

# 可调谐一维特异材料 (Metamaterial) 的微波传输性质\*

王素玲 张冶文<sup>†</sup> 赫 丽 李宏强 陈 鸿

(同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092)  
(2005 年 3 月 29 日收到, 2005 年 5 月 24 日收到修改稿)

利用变容二极管制作了可调谐一维左右手组合材料, 并对其进行了传输系数测量. 实验发现当电压升高时, 左手通带将向高频方向移动, 而禁带的终止频率保持不变. 基于微波传输线理论, 给出了这种左右手组合材料的色散方程, 实验曲线与理论曲线能够很好地符合.

关键词: 调谐, 特异材料, 传输系数, 变容二极管

PACC: 4270Q, 4110H, 7870G

## 1. 引 言

从电磁理论知道, 介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  为描述介质电磁性质的基本物理量, 在普通的介电材料中, 介电常数和磁导率均为正值. 由麦克斯韦方程组可知, 在介电常数和磁导率都为正值的物质中, 电场  $E$ 、磁场  $H$  和波矢  $k$  之间呈右手螺旋关系, 这样的物质被称为右手性材料 (right-handed medium, RHM).

1968 年, Veselago 从理论上探讨了介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  同时为负值的物质的电磁学性质<sup>[1]</sup>, 指出在介电常数与磁导率同时为负的介质中, 电磁波的电场  $E$ 、磁场  $H$  和波矢  $k$  之间呈左手螺旋关系. Veselago 称这种假想的介质为左手性材料 (left-handed materials, LHM). 1999 年, Pendry 等提出可以制作在某一频率区间的介电常数和磁导率同时为负值的左手性材料<sup>[2,3]</sup>. 2001 年 Smith 等制作出微波波段的介电常数和磁导率同时为负的材料<sup>[4,5]</sup>, 从实验上证明了左手性介质的存在. Pendry 等的工作引起了物理界对负折射问题极大的关注, 并把具有左螺旋性质的结构复杂的人工介质称为 Metamaterial<sup>[1-4]</sup>, 本文称这种性能奇特的材料为特异材料.

上述特异材料的实现是利用开口环谐振时在特定频段具有负介电常数和负磁导率的性质, 即用谐振的方法实现左手性传输. Eleftheriades<sup>[6]</sup>等提出可

以用在传输线中周期性加载电感和电容的非谐振法制备特异材料, 并从理论和实验上证明了实现左手性传输的可能性. Eleftheriades 指出, 在特定的频段, 加载电感对应负介电常数, 同时加载电容对应负磁导率<sup>[6]</sup>, 由于连接电容和电感的传统微带线为右手性材料, 所以这种结构被称为左右手组合材料. de Lustrac 等利用二极管电容的可调性实现了电调谐<sup>[7]</sup>, 之后 Sievenpiper 等相继提出了改进结构<sup>[8]</sup>. 近年来, 也有作者对可调谐滤波特性进行了理论研究<sup>[9]</sup>.

本文设计了在外加电压控制下的可调谐一维左右手组合人工带隙材料的制作, 成功地实现了左手通带和禁带的连续移动. 为进一步制作可调谐左右手漏波天线, 可调谐左右手耦合器等微波电子器件奠定了基础.

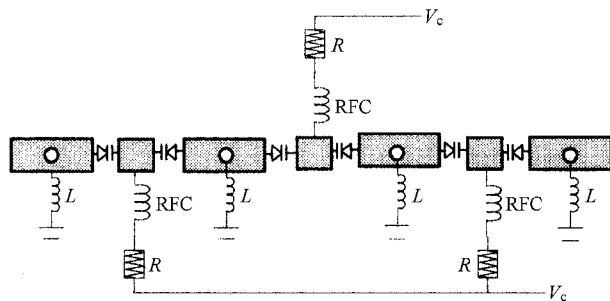


图 1 可调谐左右手组合材料电路结构示意图

\* 国家重点基础研究发展规划 (批准号 2001CB610406), 国家自然科学基金 (批准号 50477048, 10474072), 上海市科委资助的课题.

<sup>†</sup>E-mail: yewenzhang@online.sh.cn

## 2. 实验设计

### 2.1. 电路设计

在文献 [7] 提出的集总元件左右手组合带隙材料中,当周期性结构的单元长度与波长相比很小时,集总元件电容和电感的大小对左手通带的特性具有决定性的作用.当集总元件的电容改变或者电感改变时,左手通带的频率区间相应地发生变化.在微波波段,连续地改变表面安装元件电感的数值是很困难的,如果把文献 [7] 中的集总元件电容用变容二极管来代替,就可以方便地调节左右手组合材料的左手通带.图 1 是我们设计制作的一维可调谐左右手组合材料的结构示意图.

### 2.2. 一维可调谐左右手组合材料的实验制作

可调谐左右手组合材料采用双面印刷电路板制作.基底介电常数  $\epsilon_r = 4.75$ ,板厚 1.6 mm,印刷板上、下表面敷以铜箔,铜箔厚 30  $\mu\text{m}$ .变容二极管之间通过微带相连接,贴片电感  $L$  通过微带中的小孔把印刷板的上下表面连接起来.限流电阻  $R$  为 10 k $\Omega$ .微带线的宽度为 3.0 mm,由软件 Txlinc 可以知道,在频率为 2 GHz 时,微带线的特征阻抗为 50  $\Omega$ .微带的特征阻抗与矢量网络分析仪的阻抗相匹配,微波源与可调谐材料网络之间不存在反射波.电感采用  $L = 4.7$  nH 的贴片电感.可调电容采用 Philips 公司的变容二极管 BB135,最小电容值在频率为 1 MHz 时  $C = 2$  pF,变容比为 10.

## 3. 实验测量和讨论

### 3.1. 传输参数的幅值

散射参量的测量使用 Agilent Vector Network Analyzer 8722ES. 散射参量  $S_{21}$ (图 2),三条曲线分别对应于反向偏置电压 0.5 V、2 V 和 4.5 V.从图 2 不难发现:

1) 当变容二极管 BB135 的反向偏置电压增加时,二极管的电容减小,左手通带的起始频率点  $f_1$  向高频方向移动,同时禁带的起始频率  $f_2$  也向高频方向移动,即禁带的中心频率向高频方向移动,而禁带的终止频率  $f_3$ (右手通带的起始频率)几乎保持

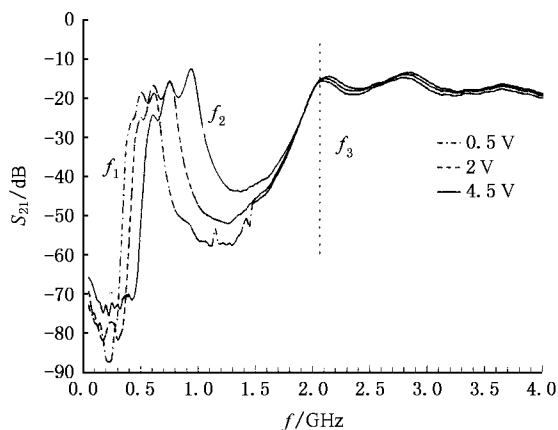


图 2 散射参数  $S_{21}$  的测量结果

不变(图 2 中的直线).结果,禁带越来越窄.上述实验事实说明,说明贴片电感的大小以及电容和电感所在的微带系统的性质决定了  $f_3$  的大小,电容的大小对  $f_3$  影响甚微.

2) 随着变容二极管的反向偏置电压的升高,禁带的底部逐渐抬高,即二极管的电容越小,微波的透射率越大,反射波越弱.

### 3.2. 传输参数的位相

在测量  $S_{21}$  的大小的同时,我们对传输参数的位相进行了测量.矢量分析仪测量的位相的数据范围在  $-180^\circ$  到  $+180^\circ$  之间.由于图 1 所示的微波网络的相位变化随着频率的增加而增加,按照上述原则,我们对测量结果进行了数据处理,图 3(a)、(b)和(c)中的三条曲线表示电压在 0.5 V、2 V 和 4.5 V 时一个单元的位相变化.对比图 2、图 3 可知:1) 相位滞后为  $-\pi$  的点对应于左手通带的起始频率  $f_1$ ,位相曲线上存在两个明显的转折点,分别对应于图 2 中的禁带频率  $f_2$  和  $f_3$ ; 2) 禁带区单元电路位相滞后接近于零.

## 4. 实验结果的理论分析

### 4.1. 色散方程

图 4 为一维可调谐左右手组合材料微波通路的单元电路原理图.每个单元由两个变容二极管和一个贴片电感组成.二极管的电容用  $C$  表示,贴片电感用  $L$  表示,连接它们的微带线的长度均为  $d$ ,一维左右手材料的一个单元的长度用  $d_0$  表示.用  $\beta$  表示

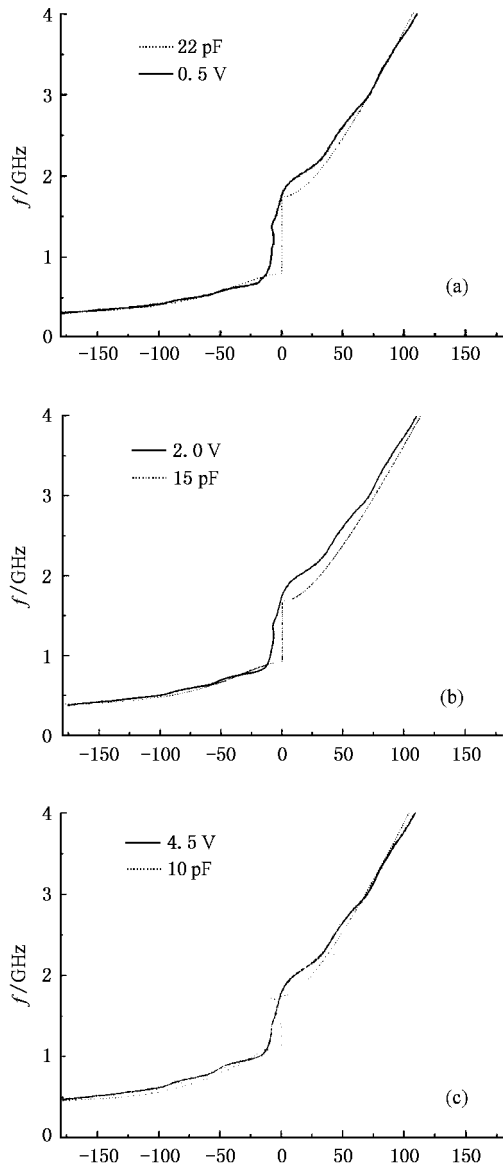


图 3 (a)位相变化, 偏压  $U = 0.5 \text{ V}$ ; (b)位相变化, 偏压  $U = 2 \text{ V}$ ; (c)位相变化, 偏压  $U = 4.5 \text{ V}$

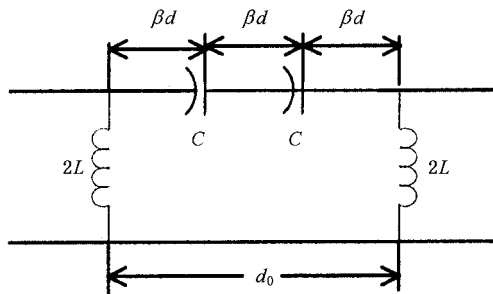


图 4 一维可调谐组合材料质的单元电路

微带线中微波的相移因子, 用  $\theta = \beta d$  表示长度为  $d$  的微带线中微波的位相延迟,  $\beta_{\text{Bloch}}$  表示微波通过整

个微波网络的相移因子,  $Z_0$  表示微带线的特征阻抗. 根据微波网络理论, 可以得到图 2 所示的可调谐一维左右手组合介质的色散方程如下:

$$\begin{aligned} \cos \beta_{\text{Bloch}} d_0 = & \cos 3\theta + \left( \frac{1}{Z_0 \omega C} + \frac{Z_0}{2\omega L} \right) \sin 3\theta \\ & + \frac{1}{2Z_0^2 \omega^2 C^2} \sin 2\theta \sin \theta - \frac{1}{\omega^2 LC} \cos 2\theta \cos \theta \\ & - \frac{\sin 2\theta \cos \theta}{4\omega^3 LC^2 Z_0}. \end{aligned} \quad (1)$$

#### 4.2. 对实验结果的理论计算与分析

二极管在 BB135 的电容与电压的函数关系如图 5 所示. 测试在 Agilent 公司的介电谱仪上进行, 测量频率为 0.8 GHz. 把贴片电感  $L = 4.7 \text{ nH}$ , 微带线的特征阻抗  $R = 50 \Omega$ , 相速度  $V_{\text{TL}} = 1.54 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 二极管的电容 5 pF, 8 pF, 10 pF, 15 pF 和 20 pF 分别带入色散方程 (1) 可得到一组色散关系如图 6 所示. 很明显, 图 6 中的色散曲线可以分为三个区域: 下部为左手通带区, 上部右手通带区, 左右手通带区之间为禁带区 (bandgap). 从图 6 可以知道: 随着电容的增大, 色散曲线的上半部分保持不变 (对应于图 2 的  $f_3$ ), 下半部分的顶点逐步下降, 禁带越来越宽. 二极管的反向电容随反向偏置电压的增大而减小, 也就是说, 当电压升高时禁带应该越来越窄, 比较实验部分 (图 2 所示) 与理论图 6 可知, 从禁带的变化趋势上看理论结果与实验结果是一致的.

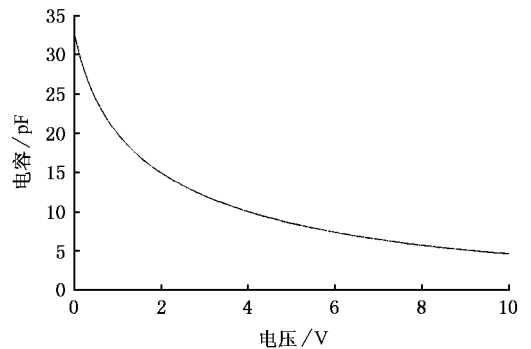


图 5 电容与电压的函数关系曲线

按照二极管电容与电压的函数关系图 5, 二极管的在电压为 0.5 V 时, 电容  $C = 22 \text{ pF}$ ; 电压为 2 V 时, 电容  $C = 15 \text{ pF}$ ; 电压为 4.5 V 时, 电容为 10 pF. 把  $d = 1.8 \text{ mm}$ ,  $R = 50 \Omega$ ,  $L = 4.7 \text{ nH}$  分别代入色散方程 (3), 做出理论上的单元相移曲线如图 3 (a), (b) 和 (c) 中的虚线所示. 图 3 中的虚线与实线 (实验

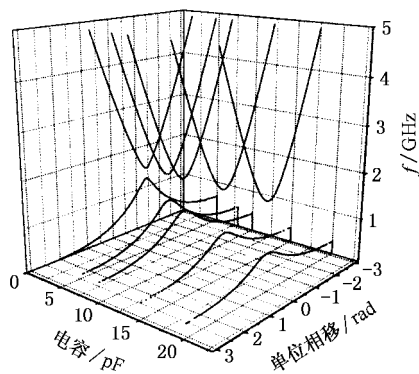


图6 在不同电容值下的色散关系曲线

曲线)能够非常好地符合。

## 5. 结 论

本文介绍了可调谐一维左右手组合材料的制作方法.用矢量网络分析仪对可调谐左右手人工组合介电材料的传输参数的幅值和位相进行了测量.当电压由低到高时,二极管的电容越来越小,左手通带将向高频方向移动,禁带越来越窄,同时禁带越变越浅.基于微波网络理论,对可调谐左右手组合材料的电磁性质进行了分析,推出了色散方程.从色散曲线可以看到,可调谐左右手组合材料有明显的禁带存在.从微波理论出发得到的色散方程曲线与实验曲线能够很好地符合。

- [ 1 ] Veselago V G , Jan. -Feb 1968 *Sov. J. Phys.* **10** 509
- [ 2 ] Pendry October J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [ 3 ] Pendry J B , Holden A J , Stewart W J 1999 *IEEE Trans. On Microw. Theo. Tech.* **47** 2075
- [ 4 ] Smith D R , Padilla W J , Vier D C *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [ 5 ] Shelby R A , Smith D R , Schultz S 2001 *Science* . **292** 77

- [ 6 ] Grbic A , Eleftheriades G V 2002 *Appl. Phys.* **92** 5930
- [ 7 ] de Lustrac A , Gadot F , Akmansoy E 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 4196
- [ 8 ] Sievenpiper D 2003 *IEEE Tran. on Antennas and Propagation* . **51** 2713
- [ 9 ] Liang G Q , Han P , Wang H Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2197 ( in Chinese ) [ 梁冠全、韩 鹏、汪河洲 2004 物理学报 **53** 2197 ]

# Microwave transmission properties of tunable one-dimensional metamaterials<sup>\*</sup>

Wang Su-Ling Zhang Ye-Wen He Li Li Hong-Qiang Chen Hong

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

( Received 29 March 2005 ; revised manuscript received 24 May 2005 )

## Abstract

A new design of metamaterials of one dimensional periodic structure is presented in this paper and the transmission parameters are measured. The experiment results indicate that when the bias voltage rises the left-hand passband will move toward higher frequencies. Based on transmission line theory , the dispersive equation of the tunable metamaterials is given. The results of the theory agree very well with those of the experiments.

**Keywords :** tunable , metamaterials , transmission parameters , varactor diode

**PACC :** 4270Q , 4110H , 7870G

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2001CB610406 ) , the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 50477048 , 10474072 ) , and the Shanghai Science and Technology Committee.