

铁磁/铁电复合介质及其超材料结构微波性能

Ferromagnetic/ferroelectric composites and microwave properties of its metamaterial structure

郭鸿霞, 张家萌, 王青敏, 毕 科

(北京邮电大学 理学院, 北京 100876)

GUO Hong-xia, ZHANG Jia-meng, WANG Qing-min, BI Ke

(School of Science, Beijing University of Posts and

Telecommunications, Beijing 100876, China)

摘要: 采用固相法工艺,以钇铁石榴石($Y_3Fe_5O_{12}$, YIG)和钛酸锶钡($Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$, BST)为原料,制备出了一系列 YIG/BST 铁磁/铁电复合介质。利用 XRD 和 SEM 对复合介质的物相和微观形貌进行了观察,并对其介电性能、磁性能进行了详细研究。结果表明:在一定温度下烧结所得的复合介质,铁电相和铁磁相两相独立存在。 $(1-x)YIG-xBST$ ($x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) 复合介质具有良好的介电性能:室温下,随着频率的升高($10^2 \sim 10^6$ Hz),各组分复合介质的介电常数和介电损耗逐步下降;频率为 1 MHz 时,随着 BST 含量的增加,复合介质的介电常数升高,介电损耗先急剧减小而后趋于稳定;随着温度的升高($0 \sim 400$ °C),不同频率下各组分复合介质的介电常数、介电损耗逐步增加。复合介质表现出典型软磁体的磁滞回线形状,随着 BST 含量的增加,饱和磁化强度(M_s)逐渐降低,磁导率减小。同时,对复合介质超材料结构的微波性能进行了研究,结果表明超材料结构可实现磁可调。

关键词: 铁磁/铁电复合介质;钛酸锶钡;钇铁石榴石;介电性能;磁性能;微波性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000980

中图分类号: O441.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)06-0043-07

Abstract: A series of YIG/BST ferromagnetic/ferroelectric composites were prepared by solid-state reaction using yttrium iron garnet ($Y_3Fe_5O_{12}$) and barium titanate ($Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$). The phase and microstructure of the composites were investigated by XRD and SEM, and the dielectric and magnetic property were studied in detail. The results show that the ferroelectric phase and ferromagnetic phase exist independently when the composite is sintered at a certain temperature; $(1-x)YIG-xBST$ ($x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) composites possess great dielectric properties: at room temperature, with increasing frequency (10^2-10^6 Hz), the dielectric constant of each component composite and the dielectric loss decreases gradually; when the frequency is 1 MHz, the dielectric constant of the composite increases with the increase of BST content, and the dielectric loss first drops and then stabilizes; with the increase of temperature ($0-400$ °C), the dielectric constant and dielectric loss of each composite at different frequencies gradually increase. The composites exhibit the hysteresis loop shape of a typical soft magnet. As the BST content increases, the saturation magnetization (M_s) gradually decreases, and the magnetic permeability decreases. The microwave property of the composite based metamaterial structure was studied. The results show that it can realize magnetic tunability.

Key words: ferromagnetic/ferroelectric composite media; barium titanate; strontium iron garnet; dielectric property; magnetic property; microwave property

铁磁体作为一种具有铁磁性的材料,在微波频段具有低损耗、自旋化、磁各向异性和强磁耦合性等特

性,在施加外磁场的情况下会发生铁磁共振从而实现磁可调^[1-3],因此成为微波频率设备中不可或缺的重要

材料。钇铁石榴石($Y_3Fe_5O_{12}$, YIG)作为一种铁磁材料,由于其铁磁共振线宽较窄、电阻率较高以及损耗较低等特性,在微波铁氧体材料及器件、磁性装置中应用广泛^[1,4-5],并被广泛地应用于微波吸收领域,是一种较合适的吸波材料^[6]。为了进一步拓展铁磁材料的使用范围,科研人员将铁磁材料同其他介质材料相复合来制备多功能复合介质。功能复合介质是以各种不同性能的材料组合而成的多相复合介质,具有独特的线性和非线性复合效应,包括乘积、交叉耦合、系统、诱导和共振等效应^[1]。铁磁/铁电复合介质不仅具有铁电材料的电可调性和铁磁材料的磁可调性,而且在性能上产生了协同效应。铁磁/铁电复合材料的综合性能优于原组成材料,可满足各种不同的需要,于是成为功能复合介质的研究热点。自从铁电体钛酸钡($BaTiO_3$)的铁电性得到了验证和应用之后,具有钙钛矿结构的 ABO_3 型铁电材料便引起了研究人员的极大兴趣^[7],一些课题组选取钙钛矿结构的铁电材料如 $Pb(Zr, Ti)O_3$ (PZT), $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ (BST)和铁磁材料如 YIG 进行复合,并对铁磁/铁电复合介质在高频、低频下的磁性能、介电性能等进行了系统研究^[3,8-10]。

结合近几年铁磁/铁电复合材料的发展情况来看,科研人员对于复合材料中铁磁相、铁电相的比例对复合材料各方面性能影响的研究并不多。针对这一现状,本工作主要介绍了 $(1-x)YIG-xBST$ ($x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)铁磁/铁电复合介质的制备方法,对其进行了物相分析和形貌分析,并探究了不同的 YIG, BST 复合比例对 YIG/BST 复合介质的介电性能、磁性能及微波性能的影响。

1 实验材料与方法

以 Y_2O_3 和 Fe_2O_3 为原料,按照摩尔比 3 : 5 进行称料,将原料放入尼龙球磨罐中,球磨 12 h。混合物经出料、烘干、过细筛混匀后,放入马弗炉,在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行烧结,保温 12 h,最终得到所需的 $Y_3Fe_5O_{12}$ 粉体。以 $BaCO_3$, $SrCO_3$ 和 TiO_2 为原料,按照摩尔比为 1 : 1 : 2 进行称料,球磨 12 h。混合物经出料、烘干、过筛混匀后,放入马弗炉,在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行烧结,保温 4 h,最终得到所需的 $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ 粉体。把 BST 和 YIG 粉体按照一定的摩尔比例配成共 5 个组分的 $(1-x)YIG-xBST$ ($x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) 混合物,并放入球磨罐中球磨 12 h。混合物经出料、烘干、过筛后,加入 7% (质量分数) 的 PVA 进行造粒,使用压片机将粉体干压成型。最后将样品进行排胶处理,并在 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行埋粉烧结。将烧结好的样品进行

打磨、超声、烘干、被银处理,然后进行介电性能测试。选取介电性能较好的样品,打磨后进行 XRD, SEM 和能谱测试,并将样品切块进行磁性能和微波性能测试。

采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪对样品进行了物相分析,采用 MERLIN Compact 型扫描电子显微镜对样品进行了表面形貌分析和 EDS 能谱分析。室温下,在 100 Hz 至 2 MHz 的频率范围内,采用 4980A 精密阻抗分析仪测量了复合介质的介电性能;采用 TH2827 阻抗分析仪测量了复合介质的介温谱;采用磁学测量系统(MPMS3)测试了复合介质的磁滞回线和磁导率;采用 N5230C 型矢量网络分析仪测量了超材料结构微波性能。复合介质超材料结构如图 1 所示。复合介质超材料单元尺寸为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,将 4 根样品以 5 mm 为一个间隔周期粘贴于淡黄色胶布上,放置于 X 波段($8\sim 12\text{ GHz}$)波导中。电磁波沿 x 轴入射,电磁波的磁场和电场方向分别沿 y 轴和 z 轴。沿 z 轴方向对复合介质超材料结构施加偏置磁场,使用 S_{21} 参数表征复合介质超材料结构的微波性能。

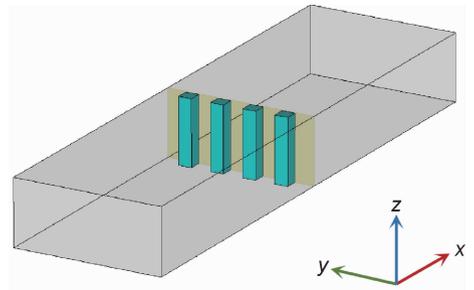


图 1 $(1-x)YIG-xBST$ 复合介质超材料结构测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the $(1-x)YIG-xBST$ composites dielectric metamaterial structure

2 结果与分析

2.1 微观结构

图 2 为不同组分的 $(1-x)YIG-xBST$ 复合介质在 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结后的 X 射线衍射图谱。烧结样品的主晶相为四方钙钛矿 BST 相和立方石榴石 YIG 相,且两相独立存在,没有生成其他的相,这说明在高温烧结条件下,没有多余的化学反应发生。此外,随着 BST 含量的增加, BST 相的衍射峰逐渐增强, YIG 相的衍射峰逐渐减弱且主峰向高角度移动。图 3 为不同 BST 含量的 $(1-x)YIG-xBST$ 陶瓷表面的扫描电镜图。从图 3 中可以看出,烧结后的陶瓷晶粒已经生长完全、分布均匀,图中右上角为样品的粒径分布图,样品的平均粒径尺寸经计算依次为: $0.92, 1.05, 0.82, 0.76, 1.28$

μm 。复合介质由颗粒较大的块状晶粒和颗粒较小的球状晶粒组成,块状晶粒为 YIG,球状晶粒为 BST。随着 BST 含量的增加,球状晶粒分布增加,块状晶粒分布减少。为进一步证明 YIG, BST 两相独立存在,对 $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}(x=0.5)$ 复合介质进行了能谱分析。如图 4 所示,复合介质表面元素分布清晰,可以发现颗粒较大的块状晶粒由 Y, Fe 元素组成,这证实了块状晶粒是立方石榴石 YIG 相,颗粒较小的球状晶粒由 Ba, Sr, Ti 元素组成,可以确定是四方钙钛矿 BST 相,这与 XRD 的图谱分析相吻合,且两相分布区域互补,没有其他杂相分布。

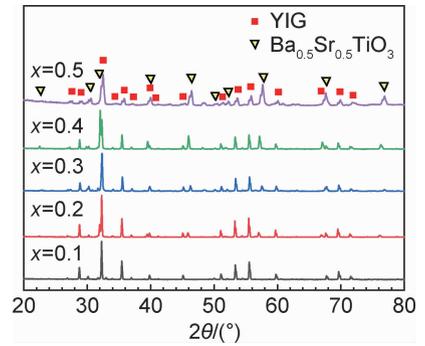


图 2 $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}$ 复合介质的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}$ composites

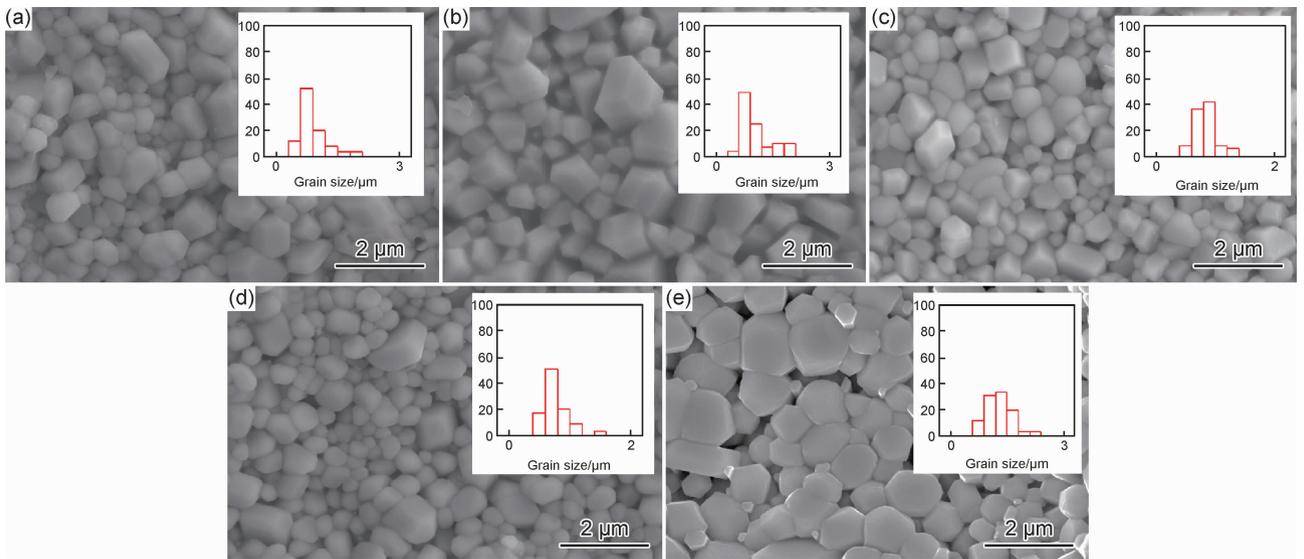


图 3 $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}$ 复合介质表面的扫描电镜图
(a) $x=0.1$; (b) $x=0.2$; (c) $x=0.3$; (d) $x=0.4$; (e) $x=0.5$
Fig. 3 SEM images of $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}$ composite surface
(a) $x=0.1$; (b) $x=0.2$; (c) $x=0.3$; (d) $x=0.4$; (e) $x=0.5$

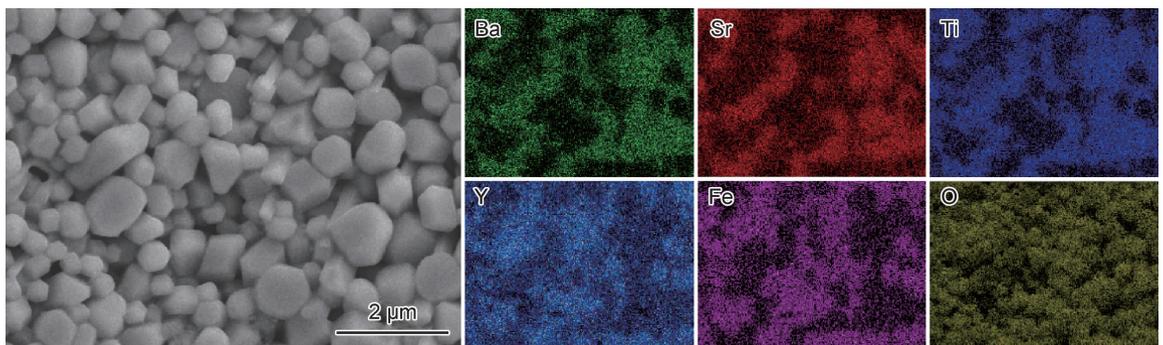


图 4 $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}(x=0.5)$ 复合介质的表面元素面分布图
Fig. 4 Surface element distributions of $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}$ composites

2.2 介电性能

图 5 为 $(1-x)\text{YIG}-x\text{BST}$ 复合介质的介电性能在 1 MHz 频率下随 BST 含量的变化图。随着 BST 含量的增加,复合介质的介电常数显著提高,由 42 增大至

235。这是由于 YIG 的介电常数很低,在 1 MHz 下约为 8,而 BST 的介电常数在 1 MHz 下约为 900^[11], BST 含量的增加提升了 BST 晶粒间的相互作用和连续性,促进了 BST 晶体内电极化的发生^[12],从而导致

复合介质的介电常数逐渐增大。当 $x=0.1$ 时,复合介质的介电损耗较大,在 0.8 左右,当 $x=0.2$ 时,介电损耗骤减至 0.1 左右。这是由于 YIG 含量减少时,复合介质中 Fe^{3+} 的含量减少,使得 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 不易发生跳跃电导,从而使复合介质导电损耗急剧减小^[13-15]。随着 BST 含量增加,复合介质的介电损耗趋于稳定,分布在 0.05~0.2 之间,在 $x=0.3$ 时介电损耗值为 0.07055。

介电损耗在低频时主要以直流漏导为主,并且较高的介电损耗使弛豫峰现象弱化,于是频率增大导致介电损耗骤降。随着频率逐渐增大,复合介质的介电损耗主要以弛豫极化损耗为主,介电损耗会小幅度增加^[16]。

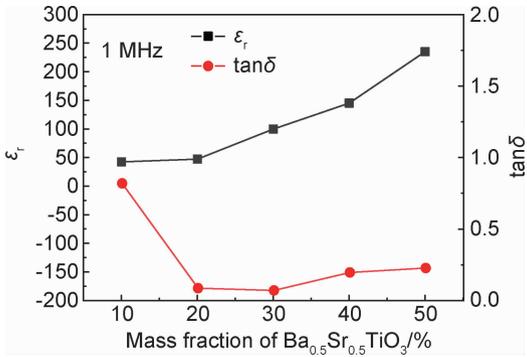


图5 (1-x)YIG-xBST 复合介质的介电性能随 BST 含量的变化图
Fig. 5 Dielectric property of (1-x)YIG-xBST composites with the change of mass fraction of BST

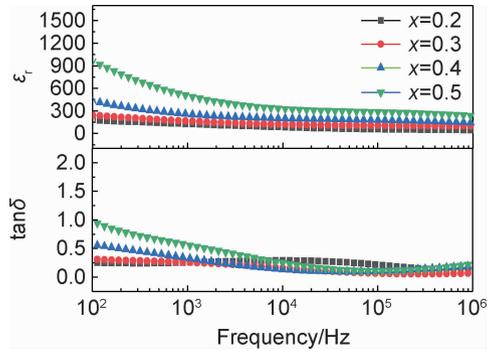


图6 (1-x)YIG-xBST 复合介质的介电性能随频率的变化图
Fig. 6 Dielectric properties of (1-x)YIG-xBST composites as a function of frequency

图6为(1-x)YIG-xBST 复合介质的介电性能随频率的变化图。如图6所示,各组分复合介质的介电常数随着频率的增加($10^2 \sim 10^6$ Hz)逐渐减小。这是由于低频时,复合介质中两相的均匀混合增加了空间电荷的含量,空间电荷聚集在两相的界面上,使得复合介质介电常数较高^[16-17]。各组分复合介质的介电损耗随着频率的增加先减小后增大,这是由于复合介质的

为直观地了解复合介质的介电性能随温度变化而改变的情况,对各组分复合介质在不同频率下的介温谱进行了测量,温度区间从室温到 400 °C,以 1 °C/min 的升温速率设定好升温程序。图7为(1-x)YIG-xBST 复合介质在不同频率下的介温谱图,从图中可以看出,各个频率下,各组分复合介质的介电常数随着温度的升高而增大,频率为 1 kHz、温度为 400 °C 左右时复合介质的介电常数会达到一个峰值。值得注意的是,当 $x=0.1$ 时,在 400 °C 低频 1 kHz 下介电常数高达 60000 左右,表现出巨介电性能。这一现象可以用弛豫现象来解释,复合介质中存在界面极化现象,随着频

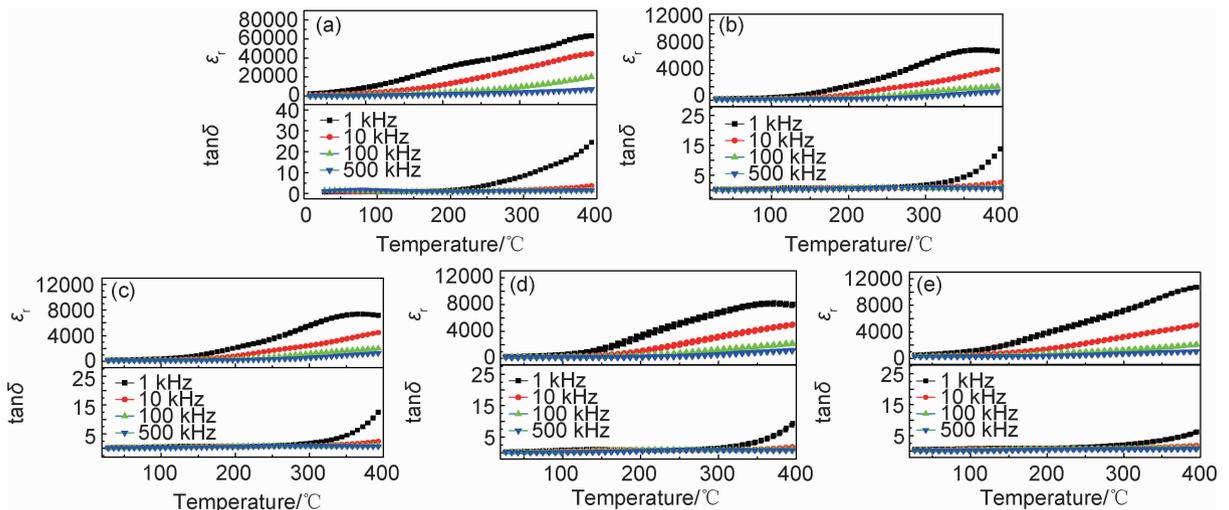


图7 (1-x)YIG-xBST 复合介质在不同频率下的介温谱图
(a)x=0.1;(b)x=0.2;(c)x=0.3;(d)x=0.4;(e)x=0.5
Fig. 7 Dielectric temperature spectra of (1-x)YIG-xBST composites at different frequencies
(a)x=0.1;(b)x=0.2;(c)x=0.3;(d)x=0.4;(e)x=0.5

率增大,复合介质会发生 Maxwell-Wagner 弛豫现象,即在某一频率下介电常数减小,介电损耗出现弛豫峰^[16,18]。复合介质的介电损耗在温度较低时,随着温度的升高无明显变化,当温度升高至 300 ℃左右时,各组分复合介质的介电损耗开始明显增大,尤其是低频状态下介电损耗增大效果显著,这一现象同样可以用弛豫现象来解释。

2.3 磁性能

图 8 为复合介质 $(1-x)$ YIG- x BST 在室温下的磁滞回线。复合介质表现出典型软磁体的磁滞回线形状,随着 BST 含量的增加,饱和磁化强度 M_s 逐渐降低。这是因为该参数取决于磁性材料的总量,饱和磁化强度与复合介质中磁性材料的质量成正比,随着

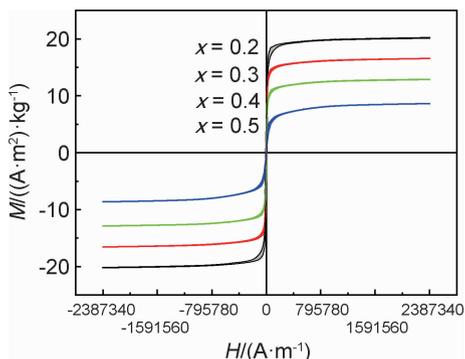


图 8 $(1-x)$ YIG- x BST 复合介质在室温下的磁滞回线
Fig. 8 Hysteresis loop of $(1-x)$ YIG- x BST composites at room temperature

BST 含量的增加 YIG 含量的减少,稀释效应在复合陶瓷的磁性能中起到了主导作用^[16]。

图 9 为复合介质磁导率随 BST 含量的变化关系图。铁氧体的磁导率与自旋磁化强度和畴壁移动有关,而畴壁运动与烧结密度和晶粒尺寸有关。非磁性材料 BST 相的存在,可以削弱磁性材料 YIG 晶粒间的相互作用和连续性。因此,随着 BST 含量的增加 YIG 含量的减少,复合介质的磁导率减小^[19]。

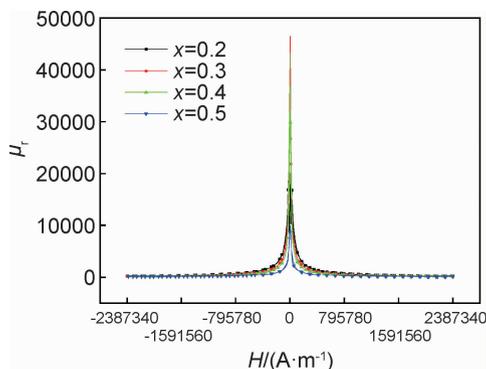


图 9 $(1-x)$ YIG- x BST 复合介质的磁导率随 BST 含量变化曲线图
Fig. 9 Magnetic permeability curves of $(1-x)$ YIG- x BST composite with BST contents

2.4 超材料结构微波性能

本课题组对 $(1-x)$ YIG- x BST ($x=0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) 复合介质超材料结构在微波波段的磁性能进行了探究。图 10 为复合介质超材料结构透射参数 S_{21} 随频

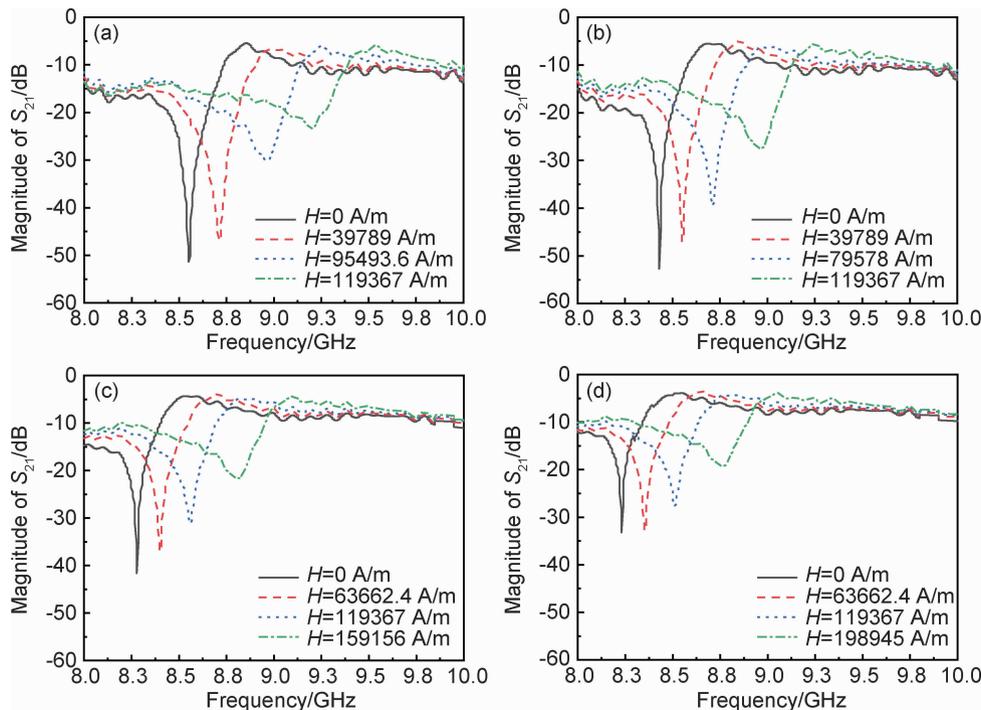


图 10 $(1-x)$ YIG- x BST 超材料结构的透射参数 S_{21} 与频率的变化关系 (a) $x=0.2$; (b) $x=0.3$; (c) $x=0.4$; (d) $x=0.5$

Fig. 10 Relationship between transmission parameter S_{21} and frequency of $(1-x)$ YIG- x BST metamaterial structure

(a) $x=0.2$; (b) $x=0.3$; (c) $x=0.4$; (d) $x=0.5$

率的变化关系图,从图 10(a)可以看出,超材料结构在 $H=0$ A/m,即没有外加磁场时,于 8.6 GHz 处出现了一个由 BST 的 Mie 谐振引起的透射禁带^[20]。随着 BST 含量的增大,复合介质的介电常数逐渐增大(参照图 5),其超材料结构的 Mie 谐振频率逐步向低频移动。此外,从图 10(a)可以看出,随着外加磁场从 39 789 A/m 增加到 119 367 A/m,透射禁带由 8.8 GHz 增加到 9.3 GHz,表明复合介质具有明显的磁可调性能。图 10(b)~(d)显示, $x=0.3,0.4,0.5$ 组分的复合介质超材料结构表现出相同的磁可调性能。这是由于在外加磁场的作用下,复合介质中 YIG 发生了铁磁共振^[21-22],当铁磁共振频率靠近原有 Mie 谐振引起的透射禁带频率时,透射禁带向高频移动。该复合介质超材料结构表现出了明显的磁可调特性,在可调微波器件领域其有较大的应用前景。

3 结论

(1) YIG 和 BST 复合后两相独立存在,没有发生反应生成其他杂相。随着 BST 含量的增加,BST 相衍射峰的强度逐渐增强,YIG 相衍射峰的强度逐渐减弱且主峰向着高角度移动。

(2) YIG 和 BST 晶粒在 $(1-x)$ YIG- x BST 复合介质中按复合比例分布。

(3) YIG/BST 复合介质具有良好的介电性能:在 1 MHz 下,随着 BST 含量的增加,复合介质的介电常数逐步增大,介电损耗先急剧减小而后趋于稳定;各组分复合介质的介电常数随着频率的增加($10^2 \sim 10^6$ Hz)逐渐减小,介电损耗先减小后增大;随着温度的升高($0 \sim 400$ °C)各组分复合介质的介电常数、介电损耗逐步增加。

(4) 复合介质表现出典型的软磁体的磁滞回线形状,随着 BST 含量的增加,复合介质的饱和磁化强度 M_s 逐渐降低,磁导率减小。

(5) 基于该复合介质制备的超材料结构可实现磁可调,在可调微波器件领域有很大的应用前景。

参考文献

[1] 都有为. 铁氧体[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1996:172-204.
DU Y W. Ferrite[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press,1996:172-204.

[2] HEINDL R. Ferrite-ferroelectric thin films with tunable electrical and magnetic properties[D]. Florida, USA: University of South Florida,2006.

[3] KALARIKAL S S, MENARD D, DAS J, et al. Static and high

frequency magnetic and dielectric properties of ferrite-ferroelectric composite materials[J]. Journal of Applied Physics,2006,100(8):84905-84913.

- [4] HARRIS V G, GEILER A, CHEN Y, et al. Recent advances in processing and applications of microwave ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2009,321(14):2035-2047.
- [5] 曾丽文,徐光亮,刘桂香,等. 室温固相反应法制备 YIG 纳米粉体[J]. 人工晶体学报,2010,39(6):1434-1450.
ZENG L W, XU G L, LIU G X, et al. Preparation of YIG nanoparticles by solid state reaction at room temperature[J]. Journal of Synthetic Crystals,2010,39(6):1434-1450.
- [6] 高海涛,王建江,李泽. 基于超材料设计的钽铁氧化吸波涂层研究[J]. 材料工程,2019,47(1):70-76.
GAO H T, WANG J J, LI Z, et al. Barium ferrite microwave absorbing coating based on metamaterial design[J]. Journal of Materials Engineering,2019,47(1):70-76.
- [7] 云斯宁,王晓莉,孙晓亮. $Ba_{1-x}Sr_xTi_{0.88}Sn_{0.12}O_3$ 陶瓷结构与介电性能的研究[J]. 材料工程,2006(9):49-52.
YUN S N, WANG X L, SUN X L. Microstructure and dielectric properties of $Ba_{1-x}Sr_xTi_{0.88}Sn_{0.12}O_3$ ferroelectric ceramics[J]. Journal of Materials Engineering,2006(9):49-52.
- [8] KIM J Y, KOH J H, SONG J S, et al. Magnetically and electrically tunable devices using ferromagnetic/ferroelectric ceramics[J]. Physica Status Solidi(B): Applied Research,2004,241(7):1714-1717.
- [9] SRINIVAS A, GOPALAN R, CHANDRASEKHARAN V. Room temperature multiferroism and magnetoelectric coupling in $BaTiO_3/BaFe_{12}O_{19}$ system[J]. Solid State Communications,2009,149(9):367-370.
- [10] LI X, YAN B, DONG G, et al. Study on phase structure, dielectric and magnetic properties of BST/YIG composites[J]. Journal of Inorganic Materials,2009,24(2):383-386.
- [11] JACOBO S E, FANO W G, RAZZITE A C, et al. Dielectric properties of barium hexaferrite in the microwave range[C]//1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, USA: IEEE,1998,1:273-276.
- [12] 池恒. 铁电-铁磁复合陶瓷的介电性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
CHI H. Study on dielectric properties of ferroelectric-ferromagnetic composite ceramics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [13] SRIDESHMUKH L, KUMAR K K, LAXMAN S B, et al. Dielectric properties and electrical conduction in yttrium iron garnet (YIG) [J]. Bulletin of Materials Science,1998,21(3):219-226.
- [14] OZGUR U, ALIVOV Y, MORKOC H. Microwave ferrites, part 1: fundamental properties[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics,2009,20(9):789-834.
- [15] DMRIL M C, KASHYAP S C, DUBE D C. Electrical and magnetic properties of barium hexaferrite nanoparticles prepared by citrate precursor method[J]. Ceramics International,2004,30(7):1623-1626.
- [16] 杨海波,陈含雨,李昭,等. $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ 基三相磁电复合材料的介电和磁性研究[J]. 陕西科技大学学报,2015,33(4):

- 28-31.
- YANG H B, CHEN H Y, LI Z, et al. Dielectric and magnetic properties of $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ based three-phase magnetoelectric composites[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2015, 33(4):28-31.
- [17] YANG H, WANG H, HE L, et al. Polarization relaxation mechanism of $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3/\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ composite with giant dielectric constant and high permeability[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(7):074105.
- [18] YANG Y Y, YANG H B, LU L, et al. Low-temperature sintering and properties of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ni}_{0.37}\text{Cu}_{0.20}\text{Zn}_{0.43}\text{Fe}_{1.92}\text{O}_{3.88}$ composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 555(5):402-404.
- [19] NAKAMURA T. Low-temperature sintering of Ni-Zn-Cu ferrite and its permeability spectra[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1997, 168(3):285-291.
- [20] ZHAO Q, ZHOU J, ZHANG F L, et al. Mie resonance-based dielectric metamaterials[J]. Materials Today, 2009, 12:60-69.
- [21] 毕科, 周济, 赵宏杰, 等. 基于铁磁共振的超材料研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(19):1785-1795.
- BI K, ZHOU J, ZHAO H J, et al. Research progress of ferromagnetic resonance based metamaterials[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(19):1785-1795.
- [22] 毕科, 王旭莹, 兰楚文, 等. 可调介质超材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(1):1-13.
- BI K, WANG X Y, LAN C W, et al. Research progress on adjustable medium metamaterials[J]. Materials China, 2019, 38(1):1-13.
-
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61774020, 51972033)
- 收稿日期:**2019-10-29; **修订日期:**2020-03-05
- 通讯作者:**毕科(1983—), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向:电磁超材料与相关器件设计, 联系地址:北京市海淀区西土城路十号北京邮电大学理学院(100876), E-mail: bike@bupt.edu.cn

(本文责编:齐书涵)