

折射率正负梯度交替表面的研究

刘晓波 刘明黎 陈建忠 施宏宇 陈博 蒋延生 徐卓 张安学

Study of positive and negative gradient refractive index alternant surface

Liu Xiao-Bo Liu Ming-Li Chen Jian-Zhong Shi Hong-Yu Chen Bo Jiang Yan-Sheng Xu Zhuo  
Zhang An-Xue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 084202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

镁基合金自由枝晶生长的相场模拟研究

Phase-field modeling of free dendritic growth of magnesium based alloy

物理学报.2015, 64(6): 060201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060201>

折射率梯度表面机理的研究

Studies on the mechanism of refractive index gradient surface

物理学报.2014, 63(21): 214201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214201>

黏弹性问题的改进的复变量无单元 Galerkin 方法

Improved complex variable element-free Galerkin method for viscoelasticity problems

物理学报.2014, 63(18): 180203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.180203>

新型发光二极管透镜产生局域空心光束

Optical bottle beam generated by a new type of light emitting diode lens

物理学报.2014, 63(7): 074201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074201>

用于相位突变界面的广义的反射定律和折射定律

General laws of reflection and refraction for metasurface with phase discontinuity

物理学报.2013, 62(10): 104201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104201>

# 折射率正负梯度交替表面的研究\*

刘晓波<sup>1)</sup> 刘明黎<sup>2)</sup> 陈建忠<sup>1)</sup> 施宏宇<sup>1)</sup> 陈博<sup>1)</sup>  
蒋延生<sup>1)</sup> 徐卓<sup>1)</sup> 张安学<sup>1)†</sup>

1)(西安交通大学信息与通信工程系, 微波工程与光通信研究所, 西安 710049)

2)(河南工业职业技术学院, 电子信息工程技术系, 南阳 473005)

(2014年9月2日收到; 2014年10月17日收到修改稿)

利用不均匀材料提出了一种折射率正负梯度交替表面, 并利用几何光学法和电磁场数值仿真方法对其机理进行了研究与验证, 发现其可以操控电磁波的传播: 在一定的参数下, 其可以将空间中的入射电磁波一直束缚在介质中, 或在介质中传播一定距离后再实现电磁波的释放; 同时该结构具有宽带、极化无关等特性. 利用该结构可引导能流, 减小后向散射截面, 可用作隐身表面.

**关键词:** 折射率正负梯度交替表面, 几何光学法, 隐身表面

**PACS:** 42.25.Gy, 02.60.Cb

**DOI:** 10.7498/aps.64.084202

## 1 引言

近些年来, 随着超材料技术的发展, 目标的电磁隐身引起了科学界的极大兴趣. 在此之前, 传统电磁隐身主要采用外观设计或者涂敷吸波材料等方法. 自超材料及其衍生超表面等概念出现后, 由于其具有传统材料所不具备的电磁特性, 在多个方面迅速得到研究与应用. Pendry等<sup>[1]</sup>基于电磁坐标变换理论, 将电磁参数等效为“空间”弯曲, 推导了圆柱与球体的完美电磁隐身参数, 并利用超材料实现了上述结构; 在Pendry之后, 基于同样的方法, 得到了椭圆柱、方形、正多棱柱、任意多面体等<sup>[2-7]</sup>的完美电磁隐身参数; 而利用超表面的广义Snell定律, 可实现自由入射波到异常反射波或表面波的转化, 实现对波束的调控, 通过精心的结构设计, 可有效减小电磁波散射截面<sup>[8-10]</sup>. 李勇峰等<sup>[11]</sup>基于此设计了一种宽频带相位梯度超表面, 有效缩减了雷达散射截面.

上述学者的工作推动了超材料研究的进展, 但完美电磁隐身材料参数多为坐标相关的张量形式,

在工程应用与实现上受到一定限制; 而传统的超表面又多受到带宽、极化方式等因素的影响. 本文设计了一种折射率正负梯度交替表面, 该结构具有宽带、极化无关等特性, 同时其可以调控电磁波的传播, 通过引导能流来减小散射截面, 用作隐身表面.

## 2 折射率正负梯度交替表面

图1为本文所建立的折射率正负梯度交替结构表面模型示意图, 该模型由空气、介质(厚度为 $d$ )、理想金属板构成. 其中, 入射波(记为I, 入射角为 $\theta_{i0}$ )从空气入射至空气介质分界面( $x_0, 0$ ), 透射到介质中的波记为II, 透射角为 $\theta_{t0}$ ; 对于波II, 其先入射到( $x_1, -d$ )处发生反射, 之后又传播到空气介质分界面( $x_2, 0$ )发生全反射(入射角为 $\theta_{i2}$ , 反射波记为波III), 设此过程波II处于折射率正梯度介质中(为简化研究, 假设波II在正折射率介质中仅发生一次全反射); 之后波III在折射率负梯度介质中先入射到( $x_3, -d$ )处发生反射, 之后又传播到空气介质分界面( $x_4, 0$ )发生透射(透射角为 $\theta_{t4}$ , 透射波记为IV).

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 61331005)和国家自然科学基金(批准号: 61471292, 61001039)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: anxuezhang@mail.xjtu.edu.cn

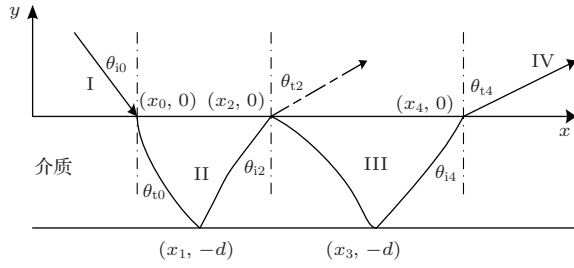


图1 折射率正负梯度交替表面模型示意图

Fig. 1. Schematic diagram of positive and negative gradient refractive index alternating surface.

在如图1所示的模型中, 介质折射率沿  $x$  方向满足正负梯度变化:

$$n_1(x) = 1 + \alpha_1 \times x, \quad (1)$$

$$n_2(x) = 1 + \alpha_1 \times x_2 - \alpha_2 \times (x - x_2), \quad (2)$$

其中,  $n_1$  为正梯度的折射率,  $n_2$  为负梯度的折射率,  $n_1 \geq 1, n_2 \geq 1; \alpha_1, \alpha_2$  为正常数.

根据文献[12], 可以在全反射点  $(x_2, 0)$  空气一侧虚拟地引入一束透射波, 其透射角  $\theta_{t2}$  与入射角  $\theta_{i2}$  满足折射定律, 由此我们可求得入射角  $\theta_{i0}$ , 入射点介质折射率  $n(x_0)$ , 透射角  $\theta_{t2}$  及全反射点  $(x_2, 0)$  满足下式:

$$\ln \frac{\sin \theta_{t2} + \sqrt{n(x_0)^2 - \sin^2 \theta_{i0}^2 + \sin^2 \theta_{t2}^2}}{n(x_0) + \sin \theta_{i0}} = \frac{2\alpha_1 d}{\sqrt{n(x_0)^2 - \sin^2 \theta_{i0}^2}}, \quad (3)$$

$$n(x_2) = \sqrt{\sin^2 \theta_{t2} + n^2(x_0) - \sin^2 \theta_{i0}}. \quad (4)$$

当  $n(x_0) \geq n_t = \sin \theta_{i0} + 4\alpha d$  时, (3) 式可化简为

$$\sin \theta_{t2} = \sin \theta_{i0} + 2\alpha_1 d. \quad (5)$$

显然, 在适当参数下,  $\sin \theta_{t2} \geq 1$  即波 II 发生了全反射. 同样, 我们也为波 III 在全反射点  $(x_2, 0)$  空气一侧虚拟地引入一束入射波, 由于折射定律和反射定律的成立, 可以判定虚拟入射波的入射角为  $\theta_{t2}$ , 这样对于折射率负梯度介质中的物理过程, 同样可以利用文献[12]中的结论进行分析处理. 由此得出: 对透射波 IV, 当  $n(x_2) \geq n_t = \sin \theta_{t2} - 4\alpha_2 d$  时, 透射角  $\theta_{t4}$  满足下式:

$$\begin{aligned} \sin \theta_{t4} &= \sin \theta_{t2} - 2\alpha_2 d \\ &= \sin \theta_{i0} + 2\alpha_1 d - 2\alpha_2 d. \end{aligned} \quad (6)$$

对于实际物理过程, 若波 II 与波 III 在折射率正负梯度介质中发生多次全反射, 则需要多次反复

利用上述结论进行分析; 若全反射点不是恰好落在折射率正负梯度介质分界面上, 可以视  $2d$  为波在  $y$  向上的总路程, 根据其在折射率正负梯度介质中的  $y$  向路程权重比, 对上述公式进行适当修正.

### 3 折射率正负梯度交替表面仿真验证

从上述理论分析可以看出: 折射率正负梯度交替表面可以将空间中的主要入射波一直束缚在介质中, 或在介质中传播一定距离后再实现电磁波的释放; 同时, 该结构与电磁波的频率、极化方式无关, 对不同入射角的波响应由结构参数决定. 由此, 通过引导入射波能流到达指定位置予以释放来减小后向散射截面, 可以将该结构用作隐身表面等. 利用 comsol3.5a 软件, 做如下仿真验证 (仿真结果与坐标的  $y$  向平移无关).

#### 3.1 验证折射率正负梯度交替表面可将波束缚在介质中, 并在传播一段距离后释放到空间中

设计参数: 介质厚度  $d = 0.03$  m; 入射角正弦  $\sin \theta_{i0} = 0.8$ ; 折射率分布满足  $n_1(x) = 1 + 2x, 0 \leq x \leq 0.25; n_2(x) = 2.4 - 3.5x, 0.25 \leq x \leq 0.4$ . 波源位置如图2所示, 位于  $y$  轴 0.07—0.11 m 之间.

理论预期: 此时入射点折射率满足  $n(x) \geq n_t$ , 故  $\sin \theta_{t2} = \sin \theta_{i0} + 2\alpha_1 d = 0.92, \sin \theta_{t4} = \sin \theta_{t2} + 2\alpha_1 d = 1.04, \sin \theta_{t6} = \sin \theta_{t4} - 2\alpha_2 d = 0.83$ , 即波 IV 将以 0.83 的正弦值出射. 仿真结果如图2所示.

图2为不同工作频率、不同极化电磁波入射情况下的能流密度分布图. 从图2可以看出, 入射波被折射率正梯度介质所束缚, 在折射率负梯度介质中传播一定距离后得到释放. 从图中测量计算可知, 波出射角正弦分别为: 0.85, 0.86, 0.86, 0.86, 与理论值接近; 同时由图2(a)—(d) 还可以看出, 该结构具有极化无关、宽带的特性, 与理论预期符合得很好.

#### 3.2 验证折射率正负梯度交替表面可将波束一直束缚在介质中

设计参数: 介质厚度  $d = 0.03$  m; 入射角正弦  $\sin \theta_{i0} = 0.8$ ; 折射率分布满足  $n_1(x) = 1 + 2.5x, 0 \leq x \leq 0.25; n_2(x) = 1.8 - 0.8x, 0.25 \leq x \leq 0.4$ . 波源位置如图3所示, 位于  $y$  轴 0.07—0.11 m 之间.

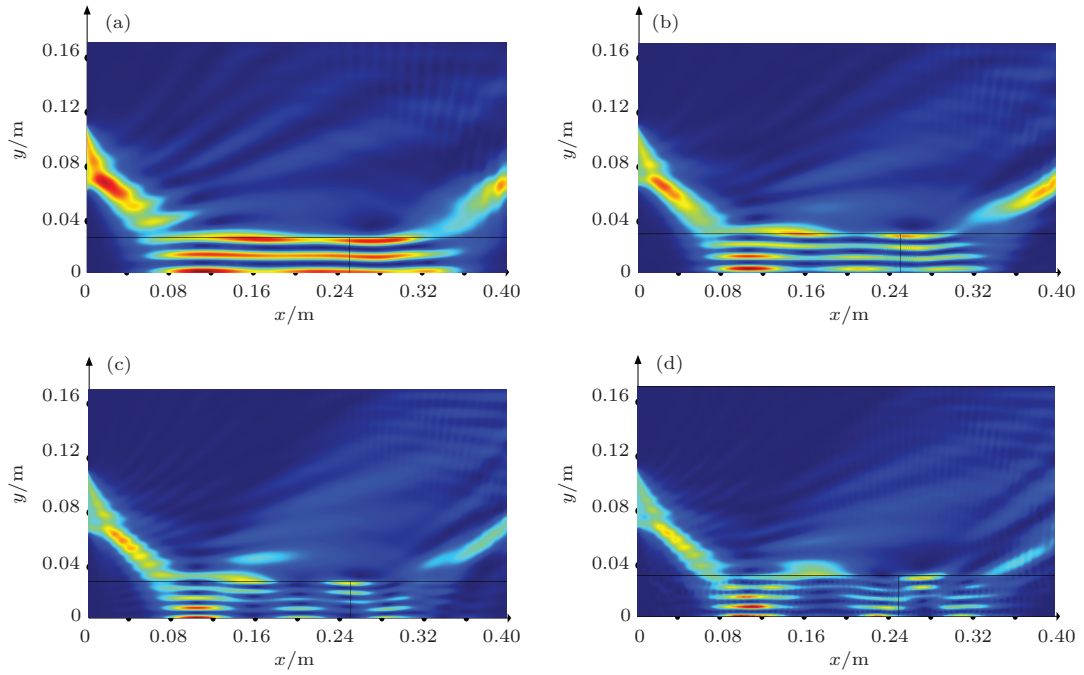


图2 (网刊彩色) 不同参数下能流密度分布图 ( $n_1(x) = 1 + 2x, 0 \leq x \leq 0.25; n_2(x) = 2.4 - 3.5x, 0.25 \leq x \leq 0.4$ ) (a) TE 极化,  $f = 15$  GHz; (b) TE 极化,  $f = 20$  GHz; (c) TE 极化,  $f = 25$  GHz; (d) TM 极化,  $f = 25$  GHz  
Fig. 2. (color online) Power flux density distribution under different parameters ( $n_1(x) = 1 + 2x, 0 \leq x \leq 0.25; n_2(x) = 2.4 - 3.5x, 0.25 \leq x \leq 0.4$ ). (a) TE polarization,  $f = 15$  GHz; (b) TE polarization,  $f = 20$  GHz; (c) TE polarization,  $f = 25$  GHz; (d) TM polarization,  $f = 25$  GHz.

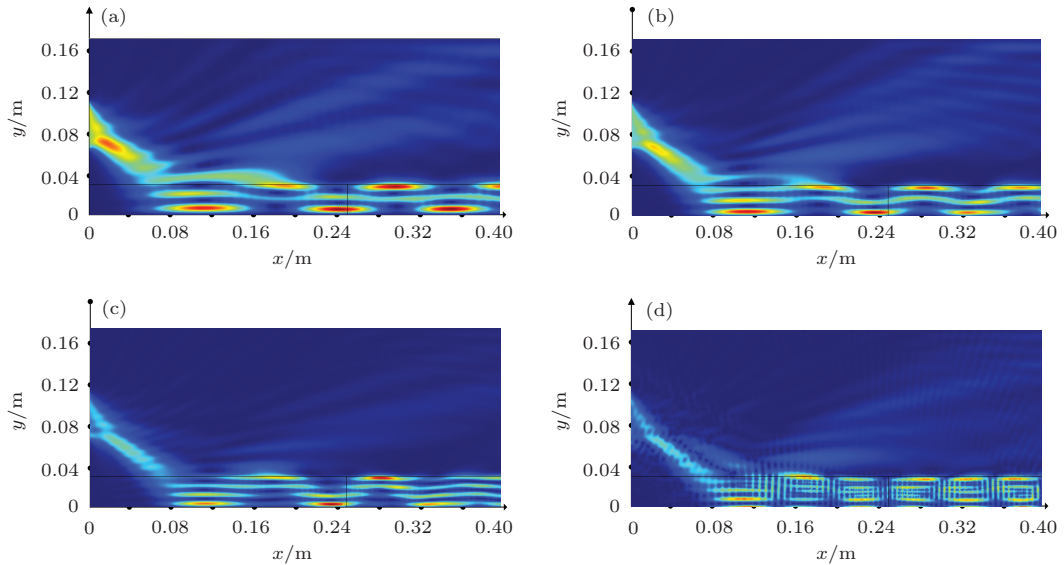


图3 (网刊彩色) 不同参数下能流密度分布图 ( $n_1(x) = 1 + 2.5x, 0 \leq x \leq 0.25; n_2(x) = 1.8 - 0.8x, 0.25 \leq x \leq 0.4$ ) (a) TE 极化,  $f = 15$  GHz; (b) TE 极化,  $f = 20$  GHz; (c) TE 极化,  $f = 25$  GHz; (d) TM 极化,  $f = 25$  GHz  
Fig. 3. (color online) Power flux density distribution under different parameters ( $n_1(x) = 1 + 2.5x, 0 \leq x \leq 0.25; n_2(x) = 1.8 - 0.8x, 0.25 \leq x \leq 0.4$ ). (a) TE polarization,  $f = 15$  GHz; (b) TE polarization,  $f = 20$  GHz; (c) TE polarization,  $f = 25$  GHz; (d) TM polarization  $f = 25$  GHz.

理论预期: 此时入射点折射率满足  $n(x) \geq n_t$ , 故  $\sin \theta_{t2} = \sin \theta_{i0} + 2\alpha_1 d = 0.95$ ,  $\sin \theta_{t4} = \sin \theta_{t2} + 2d\alpha_1 = 1.07$ ,  $\sin \theta_{t6} = \sin \theta_{t4} - 2\alpha_2 d = 1.02$ . 仿真结果如图3所示.

图3为不同工作频率、不同极化电磁波入射情况下的能流密度分布图. 从图3可以看出, 折射率正负梯度介质中的波将波束几乎完全束缚在介质中. 同时由图3(a)—(d)还可以看出, 该结构具有

极化无关、宽带的特性, 与理论预期符合得很好.

## 4 结 论

本文利用不均匀材料提出了一种折射率正负梯度交替表面, 基于几何光学法, 研究了波束在折射率正负梯度交替表面中的传播问题. 在理论分析的基础上, 利用仿真软件验证了所得结论: 通过控制结构参数, 可使得入射的电磁波束缚在介质中或在其传播一定距离后, 再次释放到空间, 同时该结构具有宽带、极化无关等特性, 这意味着利用该结构可减小后向散射截面, 在目标隐身中具有重要应用前景.

## 参考文献

- [1] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [2] Cummer S A, Popa B I, Schurig D, Smith D R 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036621
- [3] Ma H, Q S B, Xu Z, Zhang J Q, Wang J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 179
- [4] Kwon D H, Werner D H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 013505
- [5] Jiang W, Cui T, Yu G, Lin X, Cheng Q, Chin J 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 085504
- [6] Rahm M, Schurig D, Roberts D A, Cummer S A, Smith D R, Pendry J B 2008 *Photon. Nanostruct.: Fundam. Appl.* **6** 87
- [7] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027801 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 刘嘉, 顾巍 2011 物理学报 **60** 027801]
- [8] Alu A, Engheta N 2005 *Phys. Rev. E* **72** 016623
- [9] Alu A, Engheta N 2007 *Opt. Express* **15** 3318
- [10] Silverinha M G, Alu A, Engheta N 2007 *Phys. Rev. E* **75** 036603
- [11] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084103 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 陈红雅, 徐卓, 张安学 2014 物理学报 **63** 084103]
- [12] Liu X B, Shi H Y, Chen B, Xu Z, Zhang A X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 214201 (in Chinese) [刘晓波, 施宏宇, 陈博, 徐卓, 张安学 2014 物理学报 **63** 214201]

# Study of positive and negative gradient refractive index alternant surface\*

Liu Xiao-Bo<sup>1)</sup> Liu Ming-Li<sup>2)</sup> Chen Jian-Zhong<sup>1)</sup> Shi Hong-Yu<sup>1)</sup> Chen Bo<sup>1)</sup>  
Jiang Yan-Sheng<sup>1)</sup> Xu Zhuo<sup>1)</sup> Zhang An-Xue<sup>1)†</sup>

1) (*Department of Information and Communication Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*Department of Electronic Information Engineering Technology, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473005, China*)

( Received 2 September 2014; revised manuscript received 17 October 2014 )

## Abstract

In this paper, we design a kind of positive and negative gradient refractive index alternating surface and discuss its physical mechanism by the geometrical optics method and the numerical simulation of electromagnetic field. This structure can control the propagation of electromagnetic waves by adjusting some parameters such as refractive gradient. Under certain parameters, electromagnetic waves from space can be confined mainly in the media all the time, or are released into the space after propagating a certain distance in the media. This structure is polarization-independent and wide-band. It means that this structure can be used as a stealth surface by reducing the scattering cross section. Finally, the characteristics of the structure are verified by the numerical simulation.

**Keywords:** positive and negative gradient refractive index alternant surface, geometrical optics method, stealth surface

**PACS:** 42.25.Gy, 02.60.Cb

**DOI:** [10.7498/aps.64.084202](https://doi.org/10.7498/aps.64.084202)

---

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61331005) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61471292, 61001039).

† Corresponding author. E-mail: [anxuezhang@mail.xjtu.edu.cn](mailto:anxuezhang@mail.xjtu.edu.cn)