

人工合成负折射率微波媒质的一种新方法

曹云建, 文光俊, 吴凯敏, 徐新河

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

【摘要】提出了以外加磁场作用时磁导率为负的亚铁磁材料-YIG为基体, 在其中嵌入等效介电常数为负的金属导体线阵列宏结构, 人工合成出负折射率微波媒质的新方法。利用有效媒质理论数值计算了复合媒质的等效介电常数与等效磁导率的频率响应特性。计算结果表明存在C波段电磁波频率的重叠区域, 使复合媒质的等效介电常数与等效磁导率同时为负; 验证了新型负折射率微波媒质合成方法的可行性。

关键词 有效媒质理论; 等效磁导率; 等效介电常数; 亚铁磁材料-YIG; 负折射率媒质

中图分类号 TN61

文献标识码 A

A New Method to Synthesize Microwave Substance of Negative Refractive Index

CAO Yun-jian, WEN Guang-jun, WU Kai-min, XU Xin-he

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A novel method is presented to synthesize Negative Refractive Index Material (NRIM) by incorporating array of metallic wires into the host media such as ferrimagnet-YIG under an external magnetic bias field. The effective electromagnetic properties of the composite medium are calculated analytically based on the effective medium theory. The results show that the effective permittivity and effective permeability of the composite medium are negative simultaneously in C-band frequency region, and therefore indicate the proposed method to synthesize NRIM is feasible.

Key words effective medium theory; effective permeability; effective permittivity; ferrimagnet-YIG; negative refractive index material

文献[1]分析了电磁波在假想的介电常数与磁导率同时为负值的、各向同性均匀媒质中的电动力学行为, 表现出非常特殊的电磁特性。这种假想媒质称为左手媒质(Left-Handed Material), 现在学术界亦称其为负折射率媒质(Negative Refractive Index Material, NRIM)、异向媒质(Metamaterial)等, 本文采用NRIM的定义, 以强调媒质的负折射率特性。

文献[2]基于文献[3-4]提出的构造单负介电常数媒质、单负磁导率媒质的思想, 人工合成出在X波段等效介电常数和等效磁导率同时为负的负折射率微波媒质, 并在实验中观察到X波段的电磁波, 通过人工合成媒质与空气的界面时发生了负折射现象^[5]。加拿大多伦多大学和美国西雅图的两组研究人员在实验中直接观测到了负折射率媒质的逆切伦柯夫辐射^[6]和负折射^[7]现象, 进一步证实了负折射率媒质的存在, 亦表明人工能够合成出负折射率微波

媒质。

NRIM的研究成为国际物理学和电磁学界一个十分引人注目的前沿领域, 人工合成NRIM的方法有: (1) 由金属导体线和开口谐振环相重叠的阵列结构实现^[4-5, 7]; (2) 由串联电容和并联电感的周期结构实现^[6]; (3) 由一定条件下的光子晶体实现^[8]。方法(1)存在结构复杂、难于加工、工作频带较窄等缺点; 方法(2)需要加载集总元件, 不适合毫米波、红外波段等高频应用; 方法(3)中各向异性、模式耦合失配及高阶衍射都是较难解决的问题, 且不适合器件的小型化应用。因此, 探索和发展人工合成NRIM的新方法具有重要的实用价值。

自然界中一些天然物质, 如铁磁材料(ferromagnet)和亚铁磁材料(ferrimagnet), 在外静电磁场作用下, 对于频率在铁磁谐振频率至抗铁磁谐振频率之间的电磁波而言, 其磁导率为负值。本文

据此提出了在宽频带单负磁导率的绝缘型(亚)铁磁材料中, 嵌入等效介电常数为负的金属导体线阵列宏结构, 人工合成宽带NRIM的方法。

1 绝缘型亚铁磁材料-YIG磁导率的频率响应特性分析

YIG对入射电磁波表现出各向异性, 在Z方向外加恒定磁场 H_0 时, 其磁导率张量为:

$$\boldsymbol{\mu}_{\text{tensor}} = \begin{bmatrix} \mu_1 & j\mu_2 & 0 \\ -j\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\mu_1 = \mu_0[1 + \omega_0\omega_M / (\omega_0^2 - \omega^2)]$; $\mu_2 = \mu_0[\omega\omega_M / (\omega_0^2 - \omega^2)]$; $\mu_3 = \mu_0$; $\omega_0 = \gamma\mu_0 H_0 + j\omega\alpha$ 为有损耗情况下的进动角频率; γ 为旋磁比常数; μ_0 为真空磁导率; $\alpha = \gamma\mu_0\Delta H / 2\omega$ 为阻尼系数; ΔH 为铁磁谐振线宽; $\omega_M = \gamma\mu_0 M_0$ 为特征角频率; M_0 为YIG的饱和磁化强度。基于YIG的实际物理参数, 本文设置YIG在外加磁场 $H_0 = 1200$ Oe作用下, 其饱和磁化强度 $M_0 = 1750$ Gs, 相对介电常数 $\epsilon_r = 12.7$, 铁磁谐振线宽 ΔH 为40 Oe。

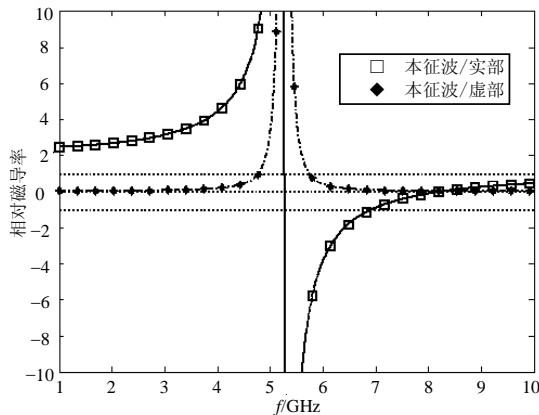


图1 电磁波沿垂直于磁化方向传播时, 本征波I的相对磁导率频率响应特性

线极化平面波沿垂直于磁化方向入射到YIG时, 分解为两组本征波, 分别是磁感应强度沿 H_0 方向极化的非寻常波TE波和垂直于 H_0 方向极化的寻常波TEM波, 对应的相对磁导率 $\mu_{\perp,\perp}$ 和 $\mu_{\parallel,\perp}$ 为:

$$\mu_{\perp,\perp} = \frac{\mu_1^2 - \mu_2^2}{\mu_0\mu_1} = \mu_{\perp,\perp}^R - j\mu_{\perp,\perp}^I \quad (2)$$

$$\mu_{\parallel,\perp} = 1 \quad (3)$$

根据设置的YIG物理参数, 由式(2)计算得到 $\mu_{\perp,\perp}$ 的频率响应特性如图1所示, 可得到该本征波相对磁导率实部在频率5.22~8.33 GHz范围内为负值。

2 金属导体线阵列宏结构等效介电常数的频率响应特性分析

一维金属导体线阵列结构如图2a所示。文献[3]分析了该结构的电磁特性, 并推导出其等效介电常数为:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\Gamma\omega} \right) \quad (4)$$

式中 ω_p 为金属导体线阵列的等效等离子体频率; Γ 为自由电子间的碰撞引起的阻尼常数。

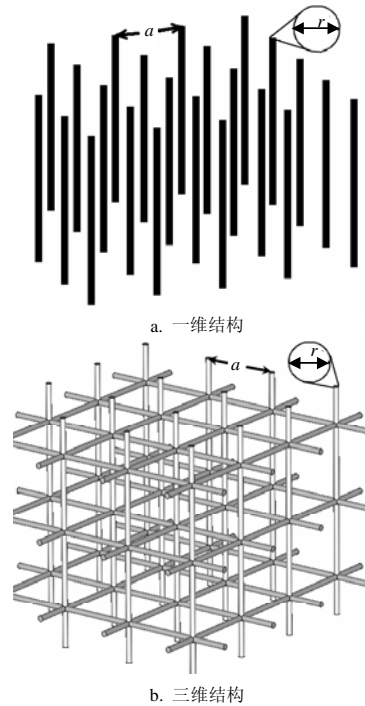


图2 金属导体线周期阵列结构

对于一维金属导体线阵列结构, 只有波矢量垂直于金属导体线方向, 电场方向平行于金属导体线方向, 且电磁波波长远大于阵列周期时, 式(4)代表的等离子体分析模型才会成立。文献[9]提出了如图2b所示的三维金属导体线阵列结构, 支持两个TEM简并模和一个纵向模的传播。当纵向模式不被显著激励时, 电磁波在其中的传播特性与在理想等离子体中的传播特性相同。理想等离子体的等效介电常数为:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad (5)$$

三维金属导体线阵列宏结构的等效等离子体频率为:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c^2 / a^2}{\ln\left(\frac{a}{2\pi r}\right) + 0.5275} \quad (6)$$

式中 a 为导体线阵列周期; r 为导体线半径; c 为真空中光速。由式(5)所示的三维金属导体线阵列宏结构等效介电常数的频率响应特性可知, 当电磁波频率小于等效等离子体频率 ω_p 时, 三维金属导体线阵列宏结构的等效介电常数为负, 因此该结构可以作为构造单负介电常数媒质的一种基本结构。

3 复合媒质等效介电常数和等效磁导率的频率响应特性分析

本文将如图2b所示的三维金属导体线阵列宏结构嵌入到基体YIG中, 在外加恒定磁场的情况下, 可构造出微波频段的NRIM。为了验证基于亚铁磁材料的负折射率微波媒质合成方法的可行性, 本文依据YIG在微观上实现负值磁导率, 三维金属导体线阵列结构在宏观上实现负值介电常数的原理, 利用有效媒质理论数值计算了复合媒质的等效介电常数与等效磁导率的频率响应特性。

鉴于导体线阵列宏结构的体积远小于YIG的体积, 采用Maxwell-Garnett有效媒质理论模型^[10]为:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{\varepsilon + 2\varepsilon_b} = f_a \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_b}{\varepsilon_a + 2\varepsilon_b} \quad (7)$$

$$\frac{\mu - \mu_b}{\mu + 2\mu_b} = f_a \frac{\mu_a - \mu_b}{\mu_a + 2\mu_b} \quad (8)$$

式中 f_a 、 ε_a 、 μ_a 分别为媒质A的体积分数、介电常数和磁导率, $f_a \ll 1$; ε_b 、 μ_b 分别为媒质B的介电常数和磁导率; ε 、 μ 分别为复合媒质的等效介电常数和等效磁导率。

设定媒质A为三维金属导体线阵列宏结构, 物理参数为 $a = 3.5 \text{ mm}$ 、 $r = 0.25 \text{ mm}$ 。媒质B为YIG, 物理参数如前所述, 可得:

$$\varepsilon_a = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (9)$$

$$\mu_a = 1 \quad (10)$$

$$f_a \approx \frac{3\pi r^2 a - 2\pi r^3}{a^3} \quad (11)$$

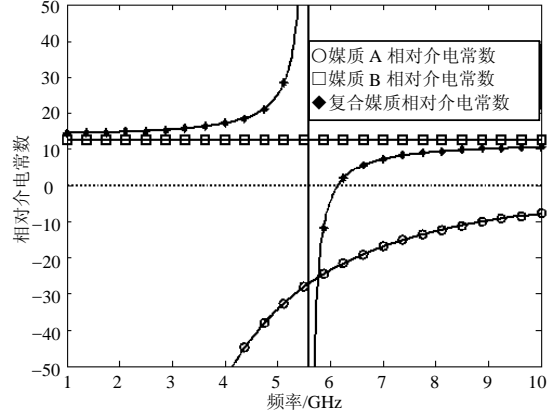
$$\varepsilon_b = \varepsilon_r = 12.7 \quad (12)$$

电磁波沿垂直于磁化方向传播时, 由式(2)得到YIG中本征波I对应的等效磁导率为:

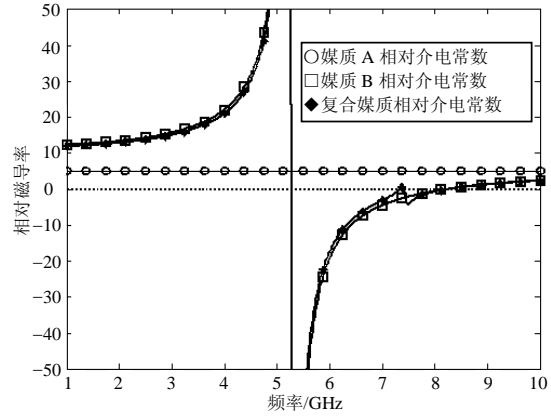
$$\mu_b = \mu_1^2 - \mu_2^2 / \mu_0 \mu_1 \quad (13)$$

根据前述参数设置, 将式(9)~(13)代入式(7)~(8), 数值计算结果如图3所示, 相对磁导率均只取实

部。对照图3a与图3b可知存在C波段电磁波频率的重叠区域, 使复合媒质的等效磁导率与等效介电常数同时为负。理论分析可知复合媒质的等效折射率应该为负值, 说明本文提出的负折射率微波媒质合成方法是可行的。



a. 等效介电常数频率响应特性



b. 等效磁导率频率响应特性

图3 电磁波沿垂直于磁化方向传播时, 复合媒质的等效电磁特性

4 结束语

本文提出了一种基于绝缘型(亚)铁磁材料人工合成负折射率媒质的方法, 利用有效媒质理论数值计算了在YIG中内嵌三维金属导体线阵列宏结构的、复合媒质的等效介电常数与等效磁导率的频率响应特性。计算结果表明只要参数选择适当, 该NRIM合成方法在理论上是正确可行的。复合媒质真实的电磁特性还需要通过实验来验证。

参考文献

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite

- medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Low frequency plasmons in thin-wire structures[J]. *J. Phys: Condens Matter*, 1998, 10: 4785-4809.
- [4] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Trans-MTT*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [5] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [6] ELEFThERIADES G V, IYER A K, KREMER P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines[J]. *IEEE Trans-MTT*, 2002, 50(12): 2702-2712.
- [7] PARAZZOLI C G, GREGOR R B, LI K, et al. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using snell's law[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(10): 107401.
- [8] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Phys Rev B*, 2000, 62(16): 10696-10705.
- [9] SILVEIRINHA M G, FERNANDES C A. Homogenization of 3-D-connected and nonconnected wire metamaterials[J]. *IEEE Trans-MTT*, 2005, 53(4): 1418-1430.
- [10] BREGAR V B, PAVLIN M. Effective-susceptibility tensor for a composite with ferromagnetic inclusions: Enhancement of effective-media theory and alternative ferromagnetic approach[J]. *J. App Phys*, 2004, 95(11): 6289-6293.

编辑 黄 莘

(上接第715页)

4 结 论

采用一种特殊导热材料作MMICs功率单片的热载体,借助有限元软件ANSYS构建了Ka频段6 W功率合成放大器的热模型,模拟了其在空气自然对流下的温度分布和散热分布状况,表明了热载体材料的选取与设计是MMICs芯片散热的关键。实测结果与模拟值基本吻合,验证了热模型模拟结果的有效性。研究结果对Ka频段中高功率放大器的热设计提供了重要的理论依据。

参 考 文 献

- [1] JIANG X, SEAN C O, AMIR M. A Ka-band power amplifier based on the traveling-wave power-dividing/combining slotted-waveguide circuit[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2004, 52(2): 633-639.
- [2] JEONG J, KWON Y, LEE S, et al. 1.6- and 3.3-W power amplifier modules at 24 GHz using waveguide-based power-combining structures[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech.*, 2000, 48(12): 2700-2708.
- [3] PENG C J, LEE Y C, ANGELOS A, et al. Multioctave spatial power combining in oversized coaxial waveguide[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 2002, 50(5): 1355-1359.
- [4] NAI S C, PENG C J, RENSCH D B, et al. A 120 W X-band spatially combined solid-state amplifier[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1999, 47: 2557-2561.
- [5] NAI S C, ANGELOS A A, MICHAEL G C, et al. 40 W CW broad-band spatial power combiner using dense finline arrays[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 1999, 47:1070-1076.
- [6] BATTY W, CHRISTOFFERSEN C E, YAKOVLEV A B, et al. Global coupled EM-electrical-thermal simulation and experimental validation for a spatial power combining MMIC array[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 2002, 50(12): 2820-2833.
- [7] BATTY W, PANKS A J, DAVID S, et al. Electro-thermal modeling and measurement of thermal time constants and natural convection in spatial power combining grid arrays[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 2000, 40: 1937-1940.
- [8] BATTY W, PANKS A J, JOHNSON R G, et al. Electro-thermal modeling and measurement for spatial power combining at millimeter wavelengths[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 1999, 47(12): 2572-2586.
- [9] BATTY W, SNOWDEN C M. Electro-thermal device and circuit simulation with thermal nonlinearity due to temperature dependent diffusivity[J]. *Electron. Lett*, 2000, 36: 1966-1968.
- [10] BATTY W, CHRISTOFFERSEN C E, PANKS A J, et al. Electro-thermal CAD of power devices and circuits with fully physical time-dependent compact thermal modeling of complex nonlinear 3-D systems[J]. *IEEE Trans Comp Packag Technol*, 2001, 24: 566-590.

编辑 税 红