

基于谐振结构的左右手传输线的奇异传输性质^{*}

李海洋¹⁾ 张治文^{1,2)†} 王蓬春¹⁾ 李贵泉¹⁾

1) 同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092)

2) 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092)

(2006 年 12 月 30 日收到, 2007 年 4 月 9 日收到修改稿)

通过对一种具有谐振结构的左右手传输线进行了数值仿真和分析, 从有效磁导率和介电常数及色散关系来说明其奇异的传输特性. 把这种左右手传输线用作漏波天线并测量了在不同频率点的方向图, 从而实验上验证了这种特殊结构在不同的频率范围内可以实现一个左手性通带, 也可以实现两个左手性通带. 对这种结构传输特性的研究, 有助于其在漏波天线方面的应用.

关键词: 左右手传输线, 左右手通带, 色散关系, 方向图

PACC: 4270Q, 4110H, 7870G, 1120F

1. 引言

近年来, 一种被称作为负折射率材料或者左手性材料(LHM)^[1], 吸引了来自科学界和工程界的广泛关注. Science 杂志将这种左右手材料称为 2003 年以来科学领域的十大突破之一^[2]. 由于这种材料同时具有负的介电常数(ϵ)和磁导率(μ)^[3,4], 从而具有负的折射率. 电磁波在其中传播, 波矢的方向和能流的方向相反, 即具有负的相速度和正的群速度, 并可表现出一些奇异的电磁特性, 如逆多普勒效应、逆切伦科夫辐射以及逆斯涅尔折射效应等^[1]. Pendry 和 Smith 利用细金属导线阵列和有缝谐振环阵列构造介电常数与磁导率同时为负的人工媒质^[5-7], 但是这种结构几何尺寸较大, 并且具有很大的损耗和负折射的带宽很窄, 很难应用于射频/微波电路和仪器中. Caloz 等提出利用传输线理论构造这种左手性媒质, 设想利用微带元件(叉指形电容和螺旋形电感)制成人工的左手性传输线, 这种结构具有适中的插入损耗和较宽的带宽^[8,9]. Grbic 和 Eleftheriades 等人在传输线中周期性的加载 $L-C$ 制作折射率为负值的 Metamaterials. 由于微带线本身会产生寄生效应, 在高频中表现为右手性, 所以对于这种结构不是纯左手性材料, 而是左右手复合传输线.

这种在微带传输线基础上周期性的加载 $L-C$ 构成的一维特异性材料, 在集总元件允许的频率范围内, 可以通过选取不同的 $L-C$ 值, 很容易地实现左手性通带的调节^[10]. 由于这种结构具有较宽的左手性通带, 并且传输损耗比较小, 因此可以制作任意耦合度的耦合器^[11]和体积很小的高品质滤波器^[12]. 本文的研究将有助于射频/微波电路和仪器中更好的应用.

在文献 [13] 和 [14] 中, 作者用开口金属环和金属线组成特异性材料, 对其性质研究中发现, 当调节结构从而改变有效磁导率和有效介电常数的谐振频率的大小时, 在 S 参数传输曲线的两个通带中即实现低频的通带表现为左手性通带, 高频通带表现为右手性通带; 也实现了低频的通带为右手性通带, 高频的通带为左手性通带. 但在左右手复合传输线中是否也可以有类似的现象至今尚未有明确的结论.

本文根据传输线理论, 分析讨论了在由分布微带元件构造的左右手传输线的基础上, 同时串联和并联了电容的这一特殊结构, 如图 1 所示. 并且通过理论计算和实验说明了基于传输线理论的结构同样可以实现类似而又不同于文献 [13] 和 [14] 中提到的左右手通带性质多样性的问题. 这种特殊结构在不同的频率范围内具有一个左手性通带或者两个左手性通带, 其左右手性质是由结构中有效磁导率和有效介电常数谐振频率的相对大小所决定.

^{*} 国家重点基础研究发展规划 973 项目(批准号 2006CB010901) 国家自然科学基金(批准号 50477048)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: yewenzhang@online.sh.cn

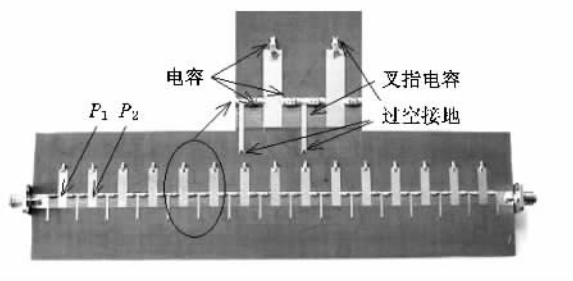


图1 结构示意图

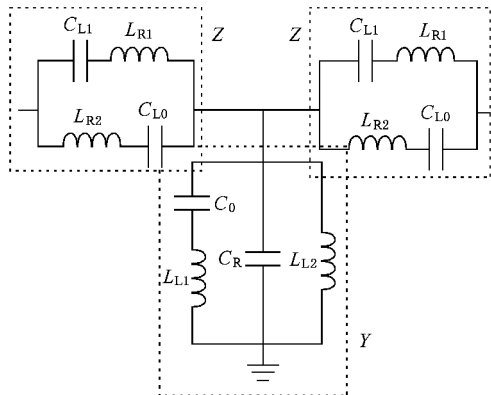


图2 基本单元的等效电路

2. 原 理

对于左右手复合传输线结构,其单元长度相对波长很小的情况下,既满足长波近似的条件下,传输线可以看作各向同性的线性均匀介质,并且支持TEM传播模式.在TEM传播模式下,电场和磁场在传播方向上的分量为零,此时麦克斯韦方程和电报方程具有相同的表示形式,把电报方程代入麦克斯韦方程组,这样就可以把传输电路中的集中元件参数和微带分布参数与微观的有效介电常数和磁导率联系起来,即

$$Z' = j\omega\mu, \quad (1)$$

$$Y' = j\omega\epsilon, \quad (2)$$

其中 Z' 和 Y' 分别表示在传输线串联的单位阻抗和并联的单位导纳.由(1)和(2)式得到对于传播TEM模式的左右手复合传输线,可以从串联的阻抗和并联的导纳数值大小来反映有效磁导率和有效介电常数的大小.

对于实验设计的实物结构如图1所示,其基本单元的等效电路如图2所示,其中 C_{L1} 是串联加载的电容, L_{R1} 是用加载串联电容处微带本身的电感,

C_{L0} 和 L_{R2} 是叉指电容值和其本身的电感, C_0 是并联加载电容, C_R 微带线和地板之间等效电容, L_{L1} 和 L_{L2} 是旁支电感.根据基本单元的等效电路图2,可以得出

$$Z' = Z/d$$

$$= \left\{ \left(j\omega L_{R2} + \frac{1}{j\omega C_{L0}} \right) \parallel \left(j\omega L_{R1} + \frac{1}{j\omega C_{L1}} \right) \right\} / d \quad (3)$$

$$Y' = Y/d$$

$$= \left\{ \left(\frac{1}{j\omega L_{L1}} \parallel j\omega C_0 \right) + j\omega C_R + \frac{1}{j\omega L_{L2}} \right\} / d, \quad (4)$$

其中 Z 和 Y 分别表示一个结构单元的串联的阻抗和并联的导纳的大小, Z' 和 Y' 分别表示在传输线串联的单位阻抗和并联的单位导纳的大小, d 表示左右手传输线的一个单元的长度.结合(1)和(2)式可以求出其有效磁导率和有效介电常数.

对于图1这种左右手传输线,是由很多个这样的基本单元级联组成的,于是可以用传输矩阵和周期性边界条件的 Bloch 原理求出其色散关系.这里我们不考虑传播损耗,即 $r = \alpha + j\beta$ 中 $\alpha = 0$ 于是可以得到

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{\text{单元}} = \begin{bmatrix} 1 + ZY & Z[1 + ZY] \\ 1 & 1 + ZY \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$e^{2j\beta d} - 2[1 + ZY]e^{j\beta d} + 1 = 0, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\cos^{-1}(1 + ZY)}{d}. \quad (7)$$

3. 数值仿真

对于TEM传播模式下,由(1)和(2)式知道,串联阻抗的大小反映有效磁导率的大小,并联导纳的大小反映有效介电常数的大小.在图1结构中,我们可以设计参数大小不同的实物图,根据全波模拟的方法提取出各个参数值的大小^[15].这种特殊结构中,由于电路中串联的阻抗和并联的导纳都会发生谐振,其谐振频率的位置与电路中的微带分布和集中元件参数大小有关系,因此当选取不同的参数, S_{21} 传输曲线上在不同的通带内表现为不同的左右手性质.通过(1)(2)(3)和(4)式可以计算出有效磁导率和有效介电常数随频率变化的关系(7)式可以求出对应的色散关系,如图3所示.图3中(a)(1)(b)(1)和(c)(1)虚线表示是有效磁导率(与串联的阻抗对应)随频率变化关系,实线表示的是有效介电常数(与并联导纳对应)随频率的变化关系(a)

(2)(b)(2)和(c)(2)表示三种情况下各自对应的色散关系.表1是图3中计算有效磁导率和介电常数及色散关系用到的参数.

在(a)(1)中,当 $f < f_{\epsilon 1}$ 时, $\mu < 0, \epsilon > 0$,对应(a)(2)色散关系中为禁带;当 $f_{\epsilon 1} < f < f_{\epsilon 2}$ 时, $\mu < 0, \epsilon < 0$,对应色散关系中为左手性通带;当 $f_{\epsilon 2} < f < f_{\mu 1}$ 时, $\mu < 0, \epsilon > 0$,对应色散关系中为禁带;当 $f_{\mu 1} < f < f_{\mu 2}$ 时, $\mu > 0, \epsilon > 0$,对应色散关系中为右手性通带;当 $f_{\mu 2} < f < f_{\mu 3}$ 时, $\mu < 0, \epsilon > 0$,对应色散关系中为禁带;当

$f > f_{\mu 3}$ 时, $\mu > 0, \epsilon > 0$,对应色散关系中为右手性通带.

在(b)(1)中随着参数改变,有效磁导率和有效介电常数谐振频率点位置也随之改变.在(b)(2)色散关系中,可以得到第一、三个通带为右手性通带,第二个通带为左手性通带.同理,在(b)(3)中可以得到第一、二个通带为右手性通带,第三个通带为右手性通带.下面通过实验进行验证.

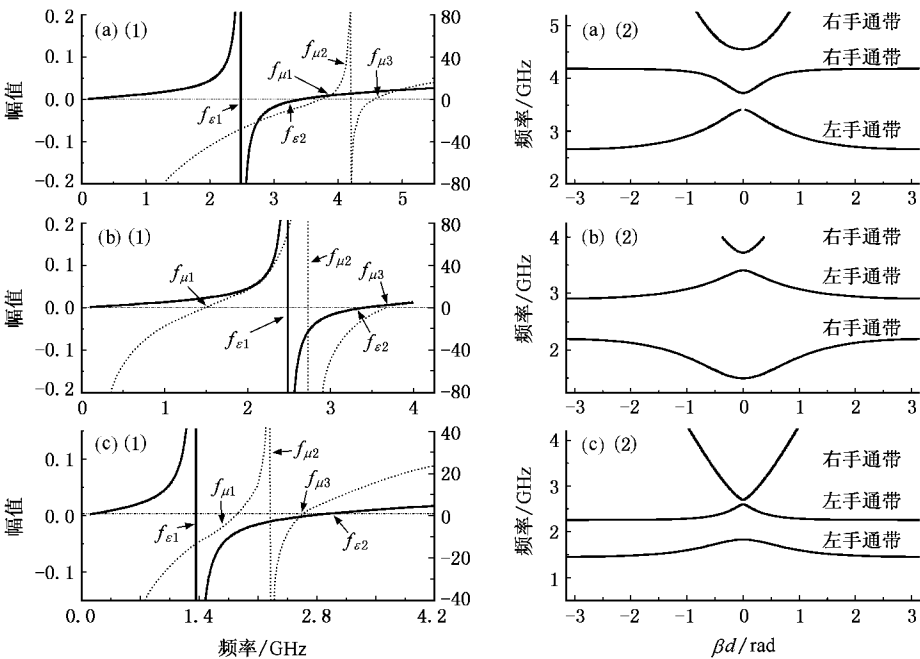


图3 有效磁导率和介电常数随频率变化关系以及色散关系

参数	$C_{L1}/$	$L_{R1}/$	$C_{L0}/$	$L_{R2}/$	$C_0/$	$L_{L1}/$	$C_R/$	$L_{L2}/$
	pF	nH	pF	nH	pF	nH	pF	nH
(a)	0.9	2.029	0.485	2.525	0.9	4.565	1.018	4.6
(b)	0.9	2.029	4.485	2.520	0.9	4.565	1.018	3
(c)	3	2.529	1.485	2.592	3	4.565	1.018	5.3

4. 实验结果与讨论

通过数值仿真和分析可以知道,对于图1结构,当电路中选择不同参数时,可以得到不同性质的色散关系.在文献[16]中已经设计并且在实验上证明了图3(a)中对应的色散关系,即第一个通带为左手带,第二个和第三个为右手带这种情况.

本文所做的实验是验证图3(c)对应的情况,即第一、二通带均为左手性通带,第三个通带为右手性通带.实验所用结构采取图1所示,在微带分布元件构造的左右手传输线的基础上同时串联和并联贴片电容的结构.采用介电常数 $\epsilon = 2.2$,介质板厚度 $h = 2\text{ mm}$ 的聚四氟乙烯玻璃纤维布覆铜板F4B-2为基材,由印刷版电路(PCB)技术制作一维的周期性结构左右手传输线.实验中设计的周期数为15,具体结构的物理参数:叉指电容由6对长为4.18 mm,宽度为0.18 mm的金属条组成,每相邻金属条间距是0.18 mm.旁支电感分别由宽1 mm,长5.58 mm以及宽为4 mm,长为10.6 mm的金属条构成,末端通过过孔与地板接地.在传输线上每单元串联加载了两个TDK的贴片电容,贴片电容是焊接在宽为1.3 mm,长度为1.7 mm,中心距离叉指电容的上边缘为1.41 mm远的微带线上.在长度为10.6 mm的

旁支电感上加载一个 TDK 的贴片电容. 本实验中串联支路加载的两个贴片电容和并联支路加载的贴片电容取的参数值大小一样, 即 $C_{L1} = C_0 = 1\text{ pF}$.

4.1. 实验模拟

用 ADS 模拟仿真得到其传输参数, 如图 4 虚线所示. 发现模拟值得到的传输参数上有三个通带. 对于左手性材料, 电磁波在其中传播, 波矢的方向和能流的方向相反, 即具有负的相速度, 在传播方向相位是超前的. 因此可以借助时域模拟的方法来观察固定频率下相邻两点的相位是超前还是落后来判断通带的左右手性质^[17], 如图 5 所示. 为了进一步说明通带内的不同的左右手性质, 可以根据图 5 中相位关系求出对应的相速度的值^[17], 如表 2 所示. 图 1 中, P_1 和 P_2 是位于第二个单元和第三个单元所作的标记, 且信号从左边输入. 从图 5 和表 2 可以看到在频率 $f = 1.35\text{ GHz}$ 和 2.45 GHz , P_2 的相位超前 P_1 的相位, 并且相速度为负值, 说明该频率对应的通带表现为左手性; 在 $f = 3.05\text{ GHz}$, P_2 的相位落后 P_1 的相位, 相速度为正值, 说明该频率对应的通带表现为右手性. 从实验模拟可以很好地验证这种谐振结构具有两个左手性通带. 下面我们从实验上证明.

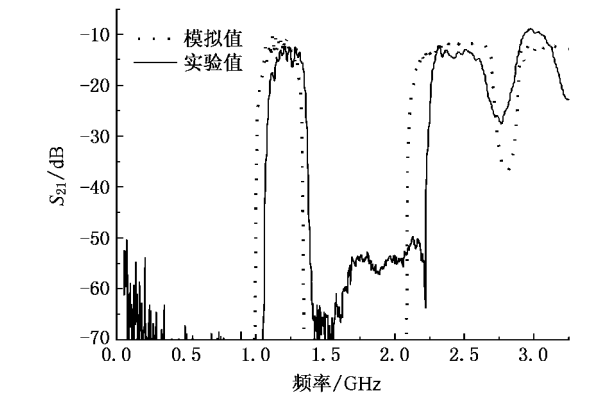


图 4 S_{21} 参数曲线随频率的变化关系

表 2 在频率 $f = 1.35\text{ GHz}$, 2.45 GHz 和 3.05 GHz 时 P_1 和 P_2 的相位差及相速度的值

模拟测量 f/GHz	1.35	2.45	3.05
$\Delta\Phi_{P_2-P_1} = \beta d/(\text{rad/m})$	-1.266	-0.845	0.682
相速度 $v_p/(\text{10}^8\text{ m/s})$	-0.87	-2.36	1.9

4.2. 实验测量与讨论

利用 Agilent 矢量网络分析仪 8722ES 测量这种

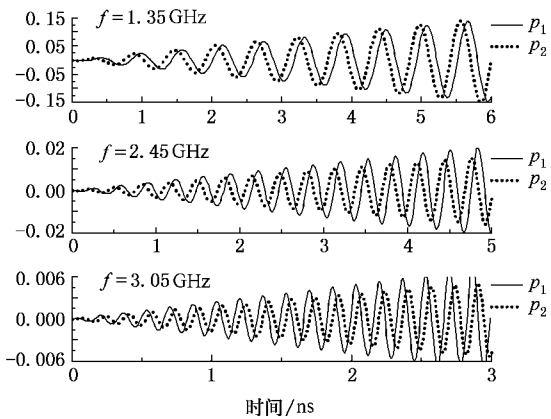


图 5 时域模拟

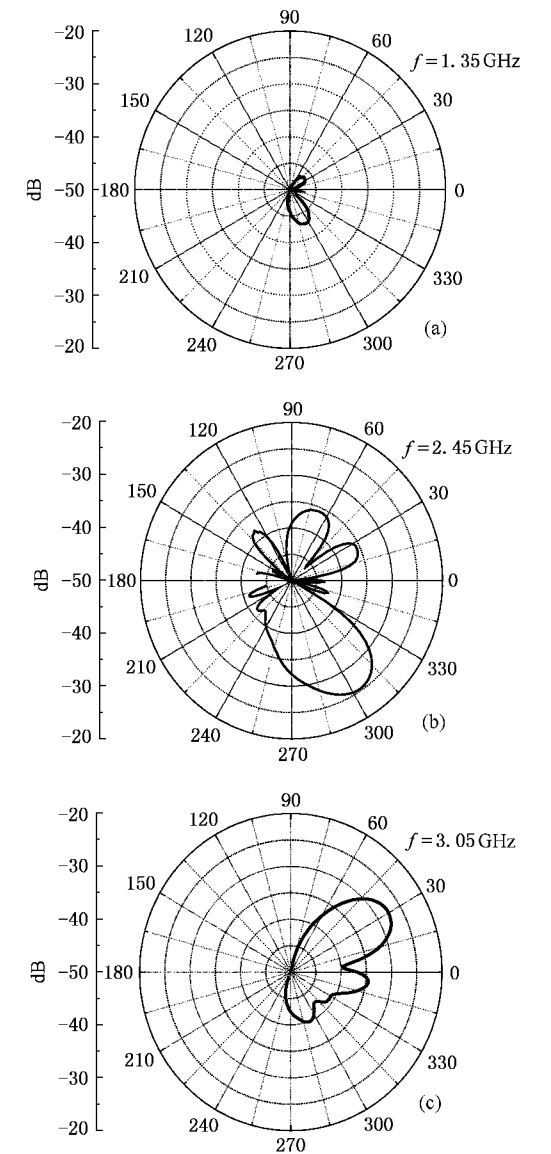


图 6 (a) $f = 1.35\text{ GHz}$ 的方向图 (b) $f = 2.45\text{ GHz}$ 的方向图 (c) $f = 3.05\text{ GHz}$ 的方向图

微带线的传输参数,如图 4 实线所示,实验测量值和模拟值基本符合.为了从实验上验证 S_{21} 参数曲线中通带的左右手性质,我们把这种特殊结构的左右手传输线用作微带漏波天线,并在微波暗室内利用天线测量系统测量了在某些频率下的电场 E 的方向图,如图 6 所示.当漏波天线工作在左手区内,支持后向波,会出现后向辐射;当其工作在右手区内,支持前向波,会出现前向辐射.所以本实验根据测量所得的方向图的是前向还是后向辐射来判断其通带得左右手性质.

图 6(a)在 $f = 1.35$ GHz 下,对应的电场 E 方向图是后向辐射,说明第一个通带是左手性通带;图 6(b)在 $f = 2.45$ GHz 下,对应的电场 E 方向图是后向辐射,说明第二个通带是左手性通带;图 6(c)在 $f = 3.05$ GHz 下,对应的电场 E 方向图是前向辐射,说明第三个通带是右手性通带.

比较这三个频率点下的方向图, $f = 1.35$ GHz 时的方向图中辐射效率很低,原因是第一个左手带 $f = 1.35$ GHz 频率点落在光锥以外,辐射很弱,而 $f = 2.45$ GHz 处在光锥内,波的传播模式为辐射模,所以辐射效率很高,如图 7 所示.在图 6(a)方向图中,虽然作为天线辐射效率不高,但主瓣和副瓣差值为 3.6 dB,足够说明该频率下的通带为左手性通带.因此我们从实验上验证了这种谐振结构可以具有两个左手性通带.同样,改变微带分布参数和集中元件,在一定条件下也可以实现第一、三通带为右手性,第二通带为左手性.这取决于串联支路阻抗和并联支路导纳的谐振频率的相对大小.

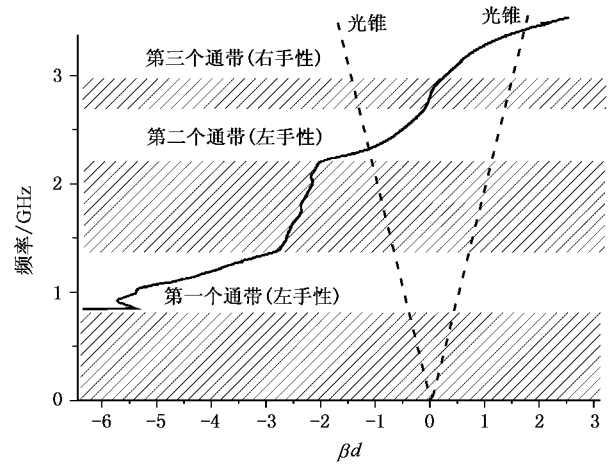


图 7 实验测量的色散曲线

5. 结 论

通过数值仿真和实验,证实了在分布微带元件构造的左右手传输线的基础上,同时又串联和并联了电容的这一具有谐振的结构,即可以实现一个左手性通带,也可以实现两个左手性通带.由于有效磁导率和有效介电常数的谐振频率的相对大小会发生变化,所以通过调节这一结构的分布参数大小可以得出不同的传输性质.并且这种具有谐振的结构可以被用作漏波天线,如果把加载的贴片电容换成变容二极管,那么就可以实现从后向到前向连续扫描.本文对特殊左右手传输线的研究,将有助于其在漏波天线方面的应用.

- [1] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Usp.* **10** 509.
- [2] Breakthrough of the year: The runners-up. 2003 *Science* **302** 2039
- [3] Chen L, He S L, Shen L F 2004 *Acta Phys. Sin.* **52** 2386 (in Chinese) [陈 龙、何赛灵、沈林放 2005 物理学报 **52** 2386]
- [4] Luo C R, Kang L, Zhao Q, Fu Q H, Song J, Zhao X P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康 雷、赵 乾、付全红、宋 娟、赵晓鹏 2005 物理学报 **54** 1607]
- [5] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [6] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE, Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075
- [7] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [8] Caloz C, Itoh T 2002 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **2** 412
- [9] Caloz C, Okabe H, Iwai T, Itoh T 2002 *USNC/URSI National Radio Science Meeting* **1** 39
- [10] Zhang D K, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 772 (in Chinese) [张东科、张治文、赫 丽、李宏强、陈 鸿 2005 物理学报 **54** 772]
- [11] Wang Y Z, Zhang Y W, Zhang D K, He L, Li H Q, Liu F Q, Chen H 2006 *Journal of Zhejiang University Science A* **7** 95
- [12] Sun Y Y, Zhang Y W, Liu F Q, He L, Li H Q, Chen H 2006 *Microwave and Optical Tech Letters* **49** 1015
- [13] Katsarakis N, Koschny T, Kafesaki M, Economou E N, Ozbay E, Soukoulis C M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **70** 201101
- [14] Koschny T, Kafesaki M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 107402
- [15] Caloz C, Sanada A, Itoh T 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **52** 983
- [16] Lim S, Caloz C, Itoh T 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 165
- [17] Wang Y Z, Zhang Y W, He L, Liu F Q, Li H Q, Chen H 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 113503

The transmission properties of resonant structure of one-dimension metamaterials^{*}

Li Hai-Yang¹⁾ Zhang Ye-Wen^{1,2)†} Wang Peng-Chun¹⁾ Li Gui-Quan¹⁾

1) *Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China*

2) *School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 200092, China*

(Received 30 December 2006 ; revised manuscript received 9 April 2007)

Abstract

The transmission properties of one-dimension metamaterials characterized by resonance were studied. With theoretic analysis it is shown that the transmission coefficient S_{21} has either one left-handed passband or two left-handed passbands under certain conditions. The experimental verification of the transmission properties has been realized by the composite right/left-handed transmission line used as a leaky-wave antenna.

Keywords : metamaterial , right/left-handed passband , dispersion curve , radiation pattern

PACC : 4270Q , 4110H , 7870G , 1120F

^{*} Project supported by the National Basic Research Program (973) of China (Grant No. 2006CB0L0901) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50477048).

[†] Corresponding author. E-mail : yewenzhang@online.sh.cn