

周期性层状铁氧体-电介质复合材料中导模模式的 有效负折射率*

赵天恩 伍瑞新† 杨帆 陈平

(南京大学电子科学与工程系,南京 210093)

(2005 年 3 月 10 日收到 2005 年 7 月 2 日收到修改稿)

运用等效传输线法研究了周期性层状铁氧体-电介质/金属复合材料导模模式的有效折射率.通过对复合材料导模模式的色散特性和有效折射率的分析和计算,发现负折射率只能出现在 TE 模式激励下的某一频带内.在负折射率频带内的电磁损耗与复合材料中电介材料的性质密切相关,减小介电损耗可以有效降低复合材料的损耗,但过小的介电损耗则会导致负折射率的消失.

关键词:负折射率,导模模式,等效传输线法

PACC:4110F,4210F,7550B

1. 引 言

采用人工复合的办法实现自然界中原本不存在的材料有着十分重要的应用价值.这些具有特殊性的人工复合材料常称为异向材料(metamaterial),主要包括了双负材料(DNG)、负折射率材料、电磁带隙材料(EBG)以及高阻表面等等.由于双负材料、负折射率材料独特的电磁特性和重要而广阔的应用前景(如理想透镜^[1]等),使得对它们的研究得到了科学家的高度重视,并已经掀起了一股研究的热潮.

早在 1967 年,Veselago^[2]就研究了电磁波在同时具有负介电常数和负磁导率媒质(即双负材料)中的传播问题,发现在双负材料中传播的平面电磁波其坡印亭矢量的方向与相速度的方向是反平行的;在双负材料与正常材料的界面上会出现负折射等奇异的电磁行为.由于在自然界不存在现成的双负材料,因而 Veselago 的工作未能得到应有的重视.近年来基于 Pendry 工作的启发^[3,4],Smith 等人^[5]找到了一种可以同时等效为负介电常数和负磁导率的人工复合结构,它由金属细线(metallic wire)和开口谐振环(split resonance ring, SRR)交叉周期阵列构成,其中金属细线可以等效为负介电常数而开口谐振环则等效为负的磁导率. Shelby 等人^[6]对这种人工双负

系统进一步作了研究,在实验上确实观察到了负折射率现象,从而使得对双负材料的研究出现了全面的复苏. Lindell^[7]和 Lakhtakia 等人^[8]进一步从理论上对双负材料进行了深入研究.目前除了 Smith 等人提出的人工双负结构外,人们还提出了其他形式的负折射率材料或结构材料,例如 Wu 等人^[9]提出了在磁化了的铁磁性金属薄膜中存在着双负材料特性. Kong 等人^[10]研究了电磁波与分层双负材料的相互作用并给出了一般性的理论公式. Zhang 等人^[11]进一步全面分析了电磁场在双负介质板中的传播特性.最近, Wu^[12]提出了在周期性层状铁磁性复合材料中实现负折射率的方法.需要指出的是双负材料具有负的折射率性质,而负折射率的实现并不一定需要介电常数和磁导率同时为负值. Ziolkowski 已对此做了明确的说明^[13]. 在 Wu 提出的负折射率结构材料中^[12],也发现负折射率的出现并不一定伴随着双负的同时实现,等效的正介电常数和负磁导率也能够使结构具有负折射率现象.所以,基于负折射效应的应用(如 Pendry 等人的一些应用设想),只要实现材料具有负折射率特性即可.本文在文献^[12]的基础上进一步研究了基于铁氧体的层状复合材料中的导模问题,提出了一种层状导模的结构,即利用某些铁氧体材料在特定频率范围有负磁导率的特性,与另一具有一定损耗的电性材料(如电介质等)进行

* 国家自然科学基金(批准号:60471020)和国家重点基础研究发展计划(批准号:2004CB719805)资助的课题.

† E-mail: rxwu@nju.edu.cn

周期性层状叠加,实现一个具有负折射率的人工复合结构.我们研究了这种结构中导模的色散特性,并且得到了在特定模式和频率范围内复合材料具有负折射率的特性.

2. 周期性导模结构的色散方程和有效折射率

周期性导模结构模型如图 1(a)所示.在两块无限大导电板之间,以厚度为 L_1 的两层电性材料中间夹一层厚度为 L_2 的铁氧体材料为一个周期,共叠加 m 个周期最终填满上下两块导电板之间的空间.设电性材料的相对介电常数为 ϵ_1 ,铁氧体材料的相对介电常数和相对磁导率分别为 ϵ_2, μ_2 ,相对介电常数和相对磁导率都是频率的函数.现分析该结构传播表面波的情形(即在垂直于界面方向没有波的传播)选择本征坐标系为 (v, u, y) ,并定义与界面垂直的 y 方向为纵向, u 方向是波传播的方向, v 方向没有场的变化.将场按照 TE, TM 模分解,于是图 1(a)的多层导模结构就可以等效为图 1(b)的电路模型来加以分析,其中第 i 节传输线对应于第 i 层材料,最上层和最下层的两块导电板就等效成短路线.

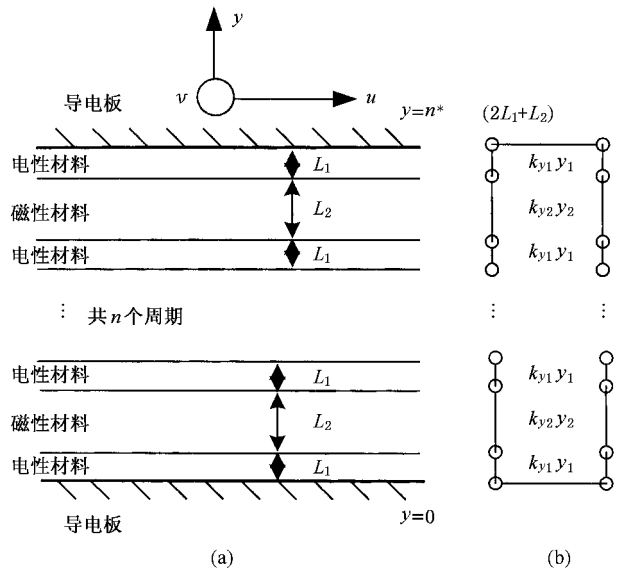


图 1 (a) 多层导模结构模型 (b) 等效电路

图 1(b)所示的等效电路可以很方便的运用传输线理论来求解其特征值和色散特性,对应于第 i 层介质,等效的传输线方程为

$$\begin{pmatrix} V_i \\ I_i \end{pmatrix} = [T_i] \begin{pmatrix} V_{i-1} \\ I_{i-1} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$[T_i] = \begin{pmatrix} T_{i11} & T_{i12} \\ T_{i21} & T_{i22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k_{y_i}(y_i - y_{i-1}) & -jZ_i \sin k_{y_i}(y_i - y_{i-1}) \\ -jY_i \sin k_{y_i}(y_i - y_{i-1}) & \cos k_{y_i}(y_i - y_{i-1}) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$k_{y_i}^2 = k_0^2 \epsilon_i \mu_i - k_u^2 - k_v^2,$$

$$Z_i = \frac{1}{Y_i} = \begin{cases} \frac{\omega \mu_i \mu_0}{k_{y_i}} & \text{TE}_y \text{ 模,} \\ \frac{k_{y_i}}{\omega \epsilon_i \epsilon_0} & \text{TM}_y \text{ 模.} \end{cases} \quad (3)$$

于是由 ϵ_1, μ_1 表征的电性材料层,其等效传输线方程的传输矩阵为

$$[T_1] = \begin{pmatrix} \cos k_{y_1} L_1 & -jZ_1 \sin k_{y_1} L_1 \\ -jY_1 \sin k_{y_1} L_1 & \cos k_{y_1} L_1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 $k_{y_1}^2 = k_0^2 \epsilon_1 \mu_1 - k_u^2 - k_v^2$.由 ϵ_2, μ_2 表征的铁氧体材料层,其等效传输线方程的传输矩阵为

$$[T_2] = \begin{pmatrix} \cos k_{y_2} L_2 & -jZ_2 \sin k_{y_2} L_2 \\ -jY_2 \sin k_{y_2} L_2 & \cos k_{y_2} L_2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 $k_{y_2}^2 = k_0^2 \epsilon_2 \mu_2 - k_u^2 - k_v^2$ 考虑到上下为无限大导电板,所以 $k_{v1} = k_{v2} = 0$. Z_1, Y_1, Z_2, Y_2 的表达式根据(3)式由传播模式是 TE 或 TM 来确定.这样 $V(y=0), K(y=0)$ 与 $V(y=h), K(y=h)$ 之间的关系就可以表示为电性层和铁氧体层传输线方程的级连形式

$$\begin{pmatrix} V(h) \\ K(h) \end{pmatrix} = \underbrace{[T_1 \mathbf{I} T_2 \mathbf{I} T_1] \cdots [T_1 \mathbf{I} T_2 \mathbf{I} T_1]}_{\text{共 } m \text{ 个周期}} \begin{pmatrix} V(0) \\ K(0) \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} V(0) \\ K(0) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中 $h = n(2L_1 + L_2)$. (6)式可以进一步写成

$$\begin{cases} V(h) = T_{11} V(0) + T_{12} K(0), \\ K(h) = T_{21} V(0) + T_{22} K(0). \end{cases} \quad (7)$$

考虑到导电板上要求满足边界条件 $V(h) = V(0) = 0$ 将此条件带入(7)式得

$$T_{12} K(0) = 0. \quad (8)$$

因为导电板表面 $K(0) \neq 0$, 所以要求

$$T_{12} = 0. \quad (9)$$

由于(6)式中 $[T]$ 的表达式只含有一个未知数 k_u , 于是通过求解特征方程(9)就可以得到复合材料的色散方程 $k_u(\omega)$, 从而得到导模模式的有效折射率 n_{eff}

$= k_u(\omega)k_0$, 其中 k_0 是电磁波在真空中的波数.

3. 数值计算结果及分析

对于上述的周期性多层结构我们取磁性材料为钡钴(BaCo)铁氧体,其厚度为 $L_2 = 0.5\text{mm}$. 铁氧体的介电常数 $\epsilon_r = 12$, 其磁导率频谱如图 2 所示.

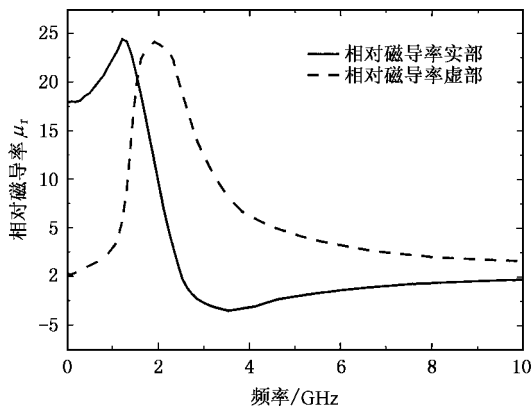


图 2 钡钴铁氧体的相对磁导率频谱

电性材料层是非磁性金属薄膜($\mu_r = 1$),其厚度为 $L_1 = 0.2\mu\text{m}$. 根据 Drude-Lorentz 模型,金属薄膜的 ϵ_r 可写成

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\zeta)}, \quad (10)$$

其中 ω_p 为电子振荡频率, ζ 代表电子运动的阻尼系数.通常对金属材料而言 $\omega_p = 10^{15}$, $\zeta = 10^{13}$.

考虑相对 y 方向为 TE 导模模式的情形,图 3 A 中分别画出了金属薄膜情况下的复数有效折射率 n_{eff} 的实部和复数 k_u 的虚部,前者代表复合材料的有效折射率,后者反映了复合材料的损耗情况.

由图 3 可以很明显地看到,复合材料的有效折射率频谱 $n_{\text{eff}}(\omega)$ 中出现了一段负值,即存在负折射率.同时由图 4 可以看到导模模式中出现负折射率时伴随着较大的损耗,损耗的主要来源之一是层状复合材料中的金属材料在微波频率的损耗很大.

为了减小损耗,我们研究了电性材料为电介质的情况.假定电介质的介电常数实部为 12,电导率 $\sigma = 1000\text{S}$,则根据电导率与介电常数虚部的关系可得到复介电常数的虚部为 $\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$.为便于比较,在图

3 A 中也分别画出了电性材料为电介质情况的复数 n_{eff} 的实部和 k_u 的虚部,在计算中取介质层的厚度

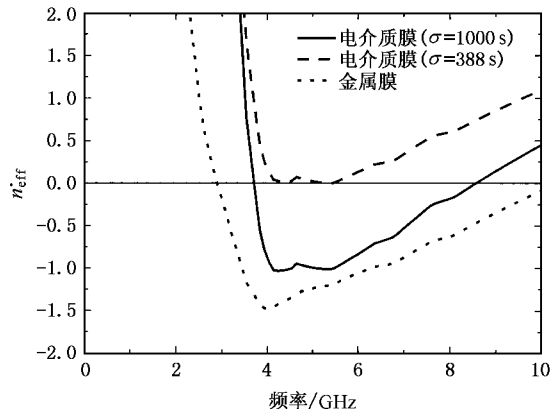


图 3 复合材料复数有效折射率 n_{eff} 的实部曲线(TE 模)

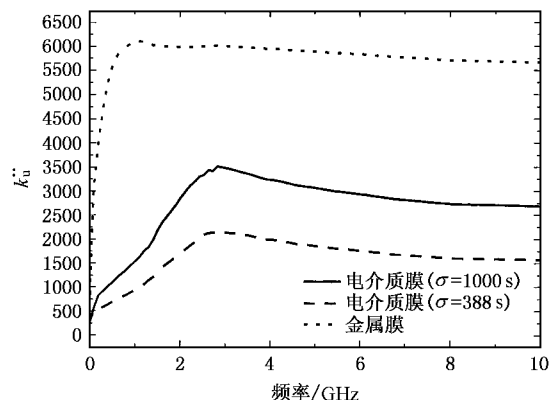


图 4 复合材料复数传播常数 k_u 的虚部曲线(TE 模)

$L_1 = 0.01\text{mm}$. 由图 3 可以明显地看出电性层采用电介质时同样会使复合材料呈现出负折射率,同时即使在介质层厚度远大于金属薄膜的情况下,材料的损耗比起采用金属薄膜时的情况下降了很多(见图 4).降低电性层材料的电导率可以进一步减小复合

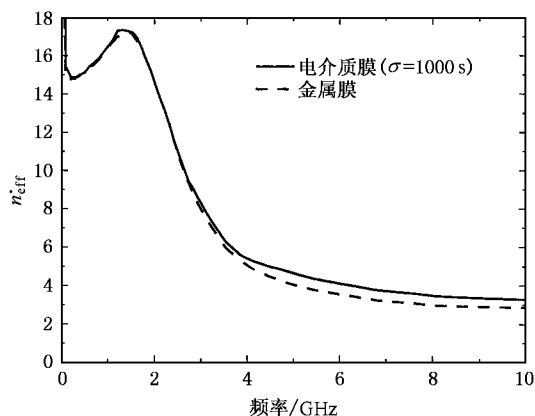


图 5 复合材料复数有效折射率 n_{eff} 的实部曲线(TM 模)

材料的损耗,然而由图 3 可以看到当电导率由原来的 1000S 降到 388S 时,材料的负折射率性质将最终消失.

当对 y 方向是 TM 导模模式时,我们同样计算了电性层分别为金属薄膜和电介质两种情况下的复数有效折射率 n_{eff} ,其实部如图 5 所示.不难发现无论电性层是采用金属薄膜还是电介质材料, $n_{\text{eff}}(\omega)$ 在整个频带上都是正值,复合材料表现出正常材料的电磁特性.因此,对图 1 所示的层状周期性结构,负折射率现象的出现依赖于层状复合材料中所传播的电磁波的模式,并只能出现在 TE 导模模式中,所以在实验上需要设计特定模式的微波电路来测量复合结构材料中的传播常数,进而验证该结构的等效负折射率特性.

4. 结 论

本文运用等效传输线法研究了铁氧体-电介质/金属薄膜复合材料中导模模式的有效折射率问题.针对周期性层状结构中电性层材料为金属薄膜、电介质两种情况,对该导模结构进行了数值分析,发现只有对 y 方向的 TE 模式激励时会出现负的等效折射率,而 TM 模式激励则没有.电性层材料采用低损耗电介质材料可以有效地减小复合材料的损耗,然而当电介质的损耗降低到一定程度时复合材料的负折射率性质会消失,因此如何降低导模损耗的问题是值得深入研究的.

-
- [1] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
 - [2] Veselago V G 1968 *Soviet Phys. Uspekhi* **10** 509
 - [3] Pendry J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
 - [4] Pendry J, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075
 - [5] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
 - [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **296** 77
 - [7] Lindell I V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, Ilvonen S 2001 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **31** 129
 - [8] Lakhtakia A, McCall M W, Weiglhofer W S 2002 *Int. J. Electron. Commun. (AEU)* **56** 407
 - [9] Wu R X, Zhang X K, Lin Z F, Chui S T, Xiao J Q 2004 *J. Magn. Magn. Mat.* **271** 180
 - [10] Kong J A 2002 *Progress of Electromagnetics Research PIERS* **35** 1
 - [11] Zhang Y, Grzegorzcyk T M, Kong J A 2001 *Progress of Electromagnetics Research PIERS* **35** 271
 - [12] Wu R X 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 076105
 - [13] Ziolkowski R W, Engheta N 2003 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **51** 2546

Negative effective refraction index in guided wave mode for periodic layered ferrite-dielectric/metallic film composites *

Zhao Tian-En Wu Rui-Xin[†] Yang Fan Chen Ping

(*Department of Electronic Sciences and Engineering , Nanjing University , Nanjing 210093 , China*)

(Received 10 March 2005 ; revised manuscript received 2 July 2005)

Abstract

We have studied the effective refraction index of the guided wave mode in periodic layered ferrite-dielectric/metal film composites. Using the equivalent transmission line approach we have analyzed and calculated the dispersion characters and then the effective refraction index of the composites. We have found that the effective refraction index of the composites will be negative within a certain frequencies only when the wave is in TE mode. The loss of the composite is closely related to the dielectric layers , which can be effectively reduced by decrease the dielectric loss. However , too small dielectric loss results in disappearing of the negative refraction index.

Keywords : negative refraction index , guided wave mode , equivalent transmission line approach

PACC : 4110F , 4210F , 7550B

*Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60471020) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB719805).

[†] E-mail : rxwu@nju.edu.cn