

TE₁₀ 矩形波导中填充金属线阵和铁氧体合成的新型左手媒质*

褚庆昕^{1)†} 龚建强²⁾

1) 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

2) 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071)

(2007 年 6 月 6 日收到, 2007 年 9 月 18 日收到修改稿)

在 TE₁₀ 矩形波导中填充金属线阵和铁氧体合成了一种新型的左手媒质结构. 分别使用了转移函数矩阵方法以及全波仿真工具 Ansoft HFSS 对所提出的结构进行了分析. 结果表明, 在横向磁化铁氧体等效磁导率实部为负的频段范围内, 该合成结构呈现左手通带特性并伴随着后向波的传播现象. 由于横向磁化铁氧体的等效磁导率为负的频段范围可调, 故所提出的结构具有左手通带范围可调的特性.

关键词: 左手媒质, TE₁₀ 矩形波导, 金属线阵, 铁氧体

PACC: 4100H

1. 引言

1968 年, Veselago 设想了同时具有负介电常数和负磁导率的左手媒质 (left-handed material, LHM) 即波矢 k 与电场强度 E 、磁场强度 H 满足左手法则, 并具有负的折射率. 当电磁波在这种媒质中传播时, Maxwell 方程仍然成立, 但波的传播方向和能量的传播方向相反, 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、逆斯涅尔折射效应及逆 Cerenkov 辐射效应等^[1]. 2000 年, Smith 等人根据 Pendry 的研究成果^[2-4] 利用金属线阵和裂缝谐振环 (SRR) 的周期性排布首次合成了左手媒质^[5]. 随后于 2001 年通过实验成功的观测到了负折射现象^[6]. 从此人们开始探索应用不同结构来实现左手媒质. 由于目前尚未在自然界中发现纯天然的左手媒质, 因此研究者们普遍沿用 Smith 等人的思想即分别实现一定频段内产生负有效介电常数的结构和负有效磁导率的结构, 再通过两种结构按一定的规律排布, 来合成左手媒质. 比如利用集中 LC 元件的二重周期性结构来实现左手媒质^[7], 利用工作于截止频率之下的空金属波导来

逼近一维等离子体的特性以此来实现负有效介电常数, 再在此波导中加入 SRR 结构实现负有效磁导率来合成左手媒质^[8]; 由于横向磁化的铁氧体在一定频段内可以实现负等效磁导率, 且通过改变铁氧体的外加磁偏置以及磁化饱和强度的大小能调整负等效磁导率频段范围, 于是作为对 SRR 结构的替换, 在工作于截止频率之下的空金属波导中填充铁氧体能够实现左手通带范围可调的左手媒质^[9].

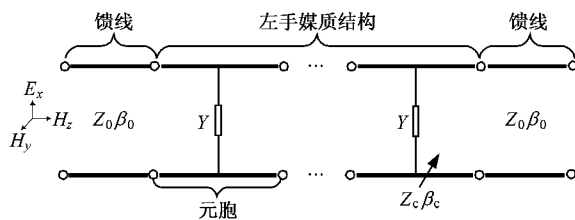


图 1 左手媒质结构等效理论模型及入射波极化方向

2006 年, He 等人从理论上提出并分析了在填充横向磁化铁氧体的 TEM 模传输线中周期性的排布金属线阵形成的左手媒质结构^[10], 然而他们并未通过实验或全波数值方法来验证这种理论结构的正确性. 有鉴于此, 本文提出了在工作于 TE₁₀ 主模式的矩形波导中周期性的填充金属线阵和铁氧体实现的左

* 国家自然科学基金 (批准号: 60571056) 资助的课题.

† E-mail: qxchu@scut.edu.cn

手媒质结构,其中 TE_{10} 矩形波导作为周期性结构的载体以及激励源馈线,通过控制入射波的频段,使左手媒质结构仅由 TE_{10} 模激励,这样的激励方式使得入射波的电场方向与金属线轴方向一致,使金属线阵具有类等离子体的特性,当入射波频率低于等离子体频率时金属线阵将产生负的有效介电常数;而施加于铁氧体上的直流磁偏置方向也与金属线轴方向平行,使横向磁化的铁氧体产生负等效磁导率,最终通过金属线阵和铁氧体的周期性组合来形成左手媒质.

为验证这种结构的正确性,本文首先给出了该结构的理论模型,并采用传输函数矩阵方法对该模型进行了初步的分析,分析结果表明当波导中只排布金属线阵时,可在所研究的频段内有效的实现等离子体的特性也即实现负的有效介电常数,而当在波导中同时排布金属线阵和铁氧体时,将会在铁氧体有效磁导率实部为负的频段内实现通带特性.以该结构的理论分析为基础,作者采用与理论分析中相同的物理参数在 Ansoft HFSS 建模并仿真,仿真结果进一步证明了理论分析的正确性,并且通过 HFSS 的 Animation 功能,我们可以清楚的观察到左手媒质特有的后向波传播现象.

2. 左手媒质理论模型

左手媒质结构等效的理论模型以及入射波的极化方式如图 1 所示,左手媒质结构通过元胞的周期性排列构成,每个元胞包含一根金属线和一段铁氧体填充的金属波导,金属线以集总元件 Y 来等效,而铁氧体填充的金属波导则等效为特性阻抗和传播常数分别为 Z_e 和 β_e 的传输线,馈线为空气填充的矩形波导,以特性阻抗及传播常数分别为 Z_0 和 β_0 的传输线等效.为简化理论模型的分析,假定左手媒质仅由 TE_{10} 主模式激励,激励信号由馈线输入,为此要求入射波的频率 f 满足

$$f_{cTE_{10}} < f < f_{cTE_{20}}, \quad (1)$$

其中 $f_{cTE_{10}}$ 、 $f_{cTE_{20}}$ 分别为 TE_{10} 模和 TE_{20} 模的截至频率.金属线轴与入射波电场 E_x 方向平行;金属线的转移函数矩阵为

$$A_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中

$$Y = \left(\frac{b}{2\pi r} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} (1+j) + j\omega\mu_0 b \frac{\ln(d/r)}{2\pi} \right)^{-1}, \quad (3)$$

式中 μ_0 为真空磁导率, ω 为入射波角频率, r 为金属线半径, b 为金属线长度且与波导高度相等, d 为相邻金属线之间的间距即元胞的长度.(3) 式中等号右边第一项表示金属线的表面阻抗,其值等于长为 b 宽为 $2\pi r$ 而厚度为趋肤深度的金属块的总表面阻抗,而第二项是相邻金属线之间的自感.铁氧体填充的波导段的传输函数矩阵为

$$A_f = \begin{bmatrix} \cos(\beta_e d/2) & jZ_e \sin(\beta_e d/2) \\ j\sin(\beta_e d/2) Y_e & \cos(\beta_e d/2) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

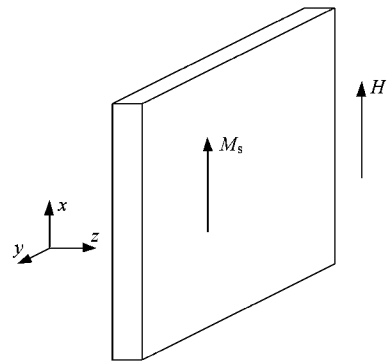


图 2 横向磁化的铁氧体模型

忽略高次模的影响, Z_e 和 β_e 定义如下:

$$\beta_e = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}, \quad (5)$$

$$Z_e = \frac{b}{a} \frac{\eta}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}},$$

其中 a 为波导宽度, λ 和 η 分别为铁氧体填充波导的工作波长和波阻抗

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega \sqrt{\mu_{rf} \epsilon_{rf}}}, \quad (6)$$

$$\eta = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_{rf}}{\epsilon_{rf}}},$$

(6) 式中 ϵ_{rf} 为铁氧体的相对介电常数, μ_{rf} 为如图 2 所示的横向磁化铁氧体等效的相对磁导率^[11]

$$\mu_{rf} = \frac{(\tilde{H} + M_s)^2 - (\omega/\gamma)^2}{\tilde{H}(\tilde{H} + M_s) - (\omega/\gamma)^2}, \quad (7)$$

其中 $\tilde{H} = H + j\Delta H/2$, H 为外加的直流磁偏置, ΔH 为磁损耗线宽, M_s 为铁氧体的磁化饱和强度, γ 为旋磁比.

若左手媒质在波传播方向上有 N 个单位元胞, 则总传输函数矩阵为

$$[A] = \{ [A_f] [A_w] [A_f] \}^N = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

于是可得散射参数为

$$S_{21} = \frac{2Z_0}{a_{12} + (a_{11} + a_{22})Z_0 + a_{21}Z_0^2}, \quad (9)$$

$$S_{11} = \frac{a_{12} + (a_{11} - a_{22})Z_0 - a_{21}Z_0^2}{a_{12} + (a_{11} + a_{22})Z_0 + a_{21}Z_0^2}. \quad (10)$$

为验证该理论模型的正确性,选定如下参数:波导横向尺寸 $a \times b = 15 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$, TE₁₀ 单模工作的频段范围为 10 GHz—20 GHz;金属线采用铜制材料 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ mhos/m}$, 半径 $r = 0.15 \text{ mm}$, 元胞长度 $d = 2 \text{ mm}$, 铁氧体参数为 $\epsilon_{rf} = 1$, $M_s = 0.19 \text{ T}$, $\Delta H = 10 \times 80 \text{ A/m}$, $H = 3087 \times 80 \text{ A/m}$. 由(7)式可推得横向磁化铁氧体的等效磁导率实部在铁磁谐振频率(FMRF)和铁磁反谐振频率(FMARF)之间的频段为负值:

$$\text{FMRF} = (\gamma/2\pi) \sqrt{H(\tilde{H} + M_s)}, \quad (11)$$

$$\text{FMARF} = (\gamma/2\pi) (\tilde{H} + M_s). \quad (12)$$

于是将给定的铁氧体参数代入(11)和(12)式中可知 μ'_{rf} 在 11 GHz—14 GHz 范围内为负值(\cdot)表示取实部算子. 左手媒质由 10 个元胞构成, 转移函数矩阵法计算结果示于图 3, 其中虚线表示波导中只填充金属线阵时的传输参数, 从该曲线可以看出金属线阵显示了类似于等离子体的特性, 在 18.3 GHz 时有最大传输, 此即所谓的等离子体频率, 当入射波频率低于该频率时, 金属线阵将产生负的有效介电常数, 实线显示的是本文提出的左手媒质的传输参数, 与只填充金属线阵时的传输参数相比较, 在 11.15 GHz—12.99 GHz 频段内产生了一个通带, 在此通带内 S_{21} 大于 -30 dB, 同时该通带也包含在 μ'_{rf} 为负值的频段范围内, 所以此频段即为左手特性通带, 且在此通带内, 金属线阵产生负的有效介电常数而横向磁化铁氧体产生负等效磁导率. 然而在 10.83 GHz—10.93 GHz 产生了另一个奇异通带, 我们将结合仿真结果对上述通带进行进一步验证.

3. 全波仿真及结果

仅基于对理论模型的分析尚不能对通带内电磁波的传播特性进行直观验证, 为进一步证明理论模型传输函数矩阵分析结果的正确性以及该新结构能有效地实现左手通带特性, 我们在 Ansoft HFSS 中采

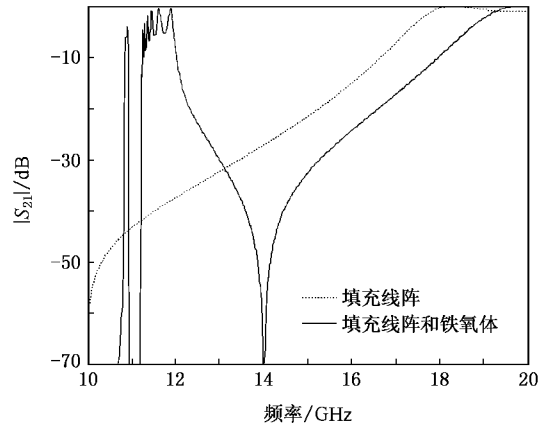


图 3 理论模型计算结果

用与理论模型分析中相同的参数建模并仿真. 此外, 为了优化传输特性, 在每根金属线周围我们引入了一个半径为 0.75 mm 的空气介质层, 建立的模型和仿真结果分别如图 4 和图 5 所示. 图 5 中虚线表示的是波导内只填充金属线阵时的传输参数, 与图 3 中虚线所示的结果相比较, 两者皆准确地预测出金属线阵的类等离子体特性; 实线表示的是所提出的左手媒质的传输参数, 同图 3 中实线显示的结果比较同样存在两个通带, 其中左手通带为 11.25 GHz—13.95 GHz, 奇异通带为 10.0 GHz—10.9 GHz, 与图 3 中实线显示的通带相比较, 由仿真所得到的两个通带带宽较宽, 这主要是因为图 1 所示的左手媒质理论模型中我们将单根金属线等效为集中元件模

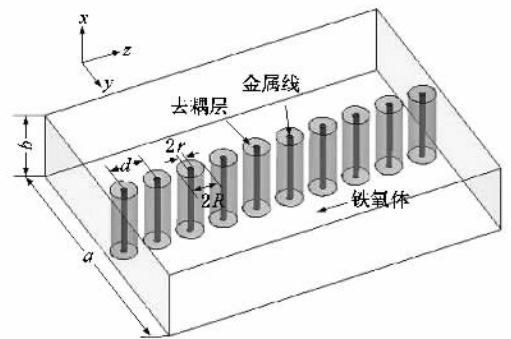


图 4 左手媒质三维结构图

型, 但这种模型在频率较高时具有一定的误差. 为了研究奇异通带形成的机理, 我们利用 HFSS 软件显示了 $f = 10.55 \text{ GHz}$ 时瞬态电场幅度分布情况, 如图 6 所示. 其中 k 为波矢, 电磁场传播方向由输入端口指向输出端口, 通过观察电场分布可知, 此时金属线阵可以等效为电壁, 另外在奇异通带范围内铁氧体

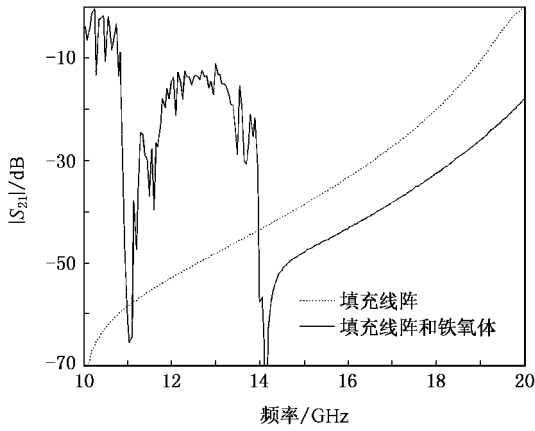


图5 Ansoft HFSS 仿真计算结果

磁导率的实部为正值,因此原填充金属线阵和铁氧体的 TE_{10} 波导可以等效为两个均匀填充铁氧体材料的小波导,能量通过小波导传播,类似于一个波导功分器.这是奇异通带产生的根本原因.为研究左手通带内的电磁场传播特性,我们利用 HFSS 软件中的 Animation 功能显示了 $f = 13$ GHz 时瞬态电场的分布情况.输入端口处 TE_{10} 模激励相位分别为 $30^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 和 120° ,场分布如图 7(a)(b)(c)和(d)所示,可见波矢 k 的方向与电磁能流 S 的传播方向相反,这是左手媒质所特有的后向波传播现象,该现象也进一步证明了本文中所提出的左手媒质结构的正确性.

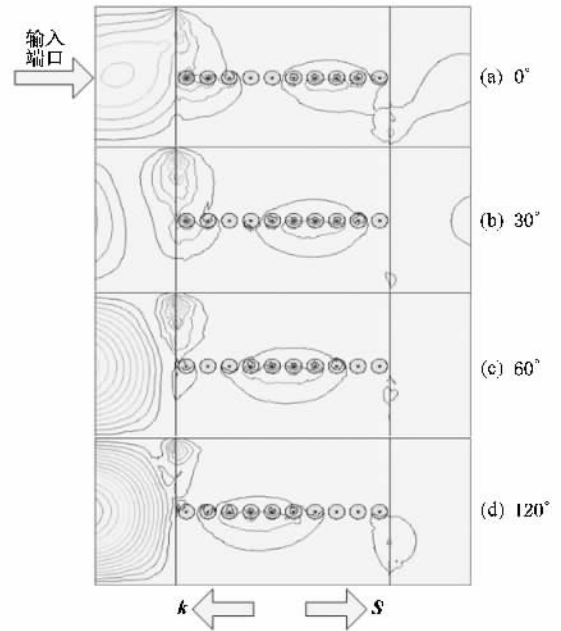


图7 $f = 13$ GHz 时瞬态电场幅度分布图.在输入端口施加 TE_{10} 模激励 (a)(b)(c)和(d)中输入端口处激励相位分别为 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 和 120°

电场幅度的分布图,可知此时金属线阵可等效为一电壁,将原填充金属线阵和铁氧体的 TE_{10} 波导隔开成两个均匀填充铁氧体材料的小波导,电磁能量通过小波导传播,类似于一个波导功分器.我们也利用了 HFSS 仿真分析了左手通带内单频点处的电磁分布特性,通过改变模型输入端口处 TE_{10} 模激励的相位,我们能清楚地观察到左手媒质结构所特有的后向波传播现象,从而进一步证明了该左手媒质结构的正确性.

附录 (7) 式的推导

如图 2 所示的具有 \hat{x} 方向磁偏置的铁氧体磁导率张量为

$$[\mu] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & jk \\ 0 & -jk & \mu \end{bmatrix}. \quad (A1)$$

磁导率张量元定义如下:

$$\mu = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (A2)$$

$$k = \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

其中

$$\omega_0 = \gamma H, \quad (A3)$$

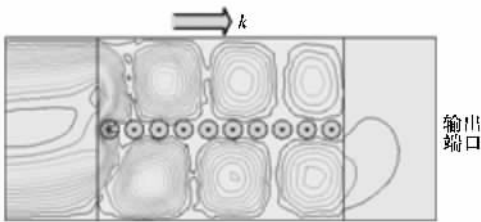


图6 $f = 10.55$ GHz 时的电场幅度分布图

4. 结 论

本文提出了一种新型的左手媒质结构及其等效电路模型,并分别采用了转移函数矩阵方法和 Ansoft HFSS 仿真方法分析了该结构的传输特性,分析结果表明在横向磁化铁氧体等效磁导率实部为负值的频段内可有效的实现左手通带特性.但是当入射波频率低于金属线阵等离子体频率和铁氧体铁磁谐振频率时,产生了一个附加的奇异通带.利用 Ansoft HFSS 工具观察该奇异通带内某频点处瞬态

为铁氧体的进动谐振角频率

$$\omega_m = \gamma M_s, \quad (A4)$$

而 $\gamma = 2\pi \times 2.8 \times 10^{10}$ rad/T.

参考图 2, 当电磁波沿 z 向传播时, 横向磁化的有效磁导率为

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu^2 - k^2}{\mu}. \quad (A5)$$

将 (A1) (A2) 和 (A3) 代入 (A5) 中可得

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{(H + M_s)^2 - (\omega/\gamma)^2}{H(H + M_s) - (\omega/\gamma)^2}. \quad (A6)$$

计及铁氧体的损耗

$$\tilde{H} = H + j\Delta H/2. \quad (A7)$$

将 (A7) 式代入 (A6) 式中即推得 (7) 式.

- [1] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1998 *J. Phys. Condens. Matter* **10** 4785
- [4] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2705
- [5] Smith D R, Padilla W J, Vier D C et al 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [7] Eleftheriades G V, Iyer A K, Krener P C 2002 *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.* **50** 2702
- [8] Marques R, Maral J, Mesa F, Medina F 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 183901
- [9] Dechant A, Okoniewski M 2006 *Electronics Letters* **42** 4
- [10] He Y X, He P, Harris V G, Vittoria C 2006 *IEEE Trans. on Magn.* **42** 2852
- [11] Pozar D M 1998 *Microwave Engineering* (Addison-Wesley, Reading, 1998)

A novel left-handed material with wire array in a ferrite-filled TE₁₀ rectangular waveguide^{*}

Chu Qing-Xin^{1)†} Gong Jian-Qiang²⁾

1) *College of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*

2) *School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*

(Received 6 June 2007 ; revised manuscript received 18 September 2007)

Abstract

A novel left-handed material is proposed, which is composed of a metallic wire array in an X-band TE₁₀ rectangular waveguide filled with ferrite. The proposed structure is analyzed by using the transfer function matrix technique and with the full wave simulation tool Ansoft HFSS. The results show that there exist left-handed passband and backward wave propagation phenomenon for the proposed structure in the frequency band in which the effective permeability for the ferrite transversely magnetized is smaller than zero, and the frequency band can be tuned by adjusting the externally imposed magnetic field and the ferrimagnet's magnetization, so we believe such a structure should provide medium-loss and tunable left-handed passband.

Keywords : left-handed material, TE₁₀ rectangular waveguide, metallic wire array, ferrite

PACC : 4100H

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60571056).

† E-mail : qxchu@scut.edu.cn