

光频三维各向同性左手超材料结构单元模型的仿真设计*

龚伯仪 周欣 赵晓鹏[†]

(西北工业大学理学院智能材料实验室, 西安 710129)

(2010年4月16日收到; 2010年6月13日收到修改稿)

基于树枝结构单元思想, 提出了光频三维各向同性左手超材料球刺结构单元模型. 采用金属的 Drude 原理, 运用等效媒质理论, 仿真研究了结构的电磁响应特性. 在晶格间距与工作波长的比值满足等效媒质理论要求的前提下, 通过调节结构单元的几何参数, 发现它能在光波段出现介电常数和磁导率同时为负值的区域, 实现折射率小于零的左手超材料响应特性. 该模型结构简单, 具有各向同性特点. 研究结果为采用“由下向上”方法制备光波段的三维左手超材料指出了新的途径.

关键词: 球刺模型, 光波段, 三维, 各向同性

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

1. 引言

介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是表征媒质电磁特性最基本的两个物理量. 自然界中的绝大部分材料其介电常数和磁导率均大于零, 有少部分材料在某些特定状态下也会出现 $\epsilon < 0$ (如等离子体及位于特定频段的部分金属) 或 $\mu < 0$ (如铁氧体在其铁磁频率附近). 1967年, Veselago^[1,2] 详细研究了电磁波在 ϵ 与 μ 都为负的假想媒质中的传播特性, 而在这种媒质中电场强度 E , 磁场强度 H , 波矢量 k 形成左手规则, 称其为左手材料 (left-handed metamaterials, LHMs). 相对于常规材料, 左手材料具有许多奇异的电磁特性, 比如负折射效应^[3,4]、反常 Doppler 效应、完美透镜效应^[5]、反常 Cherenkov 辐射^[6] 等. 由于在自然界中没有发现这种 ϵ 和 μ 同时为负的左手材料, 所以在随后的 30 年里左手材料没有得到实际的发展. 2001年, Smith 等人^[7] 采用电路板刻蚀技术制备了铜的开口谐振环 (split ring resonators, SRRs) 和铜线 (Wires) 并周期性排列, 首次实现了微波段的负折射, 有力地证明左手材料的存在.

目前实现负折射的方法大概可分两类, 光子晶体^[8-10] 和人工构造左手材料. 但是光子晶体尺寸过大, 不能等效成媒质. 因此左手材料主要是通过人工构造的方法实现, 其特性受控于结构单元几何形状及其空间分布^[11], 所以根据金属杆的电谐振原理^[12] 和金属开口谐振环的磁谐振原理^[13], 可以制备出各种“环杆”结构的左手材料. 但是在高频段, 由于左手材料结构单元很小, 不易制备这种“环杆”结构, 因此需要设计一种结构使得电谐振和磁谐振一体化. 如新型六边形谐振环^[14]、S 形结构^[15]、 Ω 形结构^[16]、H 形结构^[17]、对称 π 形^[18] 等, 调节它们的结构参数使电谐振产生的负介电常数和磁谐振产生的负磁导率在某一频段重合就能实现左手效应. 但是这些结构大部分都是一维或二维的 (这里的一维表示仅有一个方向的电场和磁场起作用, 波矢只能朝一个方向; 这里的二维表示有一个方向的电场和两个方向的磁场可以起作用, 波矢方向在一个二维的平面内), 并且还存在着双各向异性. 对于左手材料这种异向介质而言, 需要加强其结构单元自身的对称性, 从而保证其各向同性, 才能得到很好的实际应用^[19], 因此设计三维各向同性的左手材料又是一个新的研究目

* 国家自然科学基金 (批准号: 50632030, 50872113, 50936002) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

标. 基于我们实验室先前所设计的二维各向同性的树枝状左手材料^[20-22], 本文提出了一个三维带核的树枝结构即球刺模型, 它是自身对称性很好的三维立体结构, 显然是各向同性的. 通过仿真发现该结构能在光波段实现左手响应, 在晶格间距与工作波长的比值满足等效媒质理论要求的前提下, 改变模型的几何参数可使其左手响应频段达到可见光绿光波段. 目前, 制备高频段的左手材料主要有物理刻蚀方法(如聚焦离子束刻蚀)和化学制备法. 微波段的左手材料其结构单元尺寸处于毫米量级, 因此可以通过在介质板上刻蚀各种金属图案来实现. 如果要使响应频段上升到红外以及可见光波段, 这就要求结构单元的尺寸小到纳米量级, 这对设备工艺要求很高, 目前物理刻蚀方法很难实现如此小的精度; 而化学制备法对设备工艺要求较低, 尽管有序性不如微机械加工法, 但是这种自下而上的制备法能使左手材料结构单元达到微米甚至纳米量级, 这给制备光波段的左手材料开辟新的可行的途径. 本文所提出的这个球刺结构就可通过溶剂热合成法成功地制备出来, 改变反应条件可减小结构单元的尺寸, 目前纳米量级的结构单元正在制备过程中, 所以该仿真结果为采用“由下向上”方法制备光波段的三维左手超材料提供了很好的指导.

2. 数值仿真

数值仿真中我们选用的材料是金属银, 它在光波段满足 Drude 模型, 其色散特性参数为等离子频率 $\omega_{pl} = 1.37 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$, 电子碰撞频率 $\omega_{col} = 8.5 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ ^[23]. 仿真中采用平面波激励, 利用周期性边界条件并采用电边界、磁边界以及设置对称面, 计算透射反射参数 S , 利用散射参量法^[24]可得到四个电磁参数(介电常数 ϵ , 磁导率 μ , 折射率 n , 波阻抗 z)各自随频率的变化曲线, 进而考察其表现的左手性质.

在仿真中我们根据实际所制备的球刺结构作了适当的简化, 其结构单元如图 1(a) 所示. 从中心核均匀长出若干个枝杆(实际所制备的球刺从核中心向外长满了枝杆, 在仿真过程中如果枝杆数量太多, 它们相互之间的耦合作用变得很强, 使得透射反射曲线很紊乱不便于观察和分析, 本文设计了 14 个枝杆既可以方便地构建模型, 使杆均匀分布在核

四周以满足自身对称性, 又可以使透射反射曲线不复杂便于提取参数进行分析). 结构单元的具体尺寸为从核中心长出的杆长为 L , 中心核设计为球形其半径为 r , 杆横截面为 $t \times t$ (实际制备的球刺枝杆其横截面也为方形), 周期晶格常数为 a . 由于所设计的材料是周期性结构, 为了简化模拟环境, 因此本文采用周期性边界条件, 只是模拟了单个结构单元, 如图 1(b) 所示.

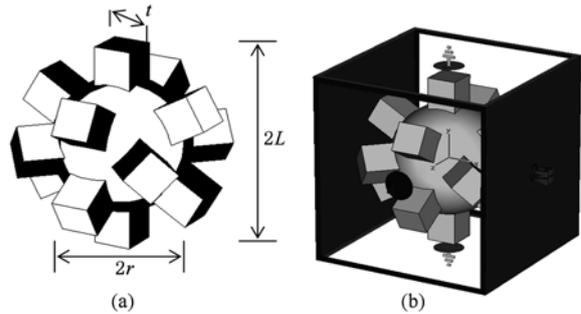


图 1 (a) 球刺模型的结构单元及其尺寸表示; (b) 在模拟中采用周期性边界条件只模拟结构单元

3. 模拟结果与讨论

仿真发现, 可调节模型的四个结构参数 L, r, t, a 来改变左手响应频段. 改变 L 使结构单元变小、适当增加核半径 r 以及调节 t 使杆变粗、适当增大单元之间的周期间隔 a , 都可使左手通带向高频移动, 但是它们各自对左手通带的频宽以及左手透射强度的影响较为复杂. 通过反复调节这四个结构参数, 可使球刺模型的响应频段最高达到可见光绿光波段.

选取结构单元的几何参数为 $L = 54 \text{ nm}$, $r = 2L/3 \text{ nm}$, $a = 106 \text{ nm}$, $t = 16 \text{ nm}$, 仿真提取 S 参量得到其透射曲线和反射曲线如图 2 所示, 根据散射参量法反演得到四个电磁参数 ϵ, μ, n, z 随频率的变化曲线, 如图 3(a), (b), (c), (d) 所示.

在图 2 中透射曲线在 536 THz 附近处出现一个透射峰, 并且在图 3(a) 和 (b) 中对应处磁导率与介电常数同时为负, 在图 3(c) 中对应处折射率也为负, 这表明图 2 中透射峰是一个左手峰. 在图 3(c) 中, 负折射率出现在 527.6—538.5 THz 频段处, 在谐振峰附近折射率负值最大为 $n = -2.68$.

介电常数为负是由核周围杆发生电谐振引起的, 由于杆的数量较多, 电谐振较强, 所以出现负

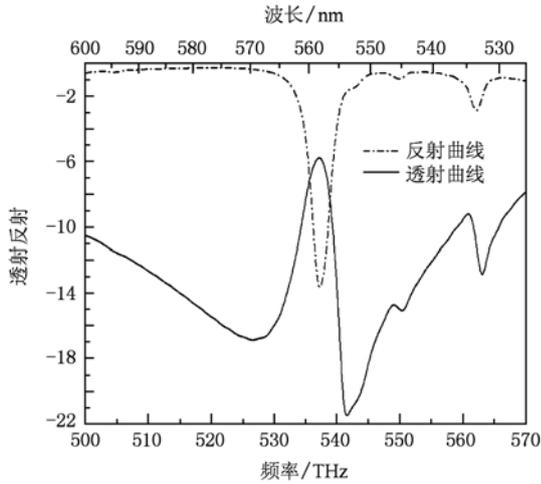


图2 结构单元的几何参数取值为 $L = 54 \text{ nm}$, $r = 2L/3 \text{ nm}$, $a = 106 \text{ nm}$, $t = 16 \text{ nm}$ 时, 模拟所得的透射与反射曲线

介电常数的频段较宽并且其负值也较大. 具有一定夹角的两杆之间能够产生弧形的感应电流, 由于两杆间的夹角较小, 并且大量杆之间产生的磁场其方

向不在一个方向上, 这样产生的抗磁效应不强, 使得磁谐振较弱, 所以负磁导率频带较窄, 从而使得磁导率出现的负值也较小. 结构单元的谐振中心在 536 THz 附近, 处于绿光波段 (570—500 nm), 此时晶格周期与工作波长的比值为 $1/5.25$, 满足等效媒质理论^[25], 因此所设计的这个球刺模型是一个三维的左手材料结构单元.

此处需要说明的是, 比较图 3(a), (b), (c), 注意到折射率实部为负的较低频段处并不是介电常数实部为负和磁导率实部为负的重合频段. 这是由于在人工媒质中实现负折射率的方法是, 设计材料使其 (各向同性) 介电常数 $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ 和 (各向同性) 磁导率 $\mu = \mu' + i\mu''$ 满足不等式 $P = \text{Re}(\epsilon) \times \text{Im}(\mu) + \text{Re}(\mu) \times \text{Im}(\epsilon) < 0$, 这将使得复折射率 $n = n' + in''$ 实部 $n' < 0$ ^[26,27]. 在 $\epsilon' < 0$ 和 $\mu' < 0$ 同时满足时, 上面的不等式总是成立的, 然而我们注意到这并不是必要条件, 因此我们计算出了 P 值随频率的变化曲线如图 4 所示, 可看出 $P < 0$ 与折射率实

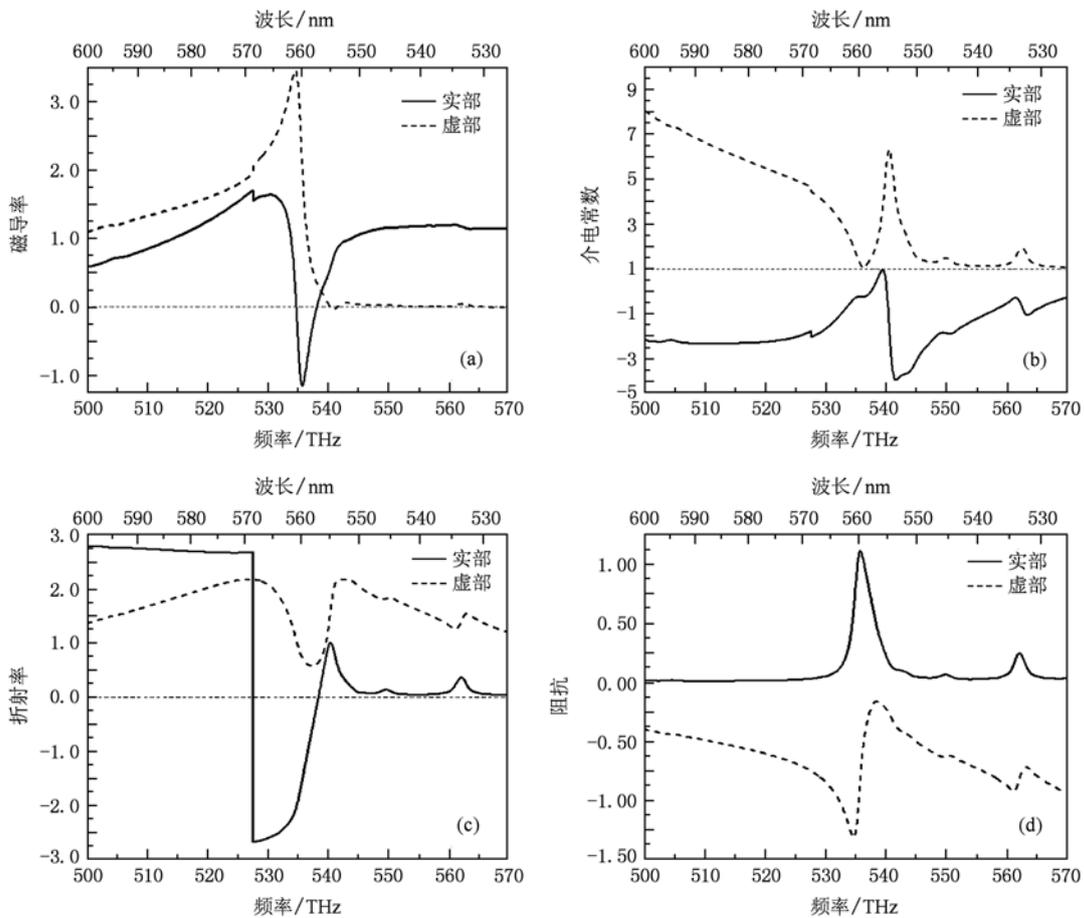


图3 提取 S 参量反演得到四个电磁参数随频率的变化曲线 (a) 磁导率曲线; (b) 介电常数曲线; (c) 折射率曲线; (d) 阻抗曲线

部为负的频段是完全重合的. 这一点也可以通过阻抗随频率变化的曲线来观察(图 3(d)), 在阻抗 $z = 0$ 的地方显然是禁带, 而在 535.6 THz 附近阻抗 $z > 0$, 这正是负介电常数与负磁导率重合的频段, 这说明在此处的确存在一个左手通带.

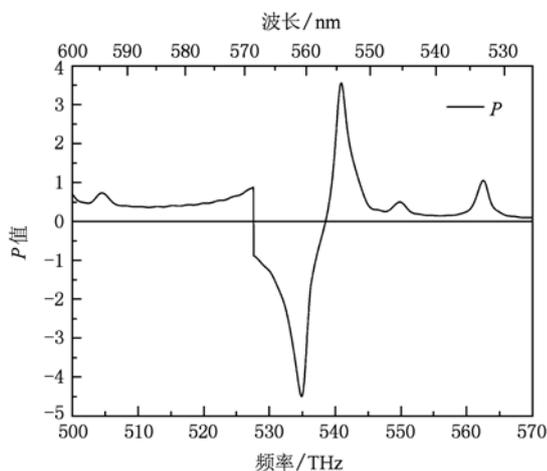


图4 折射率实部取值条件 P 值

4. 结 论

本文提出一种三维球刺结构模型, 在光频情况

下采用金属 Drude 原理并运用周期性边界条件, 仿真研究结构单元的电磁响应特性. 在晶格周期与工作波长的比值满足等效媒质理论要求的前提下, 调节结构单元的四个几何参数 (L, r, t, a), 在 527.6—538.5 THz 频段可得到负的折射率, 在谐振峰附近得到最大负折射率为 $n = -2.68$, 这正好出现在可见光绿光波段. 虽然负折射率出现的频段超出介电常数与磁导率同时为负的范围, 但是介电常数与磁导率同时为负并不是实现负折射率的必要条件; 因为负折射率的出现可以有更宽松的条件, 即可以在满足不等式 $P = \text{Re}(\epsilon) \times \text{Im}(\mu) + \text{Re}(\mu) \times \text{Im}(\epsilon) < 0$ 的条件下得到, 在本文的仿真结果中 $\text{Re}(n) < 0$ 与 $P < 0$ 的频段正好完全重合. 在左手响应频段晶格周期与工作波长的比值为 1/5.25, 满足等效媒质理论. 该球刺结构具有很好的自身对称性, 因此通过仿真可以证实该结构是一个三维各向同性的左手超材料. 这种球刺结构可通过溶剂热合成法成功地制备出来, 目前我们实验室正在改变反应条件使结构单元尺寸达到纳米量级, 研究结果为采用“由下向上”方法制备光波段的三维左手超材料指出了新的途径.

- [1] Veselago V G 1967 *Usp. Fiz. Nauk* **92** 517
- [2] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [3] Houck A A, Brock J B, Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [4] Parazzoli C G, Greeger R B, Li K, Koltenbah B E C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401
- [5] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [6] Grbic A, Eleftheriades G V 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 5930
- [7] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [8] Zhang B, Wang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1404 (in Chinese) [张波、王智 2007 物理学报 **56** 1404]
- [9] Dong J W, Hu X H, Wang H Z 2007 *Chin. Phys. Lett.* **16** 1057
- [10] Wang Z D, Liu N H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 559 (in Chinese) [王振德、刘念华 2009 物理学报 **58** 559]
- [11] Wu J F, Sun M Z, Zhang C M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3844 (in Chinese) [吴俊芳、孙明昭、张淳民 2009 物理学报 **58** 3844]
- [12] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 25
- [13] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. MTT* **47** 2075
- [14] Zhang C M, Sun M Z, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese) [张淳民、孙明昭、袁志林、宋晓平 2009 物理学报 **58** 1758]
- [15] Chen H Sh, Ran L X, Huang fu J T, Zhang X M, Chen K S 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [16] Huangfu J T, Ran L, Chen H, Zhang X, Chen K, Grzegorzcyk T M, Kong J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1357
- [17] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红、罗春荣、赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [18] Yan C C, Cui Y P, Wang Q, Zhuo S C 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 482
- [19] Meng F Y, Wu Q, Jin B Sh, Wang H L, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4514 (in Chinese) [孟繁义、吴群、金博识、王海龙、吴健 2006 物理学报 **55** 4514]
- [20] Zhou X, Fu Q H, Zhao J, Yang Y, Zhao X P 2006 *Opt. Express* **14** 7188
- [21] Liu H, Zhao X P, Yang Y, Li Q W, Lv J 2008 *Adv. Mater.* **20** 2050
- [22] Liu B Q, Zhao X P, Zhu W R, Luo W, Cheng X C 2008 *Adv. Funct. Mater.* **18** 3523
- [23] Dolling G, Enkrich C, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2006 *Opt. Lett.* **31** 1800

- [24] Povinelli M L, Johnson S G, Joannopoulos J D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1069
- [25] Smith D R, Pendry J B 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [26] Yan C C, Cui Y P, Wang Q, Zhuo S C 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 482
- [27] Wang F M, Liu H, Li T, Dong Z G, Zhu S N, Zhang X 2007 *Phys. Rev. E* **75** 016604

Numerical study of three-dimensional isotropic left-handed metamaterials at visible frequencies*

Gong Bo-Yi Zhou Xin Zhao Xiao-Peng[†]

(Smart Materials Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(Received 16 April 2010; revised manuscript received 13 June 2010)

Abstract

In this paper, we design a three-dimensional isotropic left-handed metamaterial (LHM) composed of sphere-thorn shaped cells at visible frequencies. Adopting the metallic Drude's principle, we simulate and study its transmission properties for the incident plane electromagnetic wave. The dimension of unit cell here is far below the resonant wavelength, and thus the effective medium theory is well satisfied. With appropriate geometric parameters, this structure can realize negative refractive index with simultaneous negative permittivity and permeability at visible frequencies. The LHM proposed in this paper has advantages of simplicity and isotropy, moreover, our numerical model provides a new method for 'top-to-bottom' approach to preparing visible three-dimensional metamaterials.

Keywords: sphere-thorn model, visible frequencies, three-dimension, isotropy

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50632030, 50872113, 50936002).

[†] Corresponding author. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn