DOI:10.19789/j.1004-9398.2016.01.006

单负超透镜零折射性质的数值模拟验证

赵 艳 赵 晨 赵丽明 赵秋爽
(首都师范大学物理系,北京 100048)

摘 要

为了验证单负材料的零折射理论,设计了一个简单装置. 先利用金属表面等离子体的反常透射特性使金属缝成为一个二维点光源,再放置一个单负薄膜作为超透镜来观察透射图像. 时域有限差分方法的模拟结果与零折射理论的预期一致,从而给出了一个直观的零折射例证.

关键词: 零折射,单负材料,超透镜.
中图分类号: O436.1

0 引 言

金属超透镜概念来源于完美透镜. 完美透镜是一层双负材料[1-2]构成的平板,它可以进行完美成像,即成像不仅和传统凸透镜一样包含辐射波信息,同时还包含倏逝波信息. 后者是传统凸透镜所不能做到的. 而且,倏逝波信息在某些条件下还可以被放大. 这个性质使得完美透镜被认为有可能突破传统成像的衍射极限[2],这具有重要的应用价值. 目前微加工技术已经可以制备光频段的双负材料,但是制作工艺仍然很复杂,价格昂贵. 这严重制约了完美透镜的应用. 2000年,英国科学家 Pendry 理论上提出,单负材料薄膜可代替双负材料制作的完美透镜,实现超衍射成像. 如果这是真的,将大大推动计算机芯片制作的核心技术—光刻工艺. 为了区别双负的完美透镜,单负薄膜可称为超透镜. 2005年美国科学家 X. Zhang 设计了一套光刻装置[3],将金属银膜作为超透镜,发现确实使成像线宽成倍减小. 但实际上 Zhang 的实验与 Pendry 的理论之间并未建立必然联系,人们并不清楚单负薄膜是如何成像的. 换句话说,传统透镜是通过调整光程聚焦成像,虽然双负的完美透镜也是通过调整光程,但是二次聚焦成像,而单负超透镜的成像机制当时并不清楚. 直到2012年,文献[4]从解析理论证明了理想超透镜折射角为零,由此推论超透镜是压印成像,类似传统相纸印像. 用零折射理论计算的成像结果与 Zhang 的实验符合很好. 这也可看成是一种实验验证. 但是更直接的验证还是困难的,因为超透镜很薄. 本文通过数值模拟方法给出零折射的一个直观验证.

收稿日期: 2014-10-28

1 模拟装置及原理

所谓零折射就是指折射角为零. 当光束通过超透镜薄膜时,透射光束相当于从入射光束位置沿着超透镜薄膜的垂直方向做了一个平移,如图1(a)所示. 根据这个原理,我们设计了零折射验证装置如图1(a)和(b)所示. 其中图1(b)是由一个金属缝下面放置一个平面光源,很窄的金属缝就形成了一个二维点光源(即线光源). 由于缝很窄,其光线透过率非常低,但是可采用 TM 极化波(磁场平行于缝),这样利用金属表面等离子体的反常透射形成一个强光源. 图1(c)是在距离金属缝 d 处放置一个厚度为 h 的超透镜. 如果图1(a)的图像是正确的,那么就应当断定图1(c)的透射图像也应是正确的. 即将图1(b)的衍射图像在 d 距离(虚线所示)进行截断,虚线之上的部分应与图1(c)中超透镜之上部分相吻合.

2 模拟结果

下面采用时域有限差分(FDTD)方法对上述模型进行模拟. 在厚度为0.2 μm 的银膜上刻出宽为0.1 μm 的金属缝,0.8 μm 波长的从下方正入射,对

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

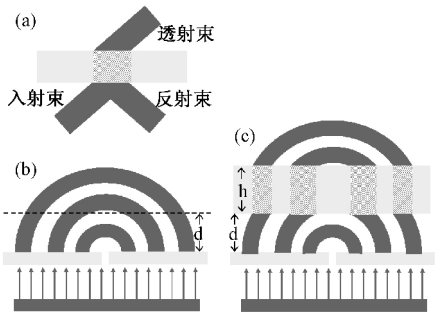


图 1 (a) 单负材料零折射示意图; (b) 亚波长单缝的衍射场分布; (c) 超透镜的零折射特性使衍射图形整体平移

应介电常数为 $\varepsilon = -31.201 + i0.405$ [5]. 在距离金属缝出口 d = 1 μm 的地方放置厚度为 $h = 0.02$ μm 的超透镜. 银是好的超透镜材料,因此我们就用银膜作为超透镜. 模拟的磁场分布如图 2(a) 所示. 可以看到超透镜上方是规整的圆环状图形,有如点光源发出的光. 超透镜下方的图形有些散乱,本应也是规则圆环,镜面部分反射破坏了这些圆环. 图 2(b) 表示没有超透镜时的场分布,整个衍射区都是规整圆环,图 2(a) 的上半部图像与图 2(b) 中的相应部分

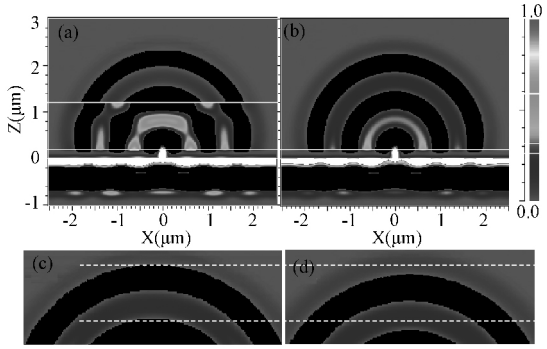


图 2 模拟结果
(a) 有超透镜; (b) 无超透镜; (c) 有超透镜的局域图像; (d) 无超透镜的局域图像

是一样的,除了前者强度有所减弱. 现在将图 2(a) 和(b) 的相应部分截取下来放大些分别放在图 2(c) 和(d) 中,除了可以看到这两个图一样外,还可看到图 2(c) 中的圆环比(d) 中的略高一些. 这是因为超透镜的零折射特性将图 2(c) 中的圆环整体向上平移了 $h = 0.02$ μm.

为了突出超透镜零折射的特点,可以和普通电介质平板作比较. 图 3(a) 是将图 2(a) 中的银膜换成折射率为 $n = 4$ 的电介质后的场分布. 图 3(b) 和图 2(b) 是同一个图,放在这里便于比较. 可以看到,与超透镜使圆环向上平移不同,电介质平板使得上半部分圆环向下平移了,这是由于电介质平板压缩了波长. 同时也可看出,圆环在 X 方向略有压缩,这是由于折射不为零造成,这也不同于零折射的刚性平移.

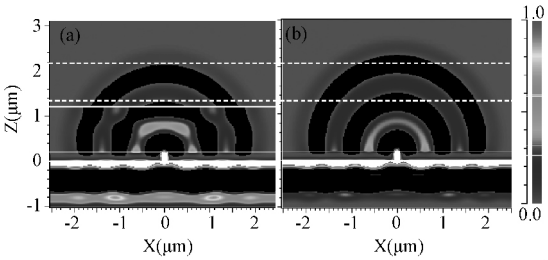


图 3 将同尺寸的超透镜换成其他介质折射率为 $n = 4$ 的电介质的图像(a) 和无电介质的图像(b)

3 结 论

本文设计了一个单缝衍射装置,利用表面等离子体反常透射现象形成一个二维点光源,用这个点光源照射超透镜. 用 FDTD 方法模拟后发现柱形波圆环被整体向上平移,这正符合单负材料零折射的理论预期. 因此本工作给出了一个直观证明零折射理论的例证.

参 考 文 献

[1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative value of ε and μ [J]. Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509 – 514.

[2] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys. Rev. Lett, 2000, 85(18): 3966 – 3969.

[3] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens [J]. Science, 2005, 308(5721): 534 – 537.

[4] Zhou Y S, Wang H Y, Wang H. Zero refraction in natural materials and the mechanism of metal superlens [J]. EPL, 2012, 98(6): 67005.

[5] Zhou Y S, Gu B Y, Lan S, et al. Time-domain analysis of mechanism of plasmon-assisted extraordinary optical transmission [J]. Phys. Rev. B, 2008, 78(8): 081404(R).

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Numerical Demonstration of the Zero-Refraction Properties of Single Negative Superlens

Zhao Yan　Zhao Chen　Zhao Liming　Zhao Qiushuang

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing　100048)

Abstract

To validate the zero-refraction theory of the single negative materials, a simple device is proposed, in which a metal slit is illuminated from one side and a two-dimensional light source can be formed on the other side along the slit as the extraordinary transmission assisted by the surface plasmon polaritons; a single-negative superlens is set before the light source to perform the transmission patterns. The transmission patterns obtained by FDTD(Finite Difference Time Domain) simulation method agree with the expectation of the zero-refraction theory well. This result presents an intuitive demonstration of the zero-refraction theory.

Key words: zero-refraction, single negative material, superlens.

(上接第 26 页)

Tunable Energy Gap Controlled by a Line Defect in Armchair Graphene Nanoribbons

Liu Lili　Long Wen

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing　100048)

Abstract

A single-orbital nearest-neighbor tight-binding model is used to study the role of line defects on the energy gap in armchair graphene nanoribbons. In a metallic ribbon, an energy gap may open up if a sublattice line defect is introduced. Moreover, a new state with zero velocity may emerge when the ordinary-defect hopping term is weaker. In a semiconducting ribbon, the energy gap may disappear if a dimer line defect is located in any position except some definite lines, for the case of $N = 3n$ the definite position is $N_i = 3m - 1$, for the case of $N = 3n + 1$ the definite position is $N_i = 3n - 2$ (n and m are integers, and N is the width of ribbon).

Key words: Armchair graphene nanoribbons, line defect, energy gap.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net