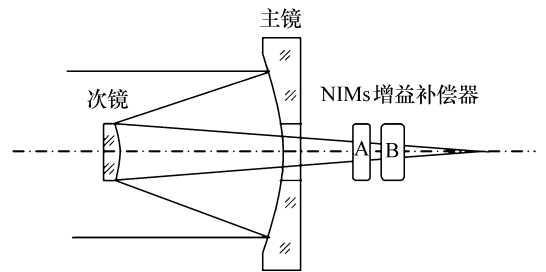


图5 采用 NIMs 的 Cassegrain 式望远镜

Fig. 5 Cassegrain telescope using NIMs

率的突破^[6]。其基本结构形式如图 5 所示, 在经典 Cassegrain 式望远镜的像平面前是用 NIMs 制作的补偿器, 该补偿器相当于一个高带通滤波器, 其中 A 是一个变折射率的旋转器, 用于改变光线的偏折方向使其都汇聚到焦点, B 是负折射率透

镜,用于对渐失场进行增益放大,使其参与成像。渐失场成像的锐度很高,目前电子器件成像阵列不能满足分辨的要求,所以这个补偿器还要包括一个用 NIMs 制作的圆柱透镜,对渐失场成的像进行放大。

这只是个初步的构思,在具体实现上还存在一些困难。从物体表面发出的渐失场的确含有物体的精细结构信息,但渐失场存在于物体表面很近的范围,望远镜与被观测物体距离都很远,渐失场在传播过程中指数衰减,到达反射镜的部分会近乎没有。NIMs 能对渐失场进行增益放大,但怎样合理的结构形式的 NIMs 能把衰减到近乎没有的渐失场放大到可以参与成像的程度是个技术难

点。NIMs 对渐失场的增益放大特性给空间望远镜系统传统分辨率的突破带来可行性,并有很大的研究空间。

5 结束语

利用 NIMs 可以实现光学系统传统分辨率极限的突破,但目前由于含有物体精细结构信息的渐失场的特性还局限于近场成像,研究如何实现渐失场的远场成像对于提高空间望远镜的分辨率具有启发性。NIMs 的出现对传统光学系统的发展有重要的意义,其在传统光学系统中的进一步应用还有待更深入的研究。

参考文献:

- [1] VESELAGO V, BRAGINSKY V, SHKOCVER L, *et al.*. Negative refractive index materials[J]. *J. Computational and Theoretical Nanoscience*, 2006, 3(2):1-30.
- [2] PENDRY J B, RAMAKRISHNA S A. Refining the perfect lens[J]. *Physica B*, 2003, 338:329-332.
- [3] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85(18):3966-3969.
- [4] GRBIC A, ELEFTHERIADES G V. Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92(11):117403
- [5] 张树霖. 近场光学显微镜及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2000.
ZHANG SH L. *Scanning Near-field Optical Microscopy and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [6] MAY J, JENNETTI T. Telescope resolution using negative refractive index materials[J]. *SPIE*, 2004, 5166:220-227.
- [7] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84:4184-4187.
- [8] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, 10:509-514.
- [9] ELEFTHERIADES G V, BALMAIN K G. Negative Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications[M]. Wiley-IEEE Press, 2005.
- [10] PARAZZOLI C G, GREGOR R B, KOLTENBAH B E C, *et al.*. . Simulation, design and test of a graded negative index of refraction lens[C]. EPFL Latsis Symposium Negative Refraction; Revisiting Electromagnetics from Microwaves to Optics, Lausanne Switzerland, 2005.
- [11] ZHANG S, FAN W, MINHAS B K, *et al.*. . Midinfrared resonant magnetic nanostructure exhibiting a negative permeability [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94:037402
- [12] GRIGORENKO A N, GEIM A K, GLEESON H F, *et al.*. . Nanofabricated media with negative permeability and visible frequencies[J]. *Nature*, 2005, 438(7066):335-338.
- [13] PENDRY J B. A chiral route to negative refraction[J]. *Science*, 2004, 306(57001):1353-1356.

作者简介:任百川(1984—),男,河北赞皇人,博士研究生,主要从事光学工程方面的研究。E-mail:renbc@yahoo. cn

钟 兴(1982—),男,四川自贡人,博士研究生,主要从事空间光学系统应用的研究。E-mail:ciomper@163. com

金 光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感光机总体设计的研究。

E-mail:jjing@ciomp. ac. cn