

基于传输线的单负材料双层结构的隧穿性质的隧穿性质*

张利伟^{1)2)†} 王佑贞²⁾³⁾ 赫 丽²⁾ 许静平²⁾

1)(河南理工大学物理化学学院,焦作 454000)

2)(同济大学波耳固体物理研究所,上海 200092)

3)(中国科学院光电研究院,北京 100190)

(2009 年 9 月 29 日收到; 2009 年 12 月 13 日收到修改稿)

通过传输线方法实现了负介电常数(ENG)和负磁导率(MNG)材料,并在实验上研究了由两种单负材料组成的双层结构(ENG-MNG)的电磁隧穿性质.结果表明,两种单负材料均不支持电磁波的传播,然而 ENG-MNG 双层结构在结构的平均介电常数和平均磁导率分别为零的条件下,具有完全隧穿模,并且这一隧穿模不随着结构尺度的改变而改变.在隧穿频率点,通过对 ENG-MNG 双层结构中电场分布的模拟与测量,实验上观察到了倏逝场的指数放大.

关键词: 单负材料, 隧穿模, 倏逝场, 传输线

PACC: 4225B, 4110H, 4270Q

1. 引 言

近年来,由亚波长单元构成的特异材料(Metamaterials)由于其奇异的电磁性质和应用成为国际上热门的研究领域.研究较多的特异材料主要包括左手材料和单负材料.左手材料的概念最早由 Veselago 于 1968 年在理论上提出^[1],它同时具有负的介电常数和负的磁导率,具有一些与正折射率材料不同的电磁性质.由于左手材料具有对倏逝场(evanescent field)放大的特性,而用于完美成像中^[2].单负材料是介电常数和磁导率两个参量中只有一个为负的材料^[3-8].介电常数为负($\epsilon < 0$),而磁导率为正($\mu > 0$)的材料被称为负介电常数(ENG)材料,介电常数为正($\epsilon > 0$),而磁导率为负($\mu < 0$)的材料被称为负磁导率(MNG)材料.电磁波在理想单负材料中的波矢是虚数,因而单负材料中只存在倏逝场,电磁波不能传播.然而两种单负材料或者单负材料和正常材料的组合结构却可以表现出许多奇异的隧穿性质^[3-8].由两种单负材料形

成的周期性结构由于局域在两种材料界面上的隧穿模之间的耦合作用,可以实现有效的负折射率频率通带或零有效相位能隙^[7].尤其是由负介电常数材料和负磁导率材料组成的双层结构^[3,4,9],在结构的平均介电常数和平均磁导率均为零的条件下,此时的双层结构等效为零折射率材料,它对电磁波是完全透明的.电磁波在跨越 ENG 材料和 MNG 材料的界面时,为了满足边界条件,电场、磁场的导数在界面两侧必须异号或为零,这就导致电磁场的大部分能量局域在界面上,形成特殊的界面模式.对满足零平均参数的频率,界面模演变为共振隧穿模,导致共振透射的发生,在单负材料中倏逝场会得到指数放大^[4].理论研究表明隧穿模的频率几乎不受结构的尺度和入射角的影响^[10].目前,一定波段的单负材料可以使用金属线阵列、金属谐振结构和传输线方法人工制备^[4,11-15].尤其是传输线方法实现的特异材料具有较低的损耗,更有利于特异材料的研究应用^[12-15].

在本文中,通过传输线方法实现了一维的单负材料,研究了由负介电常数和负磁导率材料构成的

* 国家自然科学基金(批准号:10634050,10904032,10904113),河南省教育厅自然科学基金(批准号:2010B140005),河南理工大学青年骨干教师项目(批准号:649144)和河南理工大学博士基金(批准号:B2009-88)资助的课题.

† E-mail: zlwphu@hotmail.com

双层结构 ENG-MNG 的隧穿性质及其内部的电场分布. 实验结果表明, 单负材料不支持电磁波的传播, 然而 ENG-MNG 双层结构在平均介电常数和平均磁导率分别为零的条件下, 具有隧穿模, 这一隧穿模不随着结构尺度的改变而改变. 在隧穿频率点, 通过对 ENG-MNG 双层结构中电场(压)分布的模拟与测量, 发现单负材料中的倏逝场是指数放大的. 这也将为倏逝场的实验研究及其在完美成像中的应用提供了一研究平台.

2. 理论模型与实验方法

考虑一置于真空中的双层结构 ENG-MNG, 如图 1 所示, 它是由负介电常数(ENG)材料和负磁导率(MNG)材料组成. 材料层 ENG 的介电常数和磁导率分别为 $\varepsilon_{\text{ENG}}, \mu_{\text{ENG}}$, 厚度为 d_{ENG} , 材料层 MNG 的介电常数和磁导率分别为 $\varepsilon_{\text{MNG}}, \mu_{\text{MNG}}$, 厚度为 d_{MNG} . 当结构的平均介电常数和平均磁导率分别为零时, 即

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \frac{\varepsilon_{\text{ENG}} d_{\text{ENG}} + \varepsilon_{\text{MNG}} d_{\text{MNG}}}{d_{\text{ENG}} + d_{\text{MNG}}} = 0, \\ \bar{\mu} &= \frac{\mu_{\text{ENG}} d_{\text{ENG}} + \mu_{\text{MNG}} d_{\text{MNG}}}{d_{\text{ENG}} + d_{\text{MNG}}} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

两种单负材料的有效波阻抗和有效相位匹配, 会出现完全隧穿^[3]. 在隧穿频率点, 电磁场分别在两种单负材料中指数增大和减小, 在界面处达到最大值, 如图 1 所示. 这是由于电磁波在跨越负介电常数材料和负磁导率材料的界面时, 必须满足边界连续条件

$$j \frac{1}{\omega \mu_{\text{ENG}}} \frac{\partial E_y}{\partial z} \Big|_{z=0^-} = j \frac{1}{\omega \mu_{\text{MNG}}} \frac{\partial E_y}{\partial z} \Big|_{z=0^+}$$

和

$$j \frac{1}{\omega \varepsilon_{\text{ENG}}} \frac{\partial H_y}{\partial z} \Big|_{z=0^-} = j \frac{1}{\omega \varepsilon_{\text{MNG}}} \frac{\partial H_y}{\partial z} \Big|_{z=0^+},$$

介电常数和磁导率具有相反的符号时, $\frac{\partial E_y}{\partial z} \Big|_{z=0^-}$ 和

$\frac{\partial E_y}{\partial z} \Big|_{z=0^+}$ ($\frac{\partial H_y}{\partial z} \Big|_{z=0^-}$ 和 $\frac{\partial H_y}{\partial z} \Big|_{z=0^+}$) 必须具有相反的

符号, 这就要求电磁场的大部分能量要局域在界面上. 从图 1 中也可以看出, 倏逝场在隧穿结构中得到了放大, 并且随着结构尺度的增大, 界面处的局域场越强.

单负材料可以由不同的人工电磁介质来实现, 其中传输线(TL)方法具有较低的损耗. 在普通的微带传输线中通过周期性的加载串联电容(C)可以在

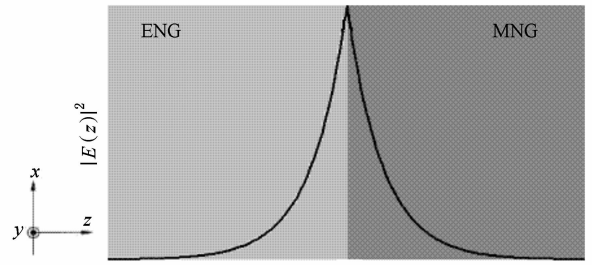


图 1 由 ENG 和 MNG 组成的双层隧穿结构及其内部场分布

一定频段实现有效的 MNG 材料, 周期性的加载并联电感(L)可以实现有效的 ENG 材料^[4,12]. 为了方便, 我们称用来实现 ENG 材料和 MNG 材料的传输线分别为 ENG TL 和 MNG TL, 其电路模型和等效电路如图 2 所示. 当传输线中的单元长度相对导波波长来说比较小时, 由此结构实现的单负材料可以认为是有效均匀的, 有效的介电常数和磁导率通过周期性分析可以得到^[12], 即

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{MNG}} &= \frac{1}{p} C_0, \\ \mu_{\text{MNG}} &= p \left(L_0 - \frac{1}{\omega^2 C d_{\text{MNG}}} \right), \\ \varepsilon_{\text{ENG}} &= \frac{1}{p} \left(C_0 - \frac{1}{\omega^2 L d_{\text{ENG}}} \right), \\ \mu_{\text{ENG}} &= p L_0, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 p 为微带线的结构常数, L 和 C 为加载的并联电感, 串联电容, L_0 和 C_0 分别为微带线的分布电感和分布电容, d_{ENG} 和 d_{MNG} 分别为单元长度. 从方程(2)可以看出, 当角频率 $\omega < 1/\sqrt{L_0 C d_{\text{MNG}}}$ 时, 传输线相当于有效的 MNG 材料, 当 $\omega < 1/\sqrt{C_0 L d_{\text{ENG}}}$ 时, 传输线相当于有效的 ENG 材料. 把两种传输线级联在一起就可以实现 ENG-MNG 结构, 通过对传输系数、电压分布的模拟和测量来研究其电磁特性. 实验中我们主要采用 Agilent 公司生产 ADS 仿真软件对 S_{21} 参数和电压分布进行了模拟, 使用 Agilent 8722ES 矢量网络分析仪对 S_{21} 参数进行了测量. 要测量结构中电压幅度分布, 需要一个激励信号和示波器, 并且要探得每个单元位置处的电压幅度. 在本实验中采用的电压分布测量方法与文献[16]一样, 只是使用的信号是单频正弦波, 测量的是各位置点信号的幅值. 实验中 1.03 GHz 的单频波是由 Agilent E8267D 矢量信号发生器产生的, 由 Tektronix 公司的 P7350 的差分探头结合 Tektronix 的 TDS7704B 示波器对 ENG-MNG 结构中每一单元

位置(如图3(c)中 $p_0, p_1, p_2, \dots, p_{12}$)的电压幅值进

行探测,进而研究其中的场分布情况.

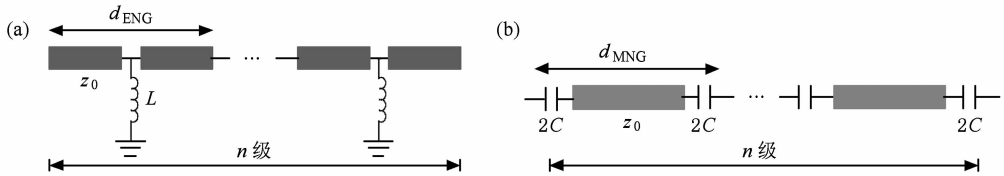


图2 ENG传输线(a)和MNG传输线(b)的等效电路

3. 实验与分析

在实验中,采用介电常数为4.75,厚度为1.6 mm的FR-4环氧树脂复合玻璃纤维布覆铜板为基材制作一维的周期性结构传输线,微带线的特征阻抗设计为 $Z_0 = 50 \Omega$,结构参数 $p \approx 4.05$ ^[14].可以选择不同的集总元件和单元长度,在某一频段实现具有负介电常数和负磁导率特性的传输线.在MNG传输线中,单元长度选择为7.5 mm,加载的电容 $C = 4$ pF.在ENG中,单元长度为7 mm,电感 $L = 10$ nH.根据(1)和(2)式,由相等单元数ENG和MNG传输线级联的双层结构约会在1.21 GHz出现完全隧穿模.图3(a),(b)和(c)分别是包含10个周期单元的MNG传输线,ENG传输线和 ENG_6MNG_6 的照片,其中 ENG_6MNG_6 是由6个ENG传输线单元和6个MNG传输线单元级联而组成的.

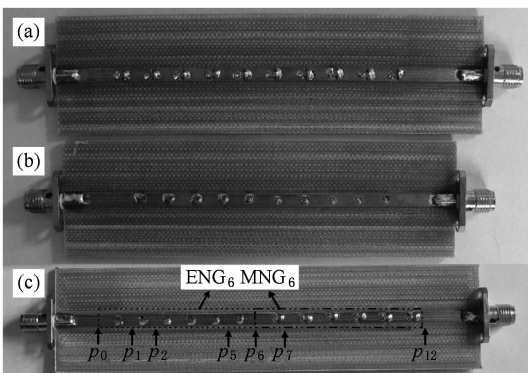


图3 实验制备的MNG传输线(a),ENG传输线(b)和由两种单负传输线构成的 ENG_6MNG_6 结构(c)照片

图4(a)和(b)分别是基于真实集总元件模拟和测量的两种单负传输线和三种双层结构 $ENG_4MNG_4, ENG_6MNG_6, ENG_8MNG_8$ 的 S_{21} 参数.在 $ENG_4MNG_4, ENG_6MNG_6, ENG_8MNG_8$ 中,双层结构的长度逐渐增大.从模拟结果可以看出,MNG传输

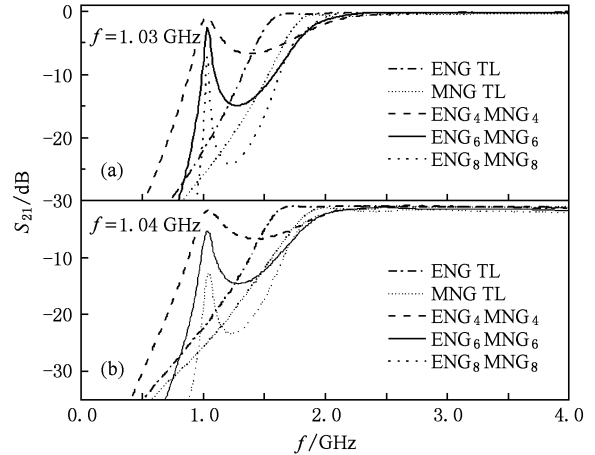


图4 模拟(a)和测量(b)的MNG传输线,ENG传输线和三种双层结构 $ENG_4MNG_4, ENG_6MNG_6, ENG_8MNG_8$ 的 S_{21} 参数

线约在低于1.63 GHz时具有负磁导率特性,ENG传输线约在低于1.46 GHz时具有负介电常数特性,两种传输线的截止频率与由(2)式的计算值有一定的差别,主要是由于真实元件和理想元件的差别所致.模拟结果显示两种单负传输线均不支持电磁波的传播,在其内部只有倏逝场.然而对于 $ENG_4MNG_4, ENG_6MNG_6, ENG_8MNG_8$ 三种结构来说,它们均约在1.03GHz出现了隧穿模,并且隧穿模在结构尺度的增加时并没有发生改变.测量结果和模拟结果有很好地符合,约在1.04 GHz,双层结构出现了隧穿模.

对于由ENG和MNG两种单负材料组成的双层隧穿结构来说,在隧穿频率点,透射场是通过隧穿机理而形成的,电磁场能量主要集中在界面,在两种单负材料中场分别是指数增大和减小的,倏逝场在其中一种单负材料中是放大的.为了研究倏逝场的指数放大特性,我们对ENG-MNG结构的场分布在隧穿频率点进行了模拟和测量.图5分别是基于真实元件在隧穿频率点 $f_0 = 1.03$ GHz(1.04 GHz)模拟(测量)的电压分布,为了直观,我们把各点模

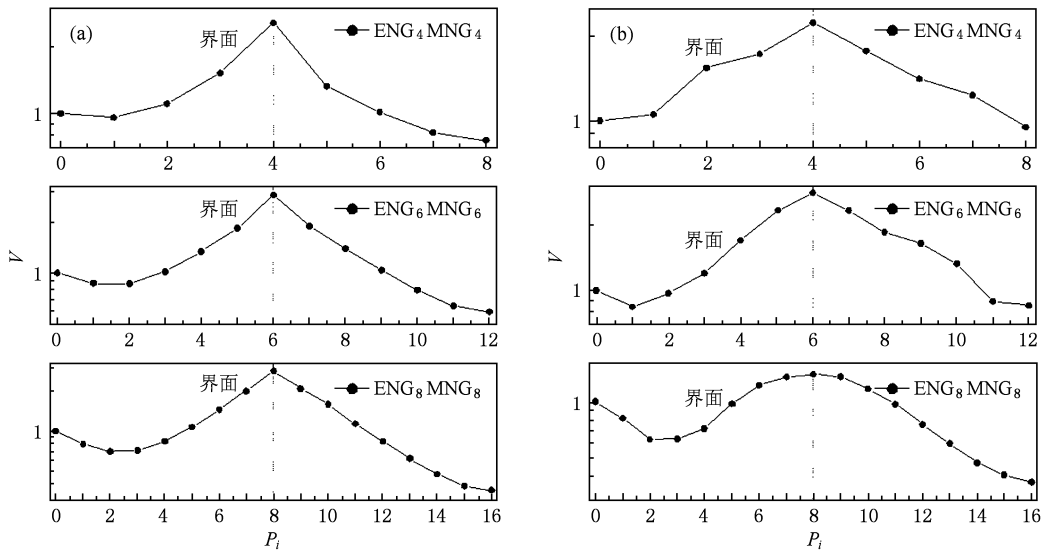


图5 基于真实元件,在 ENG_4MNG_4 , ENG_6MNG_6 , ENG_8MNG_8 结构中模拟(a)和测量(b)的相对电压分布,其中,纵坐标 V 表示相对电压分布的对数值,横坐标 P_i 表示双层结构中的第几个单元

拟和测量的绝对电压都相对于输入端口处(图3(c)中的 P_0 处)的电压进行了归一化,然后再取指数坐标.在图5中,纵坐标 V 表示相对电压分布,横坐标 P_i 是双层结构中的第几个单元.从图5(a)模拟结果可以明显的看出,电压的指数分布在 ENG 传输线中基本上是线性逐渐增加的,在界面处达到最大,说明单负材料中的倏逝场是指数趋势的放大的.对于在 ENG_4MNG_4 , ENG_6MNG_6 , ENG_8MNG_8 三种结构,界面处的电压的绝对幅度分别大约相对于输入端的 2.6, 2.9 和 2.8 倍.由于是基于真实元件的模拟,会有一些的损耗,所以输出端的电压值相对于输入端有一定的下降,从图中可以看出,在界面的另一侧,电压的幅度是指数减小的.图5(b)是测量的三种隧穿结构在隧穿点 $f_0 = 1.04$ GHz 的电压分布,其中入射场是由 Agilent E8267D PSG 信号源产生的正弦波场.由于实际介质板和集总元件的损耗,测量的 ENG_4MNG_4 , ENG_6MNG_6 界面处电压的放大幅度相对于模拟结果有一定的下降,界面处的电压幅度大约为输入值的 2.2 和 2.8 倍.当结构的尺度增大

时,损耗也随之增大,所以我们在实际的测量中发现,在 ENG_8MNG_8 中场分布与模拟结果误差比较大.实验中还发现,如果电磁波从 MNG 传输线端入射,ENG 传输线端出射时,则会得到类似的结果.由于材料并不是理想均匀的,在测量的倏逝场放大幅度情况与理论值(图1)有所不同.但总的来说,在损耗不是很大的情况下,我们用传输线结构能很好的从实验上研究单负材料双层结构的隧穿性质及倏逝场的放大.尽管本实验的工作频率是在微波波段进行的,随着特异材料在红外和光波段的实现,该结果在相应波段也是适用的.

4. 结 论

运用传输线方法从实验上研究了由负介电常数材料和负磁导率材料构成的双层结构的隧穿模和电压分布.实验结果表明,ENG-MNG 结构在一定条件下由于倏逝场得到了放大而具有隧穿模,并且隧穿频率不随着结构尺度的改变而改变.

- [1] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Usp* **10** 509
 [2] Gbrcic A, Eleftheriades G 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 117403
 [3] Alù A, Engheta N 2003 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **51** 2558

- [4] Liu R, Zhao B, Lin X Q, Cheng Q, Cui T J 2007 *Phys. Rev. B* **75** 125118
 [5] Zhou L, Wen W J, Chan C T, Shen P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 243905

- [6] Lakhtakia A, Krowne C M 2003 *Optik* **114** 305
- [7] Jiang H T, Chen H, Li H Q, Zhang Y W, Zi J, Zhu S Y 2004 *Phys. Rev. E* **69** 066607
- [8] Deng X H, Liu N H, Liu G Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7280 (in Chinese) [邓新华、刘念华、刘根泉 2007 物理学报 **56** 7280]
- [9] Dong L J, Jiang H T, Yang C Q, Shi Y L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4657 (in Chinese) [董丽娟、江海涛、杨成全、石云龙 2007 物理学报 **56** 4657]
- [10] Jiang H T, Chen H, Zhu S Y 2007 *Opt. Lett.* **32** 1980
- [11] Hu C G, Liu L Y, Chen X N, Luo X G 2008 *Optics Express* **16** 21544
- [12] Caloz C, Itoh T 2005 *Electromagnetic Metamaterials, Transmission Line Theory and Microwave Applications* (Wiley and IEEE Press) 59—130.
- [13] Li H Y, Zhang Y W, Wang P C, Li G Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6480 (in Chinese) [李海洋、张治文、王蓬春、李贵泉 2007 物理学报 **56** 6480]
- [14] Zhang L W, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2006 *Phys. Rev. E* **74** 056615
- [15] Zhang L W, Zhang Y W, Yang Y P, Li H Q, Chen H, Zhu S Y 2008 *Phys. Rev. E* **78** R035601
- [16] Wang Y Z, Zhang Y W, He L, Liu F Q, Li H Q, Chen H 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 113503

The tunneling properties of the bilayer structure composed of single negative materials based on transmission lines^{*}

Zhang Li-Wei^{1)2)†} Wang You-Zhen²⁾³⁾ He Li²⁾ Xu Jing-Ping²⁾

1) (School of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

2) (Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

3) (Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 29 September 2009 ; revised manuscript received 13 December 2009)

Abstract

Epsilon-negative (ENG) and mu-negative (MNG) materials are fabricated by using transmission line (TL) approach, the electromagnetic tunneling properties of the bilayer structures with ENG-MNG materials are experimentally investigated. The results indicate that the two kinds of single negative materials do not support electromagnetic propagation modes, whereas the completely tunneling phenomenon occurs in the ENG-MNG pairs under special conditions when the average permittivity or average permeability equals zero respectively. Furthermore, the tunneling modes are insensitive to the scale length. Exponential amplification of the evanescent wave is also experimentally observed by simulating and measuring the electric field distributions in ENG-MNG structures at the tunneling frequency.

Keywords: single negative materials, tunneling modes, evanescent field, transmission lines

PACC: 4225B, 4110H, 4270Q

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10634050, 10904032, 10904113), the Natural Science foundation of Henan Education Committee (Grant No. 2010B140005), the Program of Youthful Key Teachers in Henan Polytechnic University (Grant No. 649144) and the Doctoral Foundation of Henan Polytechnic University (Grant No. B2009-88).

[†] E-mail: zlwphu@hotmail.com