

结构参量对左手材料通带位置影响的研究*

弓巧侠[†] 赵双双 段智勇 马凤英

(郑州大学物理工程学院, 郑州 450001)

(2010年12月5日收到; 2010年12月27日收到修改稿)

基于金属短板对和连续金属线(short-slab pair and continuous wires)复合结构,从理论上系统地研究了在 THz 波段结构参量对左手材料通带位置的影响.数值模拟结果表明,改变金属板宽度或厚度、连续金属线的长度或厚度都会引起左手材料通带位置向较高频段偏移.

关键词: 负折射, 左手材料, 结构参量, 通带

PACS: 78.67.Pt, 74.25.Gz, 75.40.Mg

1. 引言

左手材料(left-handed materials, LHM)最早是在1968年由 Veselago^[1]提出,是指物质的 $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k}$ 三者之间符合左手螺旋关系的一种人工复合材料.根据有效介质理论,LHM 可以用有效介电常数 $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ 和有效磁导率 $\mu = \mu_1 + i\mu_2$ 来描述^[2],通过调控 ε 和 μ 在同一频段内同时为负使有效折射率 $n = n_1 + in_2$ 为负,实现负折射.2000年 Shelby 等^[3]首次实验验证金属开口谐振环(split ring resonators, SRRs)和金属线复合结构的负折射效应.

此后 SRRs 的新周期结构大量涌现,如 S 形结构^[4]、 Ω 形结构^[5]、H 形结构^[6]、线对结构^[7],基于 C 环的多边形结构^[8]、单面双 S 形结构^[9]等.这些结构的工作频段大都在微波段极大限制了左手材料应用. Gundogdu 等^[10]利用金属短板对和连续金属线(short-slab pair and continuous wires)复合结构通过数值模拟和实验首次在近红外波段实现了负折射.该结构构造简单,易于采用传统加工工艺制备,便于多层堆积,而且可以在电磁波相对结构表面垂直入射时实现负折射^[11].磁共振响应与等离子体响应在 THz 波段实现,极大地拓宽了左手材料的研究领域并将影响 THz 技术的研究与应用^[12].左手材料的基本设计思想是通过多种物理结构设计来获得超常的材料功能,其性质往往不取决于其构成材料

的本征性质而主要取决于所设计结构.因此可以通过对其单元结构的设计来灵活控制介电常数和磁导率,从而实现对左手特性调控.详细研究结构参量对左手材料通带位置的影响是左手材料设计和制备中的重要问题.本文通过调节金属短板对和连续金属线复合单元基质材料及厚度、金属线长度和宽度、间距,分析结构参量对左手材料通带位置的影响和变化规律.

2. 理论分析

金属短板对和连续金属线复合结构基本单元如图1所示,电磁波入射沿 z 轴方向,磁场和电场分别沿 x 轴和 y 轴方向.在分析过程中所用到基本结构参量为:电磁波垂直入射时沿 \mathbf{E}, \mathbf{H} 和 \mathbf{k} 方向的周期分别为 $a_E = 20 \mu\text{m}$, $a_H = 16 \mu\text{m}$, $a_k = 1.9 \mu\text{m}$.金属短板长度为 $L_s = 16.5 \mu\text{m}$,宽度为 $w_s = 8 \mu\text{m}$,金属板和连续金属线厚度均为 $t_s = 0.1 \mu\text{m}$,电介质基板使用 Si,厚度为 $t = 0.7 \mu\text{m}$,连续金属线的宽度为 $w = 2 \mu\text{m}$,连续金属线和金属短板的间距为 $d = 1 \mu\text{m}$.金属材料 Ag 作为色散媒质,遵循 Drude 色散模型($\varepsilon = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma)$),等离子体频率 $\omega_p = 13.66 \times 10^{15} \text{ rad/s}$,碰撞频率 $\gamma = 2.73 \times 10^{13} \text{ Hz}$.该结构的电磁响应机理与 Zhou 等^[13]提出的金属线对和连续金属线复合结构物理机理类似.传统的 SRR 结构被短金属板对代替,长金属线依然保存.

* 国家自然科学基金(批准号:60907046)和河南省教育厅自然科学研究计划(批准号:2009A140008)资助的课题.

[†] E-mail: gqx1205@zsu.edu.cn

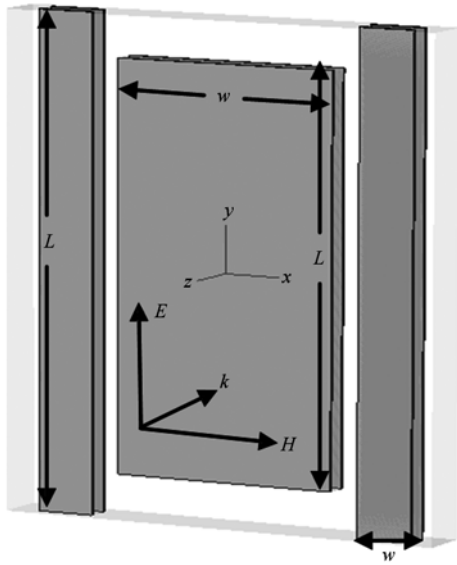


图1 金属板对和连续金属线单元结构

短金属板对被厚度为 t 的基板隔开. 短金属板对可看作是两个压平的开口 SRR. 当电磁波平行金属板对平面入射时, 沿着金属线方向产生自感可记为 $L = \mu_0 lt_s/w$, 上下相邻的短金属板产生电容, 可记作

$C = \epsilon_0 \epsilon_r wl/4t_s$. 沿着金属线方向, 形成自感. 短金属板对形成的电容器, 可看成平板电容器电容, 磁谐振频率可写为

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{\pi l \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c_0}{\pi l \sqrt{\epsilon_r}}$$

由此可知, 磁谐振频率与金属短板对长度及介质板相对介电常数有关.

3. 仿真模拟研究和讨论

数值模拟过程中, 电磁波传播方向, 电场和磁场偏振方向如图 1 所示, 改变图 1 所示单元的结构参量, 利用 CST Studio Suite 2008 对单元结构电磁波反射和透射特性进行有效模拟. 根据得到的 S 参数, 利用标准散射参量反演法^[14] 得到了 ϵ_1, μ_1 和 n_1 .

3.1. 金属板宽度对左手材料通带位置的影响

保持其他结构参数不变, 图 2 详细计算了金属板的宽度 w_s 为不同数值 (2.0, 4.0, 6.0 和 8 μm) 时, 单元结构的 ϵ_1, μ_1 和 n_1 . 由图 2 知, 在一定范围内随着 w_s 减小, 谐振频率增大, 传输通带起始频率

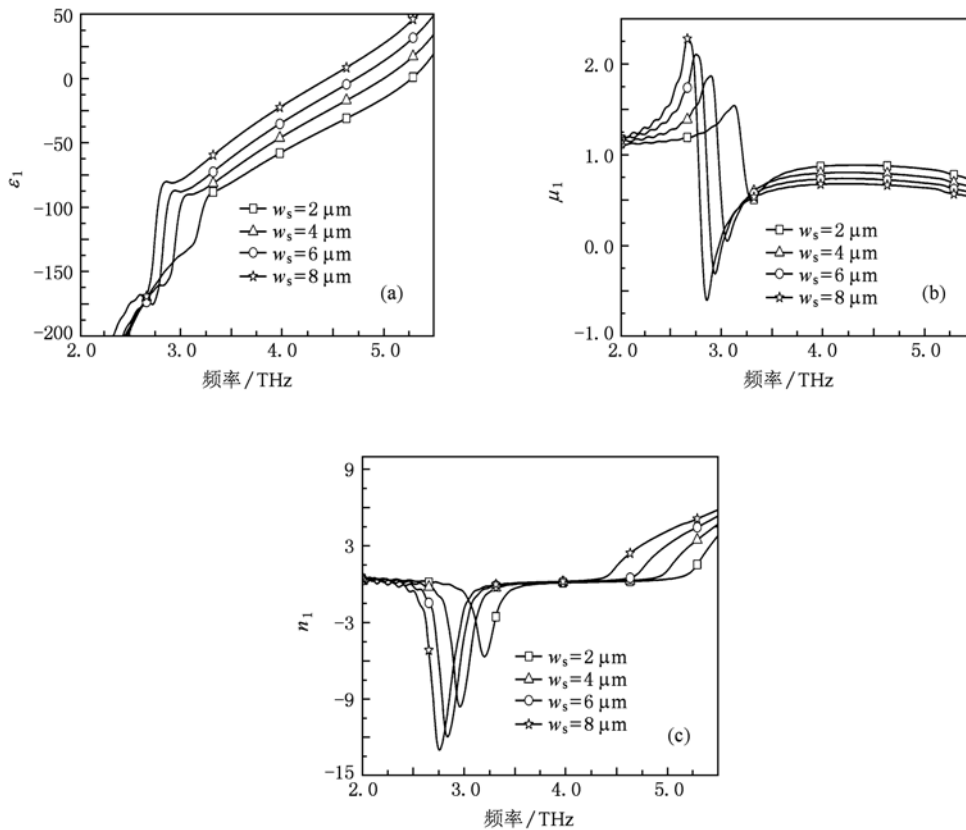


图2 金属板宽 w_s 变化对 (a) 有效介电常数实部 ϵ_1 , (b) 有效磁导率实部 μ_1 , (c) 有效折射率实部 n_1 的影响

上升,传输带宽基本不变,但传输通带峰值却减小,实现负 ϵ, μ, n 的频带随金属板宽度的减小而向较高频段平移但峰值位置向下偏移,左手材料通带位置向较高频段偏移. 当金属板的宽度 w_s 小于 $4 \mu\text{m}$ 时 μ 不再为负值. 由以上分析知连续金属板宽度减小引起附加电左手材料通带位置向较高频段偏移.

3.2. 连续金属线长度对左手材料通带位置的影响

保持其他结构参数不变,图3详细计算了连续金

属线长度 L 为不同数值($16.5, 17.5, 18.5, 20 \mu\text{m}$)时,单元结构的 ϵ_1, μ_1 和 n_1 . 由图3知,在一定范围内,随着 L 减小,传输通带位于较低频带边缘的传输峰位置向上偏移,对应谐振频率减小;原来位于 4.5 THz 处的传输峰明显减弱,对应谐振频率增大,传输通带位置基本没有变化. 随着金属线长度 L 减小,负折射率 n 频带消失;负 ϵ 的频段减小却向高频移动. 由以上分析知,连续金属线长度减小引起电感的减小,从而导致谐振频率增大. 传输通带峰值明显减弱且向高频移动.

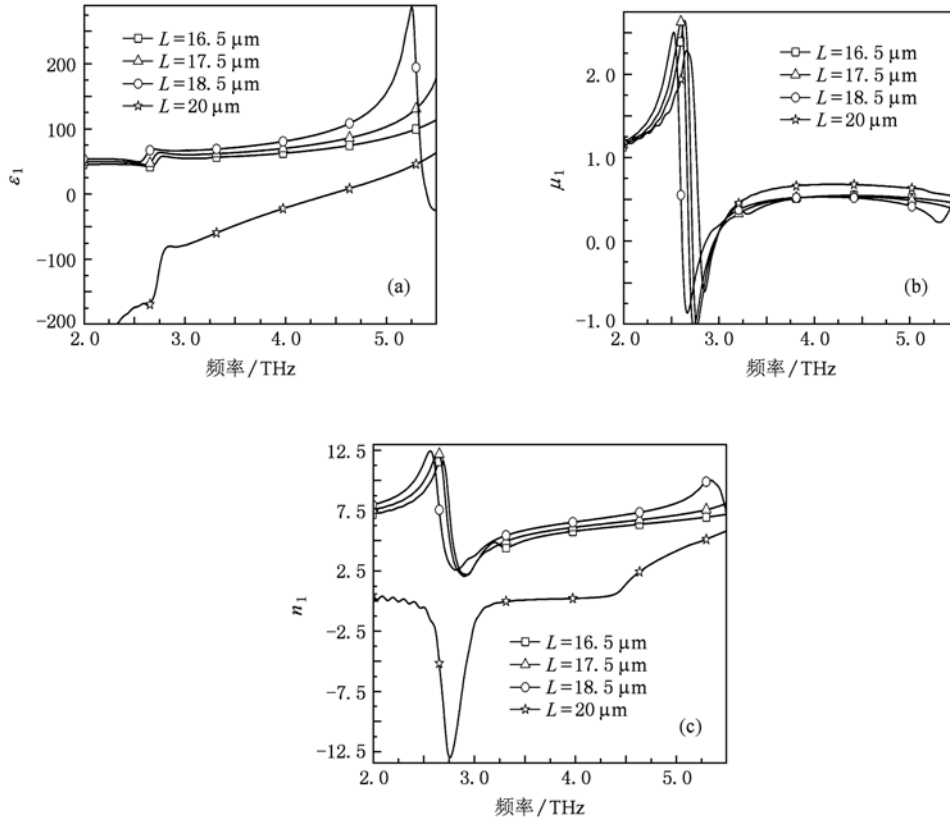


图3 金属线长度 L 变化对(a)有效介电常数实部 ϵ_1 , (b)有效磁导率实部 μ_1 , (c)有效折射率实部 n_1 的影响

3.3. 金属板长度对左手材料通带位置的影响

保持其他结构参数不变,图4详细计算了金属板长度 L_s 为不同数值($16.5, 17.5, 18.5 \mu\text{m}$)时,单元结构的 ϵ_1, μ_1 和 n_1 . 由图3知在一定范围内随着 L_s 增大,传输通带对应谐振频率减小,通带对应峰值位置向下偏移. 由以上分析知,在一定范围内金属板长度增大引起附加电容增大,从而导致谐振频率减小. 左手材料通带峰值向低频偏移.

3.4. 连续金属线和金属板间距对左手材料通带位置的影响

调节连续金属线和金属板间距 d 分别 $0.5, 1,$

$1.5 \mu\text{m}$ 得到相应的 ϵ_1, μ_1 和 n_1 曲线如图6所示. 由图知当间距 d 逐渐增大时谐振频率减小;间距 d 逐渐减小时,谐振频率增大,传输通带峰值向低频频略有偏移.

3.5. 连续金属线和金属板厚度对左手材料通带位置的影响

保持其它结构参数不变,调节连续金属线和金属板的厚度 t_s ,分别取 $0.1, 0.2, 0.4, 0.6 \mu\text{m}$, 由图6所示的 ϵ_1, μ_1 和 n_1 曲线可知,当 t_s 逐渐增加至 $0.6 \mu\text{m}$ 时对应的谐振频率逐渐向高频偏移,传输通带向高频偏移. 负 ϵ, μ, n 的频段及整体趋势基本没有改变.

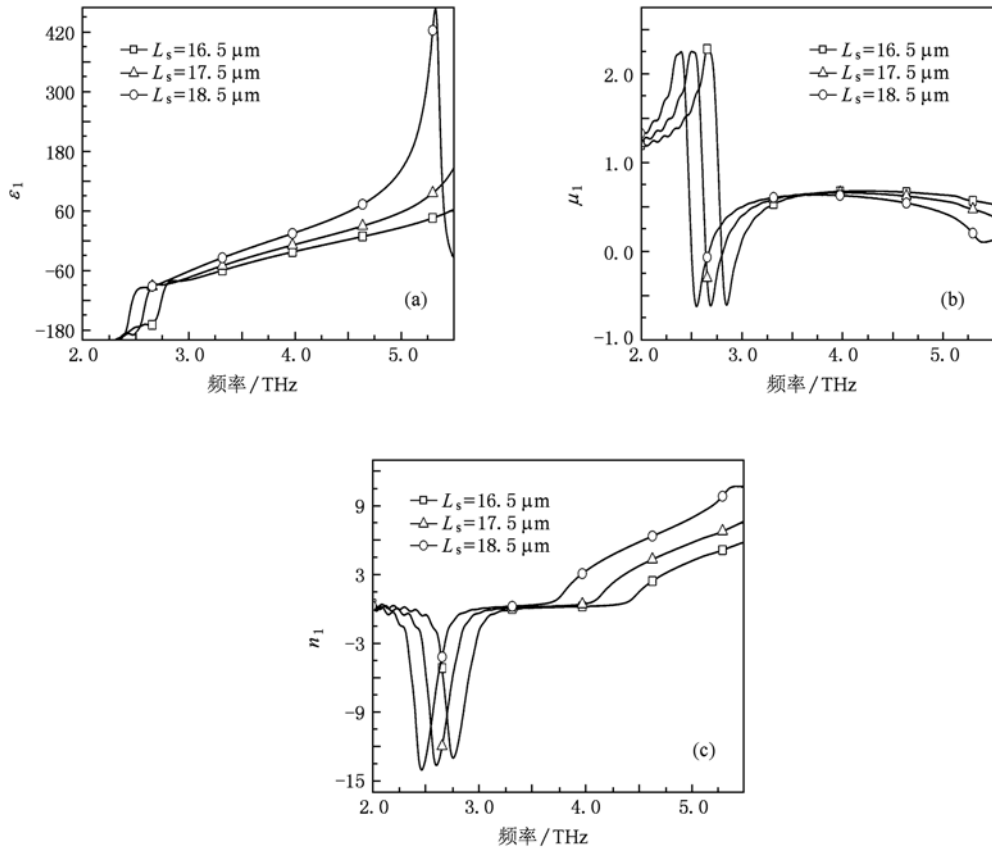


图4 金属板长度 L_s 变化对(a)有效介电常数实部 ϵ_1 , (b)有效磁导率实部 μ_1 , (c)有效折射率实部 n_1 的影响

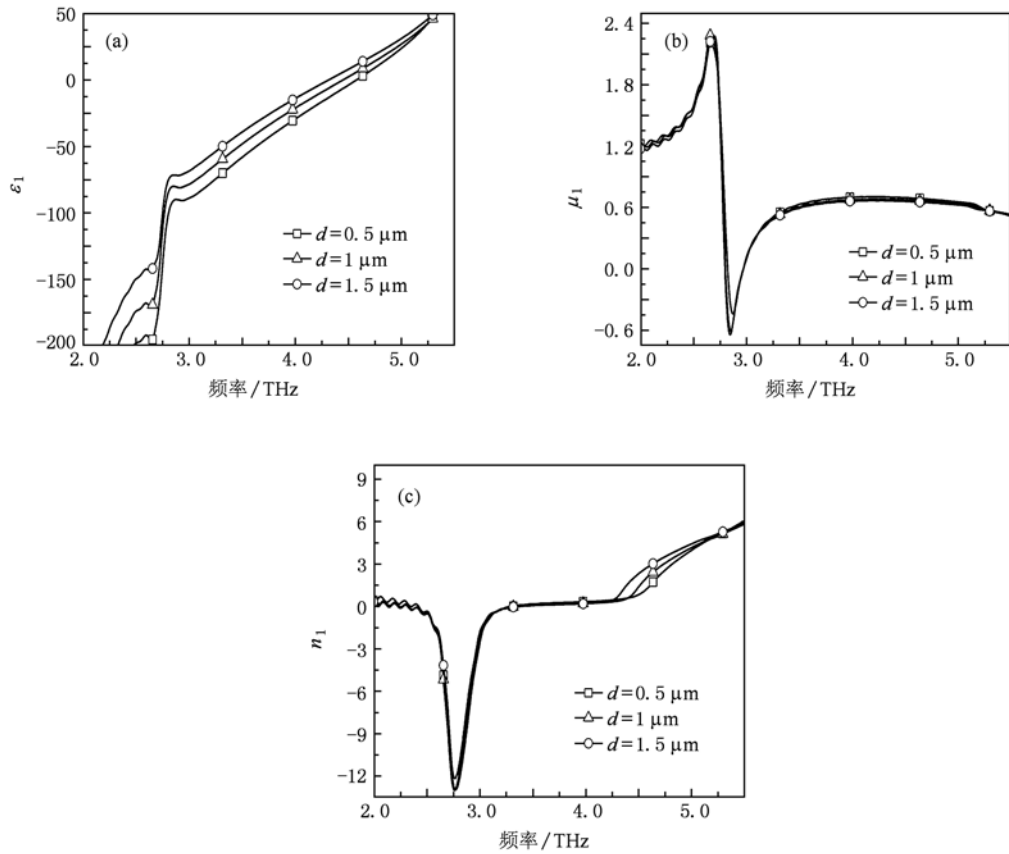


图5 金属板线间距 d 变化变化对(a)有效介电常数实部 ϵ_1 , (b)有效磁导率实部 μ_1 , (c)有效折射率实部 n_1 的影响

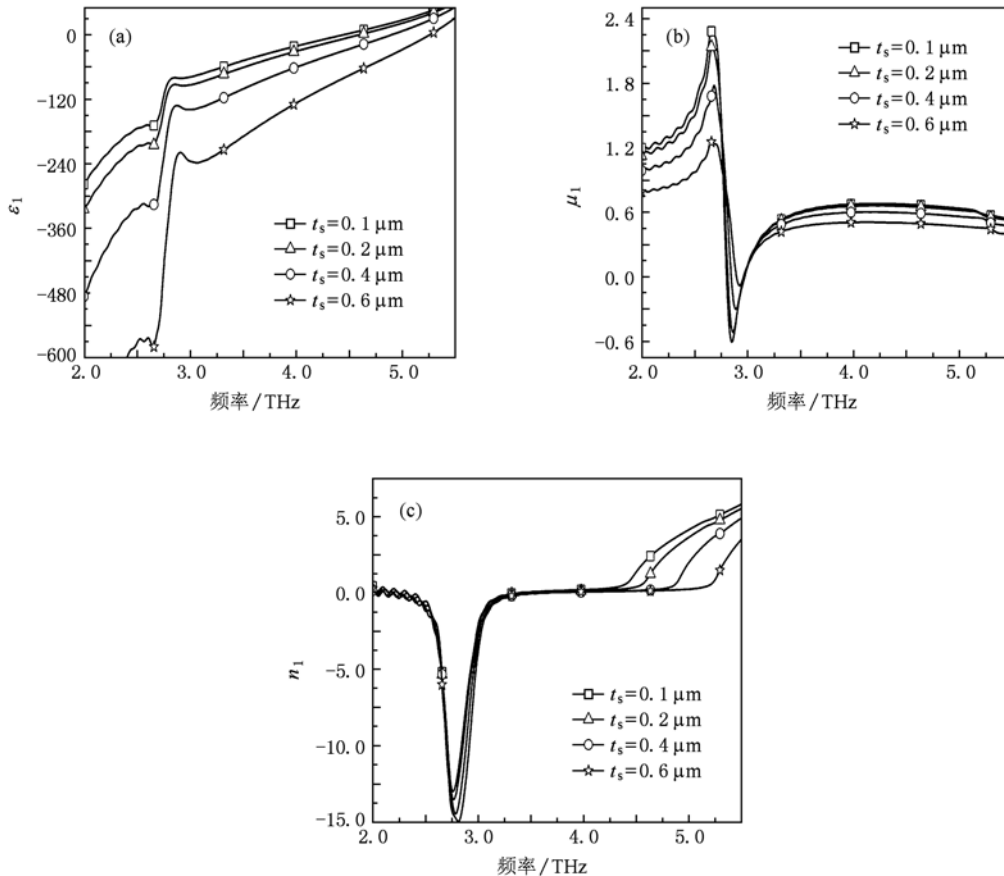


图6 金属板线厚度 t_s 变化对(a)有效介电常数实部 ϵ_1 , (b)有效磁导率实部 μ_1 , (c)有效折射率实部 n_1 的影响

3.6. 基板厚度、连续金属线宽度对左手材料通带位置的影响

此外还研究了基板厚度、连续金属线宽度对左手材料通带位置的影响, 研究表明基板厚度减小时对应的谐振频率值基本保持不变, 在相应频段附近出现了介电常数和磁导率同时为正值的情况. 连续金属线宽度的增大对附加电容没有影响, 谐振频率没有明显变化. 左手材料通带位置也没有发生明显变化.

4. 结 论

结构参量对左手材料通带位置影响的研究对

于特定频率下双负材料的设计与制备有着重要意义. 研究表明, 在一定范围内, 减小连续金属板宽度、连续金属线长度或是增加连续金属线和金属板厚度, 左手材料通带位置向较高频段偏移; 增大金属板长度或连续金属线和金属板间距 d 时, 左手材料通带峰值位置向低频偏移; 将基板换用不同的材料, 通带位置会随着基板材料 ϵ 的变化而变化.

目前左手材料的研究存在响应频段低, 带宽窄和损耗大的缺点, 限制了其应用范围. 因此, 设计新的结构和对现有材料进行优化将是今后进一步研究的主要任务. 本文的研究成果是进一步深入研究复杂周期性结构对左手材料特性影响的基础和前提, 同时也为新型电磁材料的优化设计提供了一定的理论依据和指导.

[1] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Uspekhi* **10** 509
 [2] Drachev V P, Cai W, Chettiar U, Yuan H K, Sarychev A K, Kildishev A V, Klimeck G, Shalaev V M 2006 *Laser Phys. Lett.* **3** 49
 [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77

[4] Chen H S, Ran L X, Jiang T, Huang F, Zhang X M, Chen K S 2004 *Physical Review E* **70** 057605
 [5] Jiang T, Huang F, Ran L X, Chen H S, Zhang X M 2004 *Applied Physics Letters* **84** 1537
 [6] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5183(in

- Chinese) [刘亚红、罗春荣、赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5183]
- [7] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [8] Sun C M, Sun M Z, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese) [孙淳民、孙明昭、袁志林、宋晓平 2009 物理学报 **58** 1758]
- [9] Sun M Z, Sun C M, Song X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5444 (in Chinese) [孙明昭、孙淳民、宋晓平 2010 物理学报 **59** 5444]
- [10] Gundogdu T F, Katsarakis N, Kafesak M, Penciu R S, Konstantinidis G, Kostopoulos A, Economou E N, Soukoulis C M 2008 *Opt. Express* **16** 12
- [11] Smith D R, Vier D C, Koschny T 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036607]
- [12] Lu M H, Li N, Shen J L 2005 *Journal of Capital Normal University* (in Chinese) [逯美红、李 宁、沈京玲 2005 首都师范大学学报 **26** 22]
- [13] Zhou J, Zhang L, Tuttle G 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [14] Ding P, Liang E J, Hu W Q, Zhang L, Zhou Q, Xue Q Z 2009 *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* **7**

Numerical study of effect of geometrical parameters on the passband of left-hand material *

Gong Qiao-Xia[†] Zhao Shuang-Shuang Duan Zhi-Yong Ma Feng-Ying

(School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(Received 5 December 2010; revised manuscript received 27 December 2010)

Abstract

We systematically study the transmission property of metallic short-slab pair and continuous wire structure metamaterial and its dependence on the system geometrical parameters in the infrared frequency regime, using the transfer-matrix method and the commercial code, CST Microwave Studio. It is found that the passband is sensitive to the length and the thickness of the continuous wire. As the length or thickness increases, the passband is slightly extended to a higher frequency. It is also found that the dependence of the passband on the material of dielectric layer.

Keywords: negative refraction, lefthand material, geometrical parameters, passband

PACS: 78.67.Pt, 74.25.Gz, 75.40.Mg

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60907046), and the Natural Science Foundation of Henan Educational Committee, China (Grant No. 2009A140008).

[†] E-mail: gqx1205@zzu.edu.cn