

文章编号: 1004-0609(2006)05-0753-05

# $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ 微波电磁特性与损耗机制<sup>①</sup>

周克省<sup>1</sup>, 王 达<sup>1</sup>, 尹荔松<sup>1</sup>, 孔德明<sup>1</sup>, 黄可龙<sup>2</sup>

(1. 中南大学 物理科学与技术学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 化学化工学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 用溶胶-凝胶法制备  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  ( $y = 0.10, 0.12, 0.14, 0.16$ ) 样品, 测试并分析该样品在 2~18 GHz 微波频率范围的复介电常数、复磁导率、损耗角正切及微波吸收系数与频率的关系, 发现  $y = 0.12, 0.14$  时吸波的效果最好。样品厚度为 2 mm、 $y$  为 0.12 时, 有 2 个吸收峰, 吸收峰值最高达 22 dB, 10 dB 以上吸收频带宽度达 6.2 GHz; 厚度 2.21 mm 样品 8 dB 以上的吸收频宽达 8.5 GHz。初步探讨了该材料的电磁损耗机理, 电磁特性参数在频率为 12.4 GHz 位置发生阶跃式变化, 在小于 12.4 GHz 频率范围以介电损耗为主, 在大于 12.4 GHz 频率范围以磁损耗为主, 这与 Fe 对  $\text{Mn}^{3+} \rightarrow \text{O} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$  之间的影响有关。电导率测试表明在室温范围内电导在半导体范围内, 有利于降低微波在氧化物表面的反射率。

**关键词:**  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ; 微波吸收材料; 电磁损耗; 稀土锰氧化物

**中图分类号:** O 441.6

**文献标识码:** A

## Electromagnetic properties and loss mechanism of $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ in microwave band

ZHOU Ke-sheng<sup>1</sup>, WANG Da<sup>1</sup>, YIN Li-song<sup>1</sup>, KONG De-ming<sup>1</sup>, HUANG Ke-long<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Chemical Technology, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The experiment samples of  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  ( $y = 0.10, 0.12, 0.14, 0.16$ ) were prepared by sol-gel process, and those complex dielectric constant, complex permeability, loss tangent and absorption coefficient in 2~18 GHz microwave frequencies were measured and analyzed. The absorption mechanism of the material was studied generally. The result shows that when the thickness of the sample is 2 mm and  $y = 0.12$  there are two absorption peaks; the highest is 22 dB and the effective band width of more than 10 dB reaches 6.2 GHz. The band width of more than 8 dB of the sample with thickness of 2.21 mm attains 8.5 GHz. The electromagnetic loss parameter increases or decreases suddenly at frequency about 12.4 GHz, when the frequency is less than 12.4 GHz, the dielectric loss is the major loss. When the frequency is more than 12.4 GHz, the magnetic loss is the major loss. It shows to be semiconductor at room temperature by testing the conductance, which is beneficial to reducing the reflect of microwave.

**Key words:**  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ; microwave-absorbing materials; electromagnetic loss; rare earths Mn oxide

稀土锰氧化物具有钙钛矿型晶体结构, 一般情况下表现为反铁磁性, 但在 A 位掺杂二价碱土金属

元素(如 Sr、Ca、Ba、Pb), 且掺杂浓度为 0.2~0.5 时却具有铁磁性<sup>[1, 2]</sup>。

① 基金项目: 湖南省科技计划资助项目(04FJ3034)

收稿日期: 2005-09-05; 修订日期: 2005-12-06

通讯作者: 王 达; 电话: 0731-8836331; E-mail: 5430@mail.csu.edu.cn

双交换模型<sup>[15]</sup>可以解释这种由反铁磁转变为铁磁的现象。近几年来,由于掺杂稀土锰氧化物具有巨磁电阻效应而成为了磁电子功能材料领域的一个研究热点<sup>[17]</sup>。另外,这种材料因其特殊的电磁特性,将有可能发展为强吸收、宽频带电磁波吸收材料,但此类报道极少。然而可以预期,掺杂稀土锰氧化物和稀土铁氧化物将成为吸波材料的重要研究方向<sup>[8]</sup>。胡国光等<sup>[9, 10]</sup>用固相反应法制备出  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$  并研究了该材料在 8~12 GHz 频率范围的微波吸收特性,发现其在  $x = 0.5$ 、厚度为 2.21 mm 时,8 dB 以上微波吸收频带宽为 3、10 GHz 位置吸收峰高达 25 dB,说明它是一种较优良的吸波材料。Kagotani 等<sup>[11]</sup>研究了 M 型钡铁氧体结构的  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Zn}_x\text{Fe}_{12-x-y}(\text{Me}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_y\text{O}_{19}$  (Me: Zr, Sn) 在 1~20 GHz 频率范围的微波吸收特性,表明 Zr、Sn 的掺入有利于微波吸收性能的提高,涂层厚度不到 1 mm,吸收系数高达 40 dB,但有效吸收频带不到 1 GHz。

本文作者用溶胶-凝胶方法制备了 A、B 位同时掺杂的  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  粉晶,研究了样品在 2~18 GHz 频率范围的微波电磁响应和吸收特性,发现其 10 dB 以上有效吸收带宽达 6.2 GHz、吸收峰高达 34 dB。研究结果说明,稀土锰氧化物可以通过掺杂调节电磁参数,也显示出掺杂稀土锰氧化物在吸波材料技术领域的广阔应用前景。

## 1 实验

### 1.1 溶胶-凝胶法制备 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$

选用  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2)_2$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , 组成分子式为  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  ( $y = 0.10, 0.12, 0.14, 0.16$ ),然后把上述物质的溶液缓慢加到溶有一定浓度的 EDTA 溶液中,并用磁力搅拌器搅拌,反应 6 h,蒸干溶液,燃烧得到黑色粉末,将黑色粉末在 800 °C 煅烧 3 h 得到  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  样品。经 X 射线衍射检测,均为  $\text{ABO}_3$  型钙钛矿结构(图 1)。

### 1.2 微波电磁参数和吸收性能测试

将  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  粉体与石蜡按 8:3 比例均匀混合加热,压制成圆环形样品,用美国 HP8722 型微波网络矢量分析仪测定样品的复磁导率及复介电常数,扫描频率范围为 2~18 GHz,每隔 0.08 GHz 测量一次数据。

当波长为电磁波垂直入射到样品上时,其等效

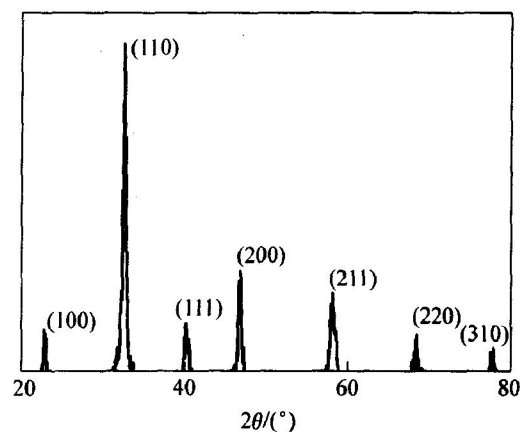


图 1  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$  的 X 射线衍射谱

Fig. 1 XRD pattern of  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$

输入阻抗  $Z_{in}$  为<sup>[11, 12]</sup>

$$Z_{in} = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh \left[ j(2\pi d)/\lambda \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \right] \quad (1)$$

反射率  $R$  为

$$R = 20 \lg |(Z_{in} - 1)/(Z_{in} + 1)| \quad (2)$$

式中  $d$  为样品得厚度;  $\epsilon_r$ 、 $\mu_r$  分别为复介电常数和复磁导率。

根据式(1)和(2),可以计算出不同厚度的样品对应不同频率的反射率  $R$ 。另外,用 HP8620 微波标量网络分析仪直接测量了微波吸收系数,测试结果与理论计算结果基本相同。

## 2 结果与分析

### 2.1 B 位掺铁含量对微波吸收性能的影响

图 2 所示为涂层厚度为 2 mm、B 位不同掺铁量( $y = 0.10, 0.12, 0.14, 0.16$ )的  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  样品反射率与频率的关系。随着  $y$  的增加,主吸收峰蓝移且峰值升高,但  $y = 0.16$  时峰发生红移且峰值下降。实验结果如下:  $y = 0.10$  时,13 GHz 位置处吸收峰高为 14 dB,10 dB 频宽为 2.8 GHz;  $y = 0.12$  时,10.5 GHz 和 15 GHz 位置处吸收峰高分别为 11 dB 和 19 dB,10 dB 频宽达到 6.2 GHz;  $y = 0.14$  时,10.5 GHz 和 15 GHz 位置吸收峰高分别为 13 dB 和 34 dB,10 dB 频宽为 6.2 GHz;  $y = 0.16$  时,9.5 GHz 和 10.5 GHz 位置的吸收峰高分别为 16 dB 和 22 dB,10 dB 频宽为 3.4 GHz;可见,  $y = 0.12, 0.14$  时样品的有效微波吸收频带相对较宽。

### 2.2 样品厚度对微波吸收性能的影响

图 3 所示为 3 种不同厚度的  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$

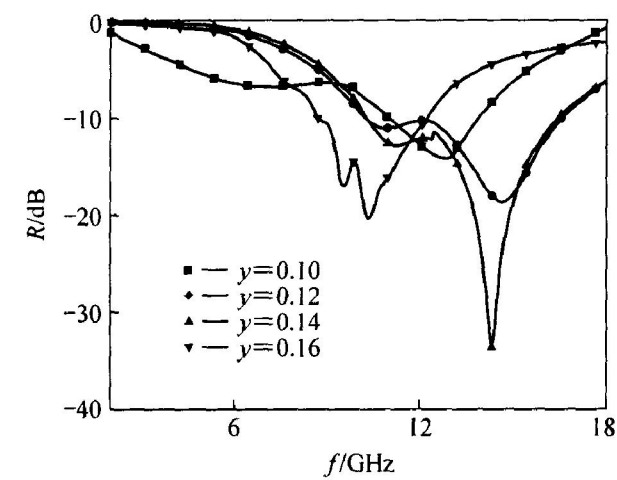


图 2 不同掺铁含量样品反射率与微波频率的关系  
**Fig. 2** Relations between  $R$  and  $f$  for samples with different Fe contents (thickness of 2 mm)

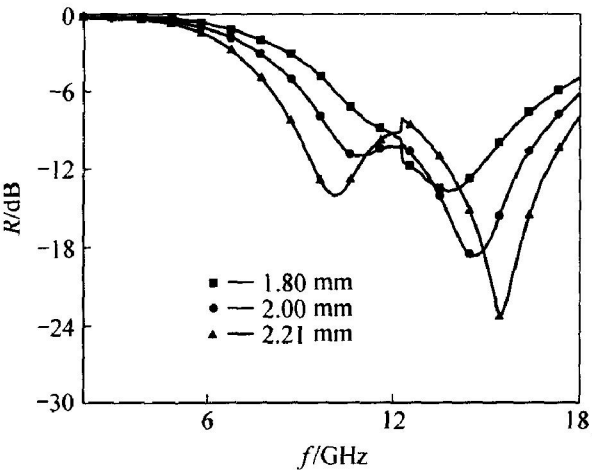


图 3 不同厚度样品的反射率与微波频率的关系  
**Fig. 3** Relations between  $R$  and  $f$  for sample  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$  with different thicknesses

$\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$  反射率与微波频率的关系曲线。随着厚度的增加, 吸收峰值升高, 左峰红移, 右峰蓝移, 有效吸收频带加宽, 但两峰之间(12.4 GHz 附近)吸收率略有下降。在厚度为 2.21 mm 时, 两峰之间吸收最低值为 9.5 dB, 8 dB 以上的频带宽达到了 8.5 GHz。可见, 厚度对于吸波性能的影响是一个很重要的参数。

2.3 复介电常数、复磁导率与损耗角正切

为了探讨吸波机制, 测量了  $y = 0.12$  样品的介电常数、磁导率、损耗角正切与微波频率(2~18 GHz)的关系(如图 4~6 所示)。

在图 4 中, 介电常数实部  $\epsilon'$  和虚部  $\epsilon''$  随频率  $f$  增加而平缓下降, 但在 12.4 GHz 附近都出现阶跃

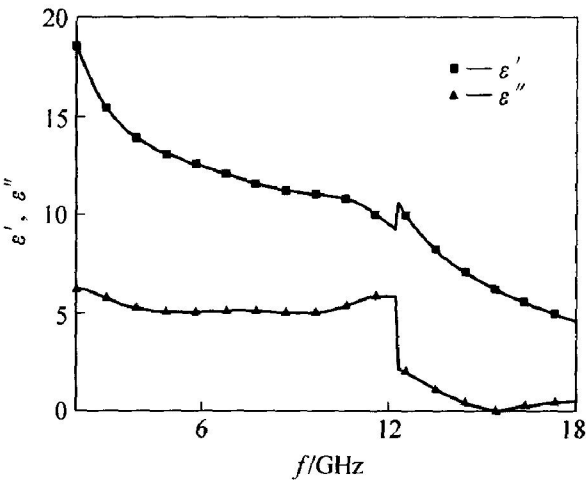


图 4 复介电常数与微波频率的关系  
**Fig. 4** Relations between complex dielectric constant and  $f$  for sample  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$

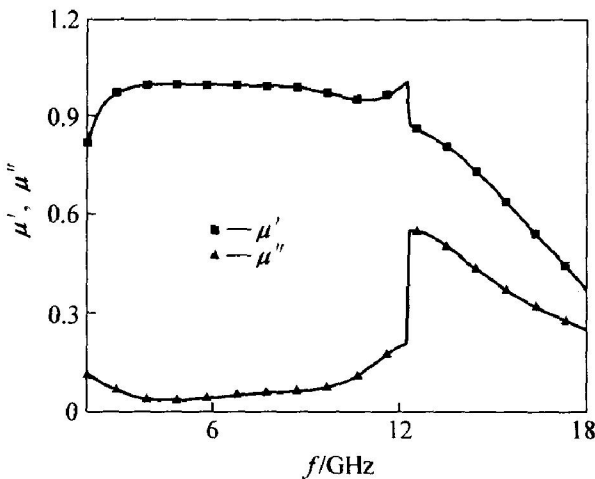


图 5 复磁导率与微波频率的关系  
**Fig. 5** Relations between complex permeability and  $f$  for sample  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$

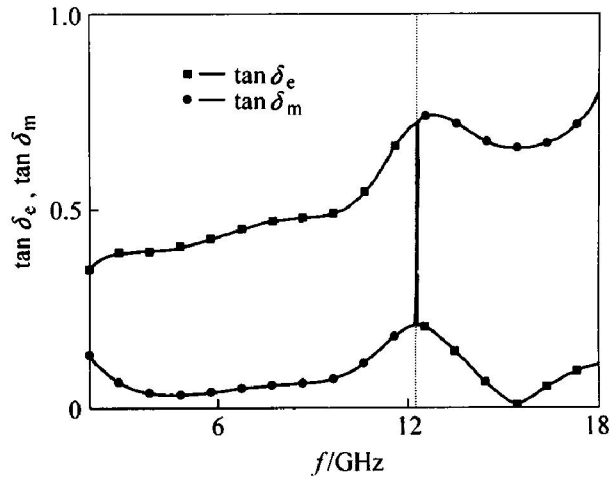


图 6 损耗角正切与微波频率的关系  
**Fig. 6** Relations between loss tangent and  $f$  for sample  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$

式变化, 小于 12.4 GHz 频率范围的  $\epsilon''$  较大, 而大于 12.4 GHz 频率范围的  $\epsilon''$  很小。在图 5 中, 磁导率实部  $\mu'$  和虚部  $\mu''$  在小于 12.4 GHz 频率范围变化平缓,  $\mu'$  数值较大而  $\mu''$  数值很小, 在 12.4 GHz 附近出现阶跃式变化(与  $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$  的阶跃式变化方向正好相反)。在大于 12.4 GHz 频率范围,  $\mu'$ 、 $\mu''$  随频率增加而减小。在图 6 中, 频率小于 12.4 GHz 的  $\tan \delta$  较大而  $\tan \delta_m$  很小, 在 12.4 GHz 附近分别出现相反方向的阶跃式变化。

对  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  的微波电磁特性和吸收性能的测试发现: 在小于 12.4 GHz 频率范围,  $\epsilon''$  值较大且几乎不变, 在 12.4 GHz 处突然降致很小, 此后继续下降; 而  $\mu''$  在小于 12.4 GHz 频率范围, 数值很小, 在 12.4 GHz 处突然上升至较大数值;  $\tan \delta$  和  $\tan \delta_m$  在 12.4 GHz 附近发生阶跃式变化,  $\tan \delta$  由较大数值突降至较小数值又继续下降至最小再上升,  $\tan \delta_m$  由较小数值突升至较大数值又缓慢下降再缓慢上升。上述实验结果表明: 在小于 12.4 GHz 微波频率范围, 样品表现为介电损耗吸收; 在大于 12.4 GHz 微波频率范围, 表现为磁损耗吸收。从图 2、3 的介电谱和磁谱来看, 没有明显的共振峰, 共振频率可能存在于测试频率范围之外。

图 7 所示为  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$  电阻率的温度特性。从图中可以看出, 在室温范围内  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$  电阻率特性在半导体范围内。

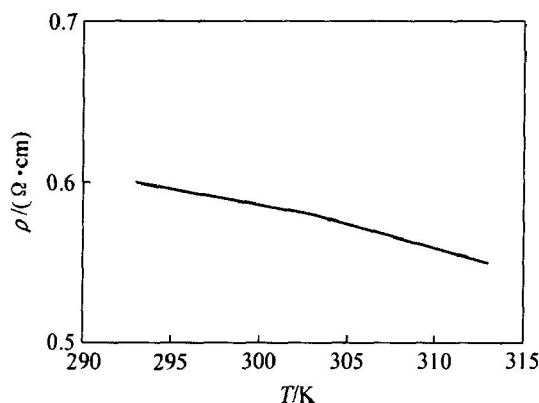


图 7  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$  电阻率的温度特性

Fig. 7 Temperature dependency of resistivity for  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$

## 2.4 吸收机理的分析讨论

当 B 位掺杂 Fe 的时候, 通过研究  $\text{La}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  穆斯堡尔谱, Ogale 等<sup>[13]</sup>发现, Fe 的加入不会影响  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  的双交换作用, 但会产生  $\text{Fe}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  反铁磁交换键, 弱化了

$\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  的双交换作用, 并且 Fe 掺杂量达到一定时, 体系的输运性质出现了局域化向解局域化的转变(Fe 的加入影响了  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  在整个样品中的联系), Fe、Mn 的输运性质对  $\text{La}(\text{Sr})\text{MnFeO}_3$  体系也适用。

由图 2 可以看出, 厚度为 2 mm 时,  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  ( $y = 0.12, 0.14$ ) 都有 2 个吸收峰, 第 1 个峰对应吸收的频率在 10.4 GHz 附近, 在图 6 中可以看到频率在 10.4 GHz 主要以介电损耗为主。Fe 的加入只影响了  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  的电磁损耗特性, 不影响  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  的双交换作用, 胡国光等<sup>[9]</sup>认为, 在 10.4 GHz 吸收峰与氧化物中出现的  $\text{Mn}^{3+} + e^- - \text{Mn}^{4+}$  过程有关, 在 2~12.4 GHz 微波电磁场中, 氧化物电子和离子极化形成介电损耗; 第 2 个峰对应吸收的频率在 15 GHz 附近, 从图 4~6 中可以看到, 频率在 15 GHz 主要以磁损耗为主。对可能的磁损耗 ( $\text{Mn}-\text{O}-\text{Mn}$ ,  $\text{Mn}-\text{O}-\text{Fe}$ ,  $\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}$ ) 进行分析, 结果如下: Fe-O-Fe 之间是反铁磁交换, 磁导率低。对于铁氧体吸波特性的研究表明<sup>[14]</sup>只有尖晶石结构和磁铅石的铁氧体具有吸波的特性, 并且具有共振吸收峰。在  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{0.88}\text{Fe}_{0.12}\text{O}_3$  晶体中, Fe 为钙钛矿结构, Fe-O-Fe 具有反铁磁结构不能进行磁损耗的微波吸收; Ahn 等<sup>[15]</sup>对 Mn-O-Fe 之间的电子能带研究表明 Mn 的 3d 电子与 Fe 的 3d 电子能带差值在 0.3~0.4 eV 范围内, 这样的能带结构决定了 Mn-O-Fe 之间在微波频率范围内不能发生磁损耗; Fe 的加入会产生  $\text{Fe}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$  等反铁磁交换键, 弱化了  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  之间的磁交换作用, 当具有一定能量的电磁波 (12.4~18 GHz) 作用到被 Fe 所影响的  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  的时候, 可能重新激发了  $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$  之间的磁交换作用, 并通过涡流损耗、磁滞损耗等形成磁损耗。

$\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  在没有掺杂 Fe 时经电导率测定为导体<sup>[1]</sup>, 掺杂 Fe 以后电阻率处在半导体范围内。Tkachuk 等<sup>[16]</sup>认为掺杂 Fe 不导电, 从而减少了电子跳跃的位置数, 在电子通道上造成断点。这就降低了电磁波在氧化物表面的反射率, 并通过漏电流损耗等把微波能量转换成热能。

## REFERENCES

- [1] 戴道生, 熊光成, 吴思诚.  $\text{Re}_{1-x}\text{T}_x\text{MnO}_3$  氧化物的结构、电磁特性和巨磁电阻[J]. 物理学进展, 1997, 17

- (2): 201 - 222.
- DAI Dao-sheng, XIONG Guang-cheng, WU Si-cheng. Structure and colossal magnetoresistance of  $\text{Re}_{1-x}\text{T}_x\text{MnO}_3$  [J]. Progress in Physics, 1997, 17(2): 201 - 222.
- [2] 胡季帆, 梅良模, 丁志强, 等. 钙钛矿氧化物  $\text{La}_{0.65}(\text{Ca}, \text{Ba})_{0.35}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_y$  的磁电阻效应[J]. 稀土, 2000, 21(1): 19 - 22.
- HU Jīfan, MEI Liang-mo, DING Zhīqiang, et al. Magnetoresistance effects in  $\text{La}_{0.65}(\text{Ca}, \text{Ba})_{0.35}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_y$  [J]. Chinese Rare Earths, 2000, 21(1): 19 - 22.
- [3] 许恒毅, 曹庆琪, 唐 涛. 稀土锰氧化物  $\text{La}_{1-x}\text{Na}_x\text{MnO}_3$  室温磁电阻效应研究[J]. 功能材料, 2001, 32(2): 147 - 148.
- XU Heng-yi, CAO Qing-qi, TANG Tao, et al. Magnetoresistance in room temperature of manganic oxide  $\text{La}_{1-x}\text{Na}_x\text{MnO}_3$  [J]. Journal of Functional Materials, 2001, 32(2): 147 - 148.
- [4] 尹荔松. 掺杂  $\text{LaMnO}_3$  体系的制备及其磁性和热性研究[D]. 广州: 中山大学, 2003.
- YIN Līsong. Studying of preparation, magnetic properties and thermal properties of doped  $\text{LaMnO}_3$  system [D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2003.
- [5] Owens F J. DC Magnetic field dependent microwave absorption in CMR material  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  [J]. Phys Chem Solids, 1997, 58(9): 1311 - 1314.
- [6] Belevtsev B I, Cherpak N T, Chukanova I N, et al. Magnetic inhomogeneity effects in DC transport properties and microwave absorption of  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$  film [J]. Physica E, 2003(18): 304 - 305.
- [7] 郭焕银, 刘 宁, 徐素军, 等. 掺杂少量 Sm 时  $\text{La}_{0.67-x}\text{Sm}_x\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.30$ ) 的磁电性质 [J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(12): 1481 - 1485.
- GUO Huan-yin, LIU Ning, XU Su-jun, et al. Magnetoelectric property of  $\text{La}_{0.67-x}\text{Sm}_x\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  at low Sm doping ( $0.00 \leq x \leq 0.30$ ) [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(12): 1481 - 1485.
- [8] 徐 坚, 熊惟皓, 曾爱香, 等. 稀土元素在磁性吸波材料中的应用研究进展[J]. 稀土, 2004, 25(6): 68 - 73.
- XU Jian, XIONG Wei-hao, ZENG Ai-xiang, et al. Application of rare in the electromagnetic wave absorbing materials [J]. Rare Earths, 2004, 25(6): 68 - 73.
- [9] Li G, Hu G G, Zhou G H, et al. Attractive microwave absorbing properties of  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$  [J]. Materials Chemistry and Physics, 2002(75): 101 - 104.
- [10] 胡国光, 尹 萍, 吕庆荣.  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$  氧化物的导电和吸收特性[J]. 中国稀土学报, 2002, 20(2): 179 - 181.
- HU Guo-guang, YIN Ping, LÜ Qing-rong. Attractive microwave absorbing properties and conduct of  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$  [J]. Chinese Rare Earths, 2002, 20(2): 179 - 181.
- [11] Kagotani T, Fujiwara D, Sugimoto S, et al. Enhancement of GHz electromagnetic wave absorption characteristics in aligned M-type barium ferrite  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Zn}_x\text{Fe}_{12-x-y}(\text{Me}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_y\text{O}_{19}$  ( $x = 0.00 - 0.5$ ;  $y = 1.0 - 3.0$ , Me: Zr, Sn) by metal substitution [J]. J Magnetism and Magnetic Materials, 2004 (272 - 276): e1813 - e1815.
- [12] 吴晓光, 车晔秋. 国外微波吸收材料[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992. 168.
- WU Xiao-guang, CHE Ye-qiu. Microwave Absorbing Materials of Foreign [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1992. 168.
- [13] Ogale S B, Shreekala R, Bathe R, et al. Transport properties, magnetic ordering and hyperfine interactions in Fe-doped  $\text{La}_{0.75}\text{Ca}_{0.25}\text{MnO}_3$ : Localization-delocalization transition [J]. Phys Rev B, 1998. 7481 - 7485.
- [14] 李斌太, 陈大明, 陈钦生. 铁氧体微波吸收材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2004. 5.
- LI Tai-bin, CHEN Da-ming, CHEN Qin-sheng. Mechanism and advance of ferrite absorber [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2005. 4.
- [15] Ahn K H, Wu X W, Liu K, et al. Magnetic properties and colossal magnetoresistance of  $\text{La}(\text{Ca})\text{MnO}_3$  materials doped with Fe [J]. Phys Rev B, 1996, 54(21): 15299 - 15302.
- [16] Tkachuk A, Rogacki K, Brown D E, et al. Dynamics of phase stability and magnetic order in magnetoresistive  $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{Mn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_3$  [J]. Phys Rev B, 1998. 8509 - 8517.

(编辑 陈爱华)