

文章编号: 1000-5862(2019)05-0473-05

## Ba 位和 Fe 位 La-Co 共掺杂对 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 磁性能的影响

张 敏 朱光平 刘强春 李 强 崔超鹏

(淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000)

摘要: 通过溶剂热法合成了 La-Co 共掺杂的 Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0, 0.1, 0.15, 0.2$  和  $0.25$ ) 系列纳米材料样品. X-射线衍射分析结果发现: 低掺杂量制备的样品是单相的, 但随着 La-Co 掺杂量的增加, 出现了第 2 相 LaFeO<sub>3</sub>. 用扫描电子显微镜观察了样品的微观形貌, 在低掺杂量时, 样品呈现明显的片状六角结构, 具有较好的分散性. 随着掺杂浓度的升高, 样品的六角形形貌变得不明显, 而且颗粒出现了明显的团聚现象. 磁性测量表明: 当 La-Co 掺杂量  $x=0.1$  时, 矫顽力达到最大值为 5 831 Oe, 且饱和磁化强度降低缓慢, 几乎不变; 随着 La-Co 掺杂量的进一步增加, 饱和磁化强度和矫顽力均出现不同程度的降低, 这可能源于 La-Co 离子掺杂效应和第 2 相 LaFeO<sub>3</sub> 的出现. 研究结果揭示了适量的 La-Co 掺杂 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 六角铁氧体在高密度磁存储方面具有潜在的应用前景.

关键词: 溶剂热法; 六角铁氧体; La-Co 掺杂; 磁性; 矫顽力

中图分类号: TQ 58 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.05.06

### 0 引言

M 型 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> (BaM) 作为一种重要的磁铅石型结构的六角铁氧体, 由于具有高的矫顽力、大的饱和磁化强度、高的居里温度、良好的化学稳定性和耐腐蚀性, 近年来已经被广泛应用于高密度磁存储、永磁体、微波吸收等领域<sup>[1-5]</sup>. 但就实际应用来看, 何种手段能够有效调控 BaM 的微结构以及磁性能仍然是科学家面临的重要挑战之一. 在钡铁氧体 BaM 中, Fe<sup>3+</sup> 离子处于 5 种不同的晶位, 分别是 2a、2b、4f<sub>2</sub>、4f<sub>1</sub> 和 12k, 其中 4f<sub>1</sub>、4f<sub>2</sub> 晶位上的离子磁矩与晶位 2a、2b、12k 上的离子磁矩反平行排列, 取代不同晶位上 Fe<sup>3+</sup> 离子能够有效调控 BaM 铁氧体的磁性质. 在过去的许多年中, 大量的金属离子被用来取代 Ba<sup>2+</sup> 或 Fe<sup>3+</sup> 或共同取代 Ba<sup>2+</sup>-Fe<sup>3+</sup>, 例如 Zn<sup>[6]</sup>、La<sup>[7-8]</sup>、Ce<sup>[9]</sup>、Y<sup>[10]</sup>、Sc<sup>[11]</sup>、Ga<sup>[12]</sup>、Cu-Mn<sup>[13]</sup>、Zn-Ti<sup>[14]</sup>、Co-Ti<sup>[15-16]</sup>、Co-Si<sup>[17]</sup>、La-Zn<sup>[18]</sup>、Ce-Co<sup>[19]</sup> 等用以改善 BaM 的磁性质.

众所周知, 材料的制备及合成方法在其结构和

物性方面扮演着极其至关重要的作用. 传统的陶瓷烧结法常以氧化铁和碳酸钡为原料制备单相的 BaM 铁氧体, 要求烧结温度大于 1 200 °C, 但过高的烧结温度会导致多畴颗粒的形成, 同时造成颗粒间的严重团聚, 因此不适合于高密度存储领域方面的应用<sup>[17-20]</sup>. 为了优化 BaM 铁氧体的微结构及性能, 其他一些溶液法相继被用来合成 M 型铁氧体, 例如溶胶凝胶法<sup>[4]</sup>、水热/溶剂热法<sup>[15-21]</sup>、共沉淀法<sup>[19]</sup>、静电纺丝技术<sup>[7]</sup>. 水热法/溶剂热法由于其独特的优势, 既不需要昂贵的原材料也不要求过高的烧结温度, 在控制纳米材料微结构和性能方面受到科学家广泛地关注. 然而, 通过该类方法制备的 BaM 铁氧体的磁性比较差, 室温饱和磁化强度一般远远低于体相<sup>[21-22]</sup>.

目前为止, 关于溶剂热法制备 La-Co 共掺杂 BaM 系列样品的微结构及磁性能方面的系统研究工作还比较罕见. 在本研究工作中, 成功合成了 La-Co 共掺杂 BaM 系列样品, 同时 La-Co 的掺杂量能够有效调控体系的室温饱和磁化强度和矫顽力. 该实验结果预示了低掺杂 La-Co 含量的 BaM 样品在高密度磁存储领域具有潜在的应用前景.

收稿日期: 2019-04-17

基金项目: 安徽省高校自然科学基金(KJ2018A0393, KJ2016SD53) 和安徽省自然科学基金(1908085QA36) 资助项目.

作者简介: 张 敏(1988-), 女, 安徽亳州人, 副教授, 博士, 主要从事磁性功能材料研究. E-mail: zmin@mail.ustc.edu.cn

## 1 实验

### 1.1 La-Co 共掺杂体系的制备

采用溶剂热法合成  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0, 0.10, 0.15, 0.20$  和  $0.25$ ) 系列纳米材料样品. 实验中所用原材料均为分析纯. 制备过程中为了获得单相的 BaM 铁氧体样品, 保持化学计量比  $\text{Ba}/(\text{Fe} + \text{La-Co}) = 1/8$ . 称取  $0.13 \text{ g Ba}(\text{NO}_3)_2$  (99.5%)、 $1.64 \text{ g Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (98.5%) 和  $1.08 \text{ g NaOH}$  (96%) 原材料溶于  $50 \text{ mL}$  的乙二醇溶剂中, 常温下搅拌  $60 \text{ min}$ . 然后把混合物转移到容积为  $70 \text{ mL}$  的高压釜中, 封闭好后放入烘箱里  $220^\circ\text{C}$  保温  $24 \text{ h}$ . 自然冷却到室温后, 取出离心分离, 用去离子水和无水乙醇各洗 3 次, 放入烘箱  $80^\circ\text{C}$  干燥. 干燥后的粉末放于箱式炉中  $450^\circ\text{C}$  预烧保温  $5 \text{ h}$ , 最后将预烧好的样品在  $900^\circ\text{C}$  烧结  $6 \text{ h}$ . La-Co 共掺杂样品的制备采取与 BaM 相同的制备方法. 例如合成  $\text{Ba}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_{19}$  样品, 需称取  $0.118 0 \text{ g Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 $0.017 2 \text{ g La}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  (99.9%)、 $1.627 0 \text{ g Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  和  $0.008 0 \text{ g Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (99.5%) 溶于  $50 \text{ mL}$  的乙二醇中.

### 1.2 样品的性能及表征

样品结构表征采用全自动 X-射线衍射仪 (XRD, PHILIPS,  $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 0.154 06 \text{ nm}$ ). 利用场发射扫描电子显微镜 (FESEM, FEI Sirion 200) 观察样品的形貌和微粒尺寸. 样品的磁性质用超导量子干涉仪 (SQUID, MPMS-5T) 测量.

表 1  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  的晶粒尺寸 ( $D$ )、晶格常数 ( $a$ 、 $c$ )、饱和磁化强度 ( $M_s$ )、剩余磁化强度 ( $M_r$ ) 和矫顽力 ( $H_c$ )

样品	$D/\text{nm}$	$a/\text{nm}$	$c/\text{nm}$	$c/a$	$M_s/(\text{emu} \cdot \text{g}^{-1})$	$M_r/(\text{emu} \cdot \text{g}^{-1})$	$H_c/\text{Oe}$
$x = 0$	55	0.589 6	2.321 6	3.938	74.8	36.3	5 409
$x = 0.10$	41	0.589 7	2.322 0	3.938	71.9	35.5	5 831
$x = 0.15$	38	0.589 4	2.321 5	3.939	64.9	31.4	4 705
$x = 0.25$	36	0.589 3	2.321 3	3.939	63.4	30.3	4 316

图 2 给出了代表性样品  $x = 0.1$  的室温 XRD 的 Rietveld 精修拟合结果. 来自 Rietveld 拟合过程, 获得了参数  $R_p$ 、 $R_{wp}$  和  $\chi^2$  的值. 对于一个最佳的理想拟合结果来说, 常常要求  $\chi^2$  的值应接近于数值 1<sup>[24]</sup>. 对于样品  $x = 0.1$  来说, 其  $\chi^2 = 1.8$  (接近于 1), 这意味着样品的实验谱与计算谱有着较好的吻合, 且没有检测出其他的杂相. 因此, 拟合结果揭示成功合成了低共掺杂 La-Co 含量的单相 M 型 BaM 铁氧体系列样品, 同时也说明 La 和 Co 离子可能进

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 结构表征及其机理分析

图 1 给出了  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0, 0.10, 0.15, 0.20$  和  $0.25$ ) 多晶样品的室温 X-射线衍射 (XRD) 图谱. XRD 谱表明: 当 La 和 Co 掺杂量小于  $0.15$  时, 所有样品是单相的. 当 La 和 Co 掺杂量大于  $0.15$  时, 出现了少量的杂相  $\text{LaFeO}_3$ , 这意味着 La 和 Co 离子在  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  体系材料中的共掺杂极限是  $0.15$ . 与先前用 Ni 和 Ti 共掺杂的 BaM 铁氧体的研究结果相比<sup>[23]</sup>, La 和 Co 离子只能掺杂较少的量, 进入到六角铁氧体的晶体结构, 这主要是由掺杂金属离子的半径所决定的. 所有合成样品的晶格常数均由 Rietveld 精修得到, 在表 1 中列出. 当掺杂量  $x = 0.1$  时, 样品的晶格常数值变大, 这主要因为掺杂离子的  $\text{La}^{3+}$  和  $\text{Co}^{2+}$  半径比  $\text{Ba}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  离子半径大的原因. 但是继续增大 La-Co 的掺杂含量, 晶格常数反而减小, 这主要是由于此时样品中出现了第 2 相  $\text{LaFeO}_3$  (图 1 中 “\*” 标记), 杂相的出现可能导致晶格常数的减小.

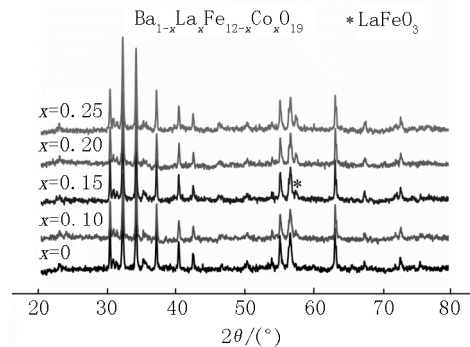


图 1  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0, 0.10, 0.15, 0.20$  和  $0.25$ ) 的室温 XRD 谱

入了 M 型铁氧体相应的晶体位置.

图 3 给出了  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0, 0.10, 0.15$  和  $0.25$ ) 多晶样品 SEM 图谱. 类似于 Ni-Ti 掺杂的 BaM 铁氧体样品<sup>[23]</sup>, 样品的微粒尺寸比较均匀, 集中分布在  $100 \sim 200 \text{ nm}$  之间. 在低掺杂量时, 样品呈现明显的片状六角结构, 并具有良好的分散性, 其表面形貌优于其他课题组制备的 BaM 铁氧体样品<sup>[15]</sup>. 但是随着掺杂浓度的升高, 样品的六角形貌变得不明显, 且颗粒出现了明显的团聚, 这可能是

因为第2相LaFeO<sub>3</sub>的出现导致了样品团聚的加重。

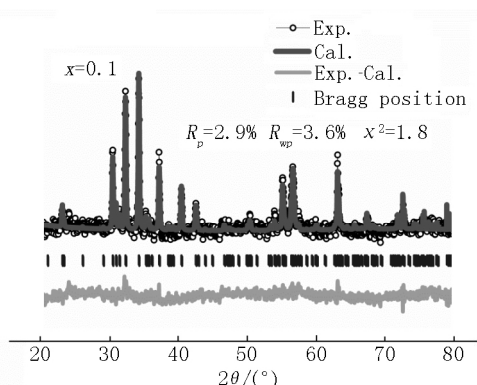
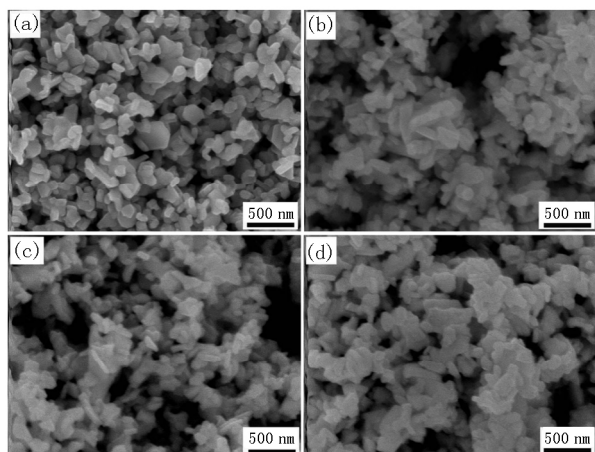


图2 样品 $x=0.1$ 的室温XRD的Rietveld拟合效果



(a)  $x=0$  (b)  $x=0.10$  (c)  $x=0.15$  (d)  $x=0.25$ .

图3 Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub>的SEM图谱

## 2.2 磁性能及其机理分析

图4给出了Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0, 0.10, 0.15$ 和 $0.25$ )多晶样品的室温磁化曲线。所有的样品均表现出明显的磁滞行为,具有亚铁磁性。由表1看出,随着La和Co掺杂量的变大,样品的磁化强度 $M_s$ 单调减小,这可能归因于La-Co的替代削弱了晶体中四面体间隙和八面体间隙之间的超交换相互作用。根据Gorter模式<sup>[25]</sup>,Fe<sup>3+</sup>被分布在5个不同的间隙位置:3个自旋向上( $2a$ 、 $12k$ 、 $2b$ )、2个自旋向下( $4f_1$ 和 $4f_2$ )。La<sup>3+</sup>替代Ba<sup>2+</sup>将会导致Fe<sup>3+</sup>不平衡地分布。同时,由于Co<sup>2+</sup>离子的磁矩(约为 $4\mu_B$ )小于Fe<sup>3+</sup>的磁矩(约为 $5\mu_B$ ),Co<sup>2+</sup>离子替代Fe<sup>3+</sup>将会削弱S层中四面体( $4f_1$ )间隙和八面体( $4f_2$ )间隙的Fe<sup>3+</sup>之间的超交换作用。由图4可知,当 $x=0.15$ 时, $M_s$ 出现了明显的降低,因为随着掺杂浓度的继续增大,第2相LaFeO<sub>3</sub>的出现也会明显减弱样品的磁性。这里,饱和磁化强度的变化规律(见图5)与文献研究结果类似<sup>[19-26]</sup>。

图5给出了样品的矫顽力 $H_c$ 的变化规律,从图

5看出,在低掺杂浓度时( $x \leq 0.1$ ), $H_c$ 不断增大,当掺杂浓度 $x=0.1$ 时,矫顽力达到最大值为5831 Oe。当掺杂量继续增大后, $H_c$ 单调减小。在M型铁氧体系统中, $H_c$ 随着La-Co掺杂量的变化可以被解释为无序微粒系统的矫顽力<sup>[27]</sup>,可以被表达为

$$H_c = 0.64K_1/M_s, \quad (1)$$

其中 $K_1$ 是磁晶各向异性常数, $M_s$ 是饱和磁化强度。在实验中,采用强平面磁性的Co<sup>2+</sup>离子取代Fe<sup>3+</sup>将会导致磁晶各项异性常数 $K_1$ 的增大。增大的磁晶各项异性常数可能会提高样品的本征矫顽力。根据(1)式, $H_c$ 与 $M_s$ 成反比,当 $x < 0.15$ 时,由于Co<sup>2+</sup>离子掺杂导致的磁晶各项异性常数 $K_1$ 的增大和饱和磁化强度的降低,导致 $H_c$ 变大。然而,当 $x \geq 0.15$ 时,过量的Co<sup>2+</sup>离子将会破坏Fe<sup>3+</sup>的规则排列,削弱金属离子间的超交换作用,从而导致 $H_c$ 减小。另外,第2相LaFeO<sub>3</sub>的出现也可能削弱材料的矫顽力大小。

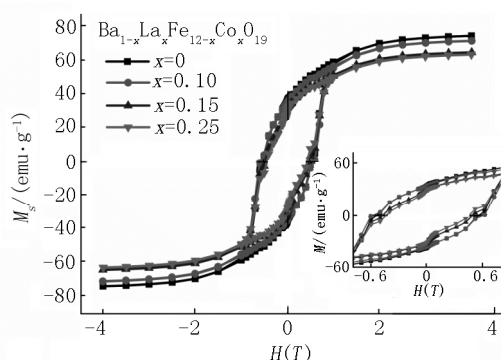


图4 Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0, 0.10, 0.15$ 和 $0.25$ )的室温磁化曲线;右下插图是低场下放大的磁化曲线

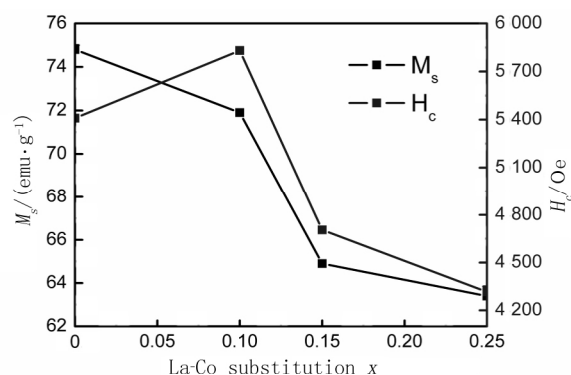


图5 Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0, 0.10, 0.15$ 和 $0.25$ )的磁化强度和矫顽力值的变化趋势

## 3 结论

用溶剂热法以及后烧结热处理成功合成了La-Co共掺杂的BaM系列纳米材料样品。在低掺杂La-

Co 含量时,获得了分散性良好、尺寸均匀分布、具六角结构的铁氧体样品.但随着掺杂浓度的增大,样品六角形貌变得逐渐模糊,且颗粒出现明显的团聚,这可能源于第 2 相  $\text{LaFeO}_3$  的出现.通过控制  $\text{La}^{3+}$  和  $\text{Co}^{2+}$  离子的共掺杂浓度,实现了 BaM 纳米材料磁性能的可调节性.具体表现为 La-Co 掺杂提高了样品的矫顽力,同时又不会恶化样品的饱和磁化强度,预示着该类材料在高密度磁存储方面具有潜在的应用价值.

#### 4 参考文献

- [1] Zhao Liang, Lü Xiaoxia, Wei Yanshi, et al. Hydrothermal synthesis of pure  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  hexaferrite nanoplatelets under high alkaline system [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2013, 332: 44-47.
- [2] Cao Liangliang, Zeng Yanwei, Ding Chuan, et al. One-step synthesis of single phase micro-sized  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  hexaplates via a modified hydrothermal approach [J]. *Materials Chemistry and Physics* 2016, 184: 241-249.
- [3] Sözeri H. Effect of pelletization on magnetic properties of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  [J]. *Journal of Alloys and Compounds* 2009, 486: 809-814.
- [4] Mu Guohong, Chen Na, Pan Xefeng, et al. Microwave absorption properties of hollow microsphere/titania/M-type Ba ferrite nanocomposites [J]. *Applied Physics Letters*, 2007 91: 43110.
- [5] Zhao Tingkai, Ji Xianglin, Jin Wenbo, et al. Electromagnetic wave absorbing properties of aligned amorphous carbon nanotube/ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanorod composite [J]. *Journal of Alloys and Compounds* 2017, 703: 424-430.
- [6] Amir M, Sözeri H, Korkmaz A D, et al. Concentration and temperature-dependent magnetic properties of  $\text{Ba}_{1-x} \cdot \text{Zn}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  hexaferrites [J]. *Ceramics International*, 2018 44: 988-992.
- [7] Li Congju, Wang Bin, Wang Jiaona. Magnetic and microwave absorbing properties of electrospun  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  nanofibers [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2012, 324: 1305-1311.
- [8] Kumar S, Kumar Manglam M, Supriya S, et al. Lattice strain mediated dielectric and magnetic properties in La doped barium hexaferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2019, 473: 312-319.
- [9] Pawar R A, Desai S S, Tamboli Q Y, et al.  $\text{Ce}^{3+}$  incorporated structural and magnetic properties of M-type barium hexaferrites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2015, 378: 59-63.
- [10] Topkaya R, Auwal I, Baykal A. Effect of temperature on magnetic properties of  $\text{BaY}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  hexaferrites [J]. *Ceramics International* 2016, 42: 16296-16302.
- [11] Zhang Weihua, Zhu Qishan, Tang Rujun, et al. Temperature dependent magnetic properties of conical magnetic structure M-type hexaferrites  $\text{BaFe}_{10.2}\text{Sc}_{1.8}\text{O}_{19}$  and  $\text{SrFe}_{10.2}\text{Sc}_{1.8}\text{O}_{19}$  [J]. *Journal of Alloys and Compounds* 2018, 750: 368-374.
- [12] Trukhanov A V, Kostishyn V G, Panina L V, et al. Magnetic properties and Mössbauer study of gallium doped M-type barium hexaferrites [J]. *Ceramics International*, 2017 43: 12822-12827.
- [13] Baykal A, Güngüneş H, Sözeri H, et al. Magnetic properties and Mössbauer spectroscopy of Cu-Mn substituted  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  hexaferrites [J]. *Ceramics International* 2017, 43: 15486-15492.
- [14] González-Angeles A, Mendoza-Suarez G, Grusková A, et al. Magnetic studies of Zn-Ti-substituted barium hexaferrites prepared by mechanical milling [J]. *Materials Letters* 2005, 59: 26-31.
- [15] Du Lei, Du Yunchen, Li You, et al. Surfactant-assisted solvothermal synthesis of  $\text{Ba}(\text{CoTi})_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$  nanoparticles and enhancement in microwave absorption properties of polyaniline [J]. *Journal of Physical Chemistry C* 2010, 114: 19600-19606.
- [16] The G B, Saravanan N, Jefferson D A. A study of magnetoplumbite-type (M-type) cobalt-titanium-substituted barium ferrite  $\text{BaCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19}$  ( $x = 1 \sim 6$ ) [J]. *Materials Chemistry and Physics* 2007, 105: 253-259.
- [17] Abbas S M, Chatterjee R, Dixit A K, et al. Electromagnetic and microwave absorption properties of ( $\text{Co}^{2+}-\text{Si}^{4+}$ ) substituted barium hexaferrites and its polymer composite [J]. *Journal of Applied Physics* 2007, 101: 074105.
- [18] Hua Zhihua, Li Shaozheng, Han Zhengdong, et al. The effect of La-Zn substitution on the microstructure and magnetic properties of barium ferrites [J]. *Materials Science and Engineering: A* 2007, 448: 326-329.
- [19] Zi Zhenfa, Liu Qiangchun, Dai Jianming, et al. Effects of Ce-Co substitution on the magnetic properties of M-type barium hexaferrites [J]. *Solid State Communications*, 2012, 152: 894-897.
- [20] Ghasemi A, Hossienpour A, Morisako A, et al. Electromagnetic properties and microwave absorbing characteristics of doped barium hexaferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2006, 302: 429-435.
- [21] Drogenik M, Ban I, Makovec D, et al. The hydrothermal synthesis of super-paramagnetic barium hexaferrite parti-

- cles [J]. Materials Chemistry Physics ,2011 ,127: 415–419.
- [22] Duong G V ,Sato Turtelli R ,Thuan B D ,et al. Magnetic properties of nanocrystalline BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> prepared by hydrothermal method [J]. Journal of Non-Crystalline Solids , 2007 ,353: 811–813.
- [23] Zhang Min ,Zi Zhenfa ,Liu Qiangchun ,et al. Solvothermal synthesis and magnetic properties of BaFe<sub>12-2x</sub>(NiTi)<sub>x</sub>O<sub>19</sub> nanoparticles [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2014 ,369: 23–26.
- [24] Ashima ,Sanghi S ,Agarwal A ,et al. Rietveld refinement , electrical properties and magnetic characteristics of Ca-Sr substituted barium hexaferrites [J]. Journal of Alloys and Compounds 2012 ,513: 436–444.
- [25] K pferling M ,Nov k P ,Kn  ek K ,et al. Magnetism in La substituted Sr hexaferrite [J]. Journal of Applied Physics , 2005 ,97: 10F309–10F311.
- [26] Kikuchi T ,Nakamura T ,Yamasaki T ,et al. Magnetic properties of La-Co substituted M-type strontium hexaferrites prepared by polymerizable complex method [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials ,2010 ,322: 2381–2385.
- [27] Qiu Jianxun ,Gu Mingyuan ,Shen Haigen. Microwave absorption properties of Al- and Cr-substituted M-type barium hexaferrite [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2005 ,295: 263–268.

## The Effect of Co-Doped La and Co on Magnetic Properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> Hexaferrite

ZHANG Min ,ZHU Guangping ,LIU Qiangchun ,LI Qiang ,CUI Chaopeng

( School of Physics and Electronics Information ,Huaibei Normal University ,Huaibei Anhui 235000 ,China)

**Abstract:** The La-Co co-doped Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0, 0.10, 0.15, 0.20$  and  $0.25$ ) hexaferrites are synthesized by the solvothermal method. X-ray diffraction (XRD) analysis reveals that the samples of low-doped concentration are single-phased. As the La-Co substitution increases ,the  $x \geq 0.15$  samples have LaFeO<sub>3</sub> impurity phase. Scanning electron microscope (SEM) is used to show the morphology and particle size. At low substitution level ,the morphology has hexagonal structure in platelet form and good dispersion. With the substitution level increasing ,the shape becomes very irregular with aggregates appreciably. The magnetization measurement shows the value of coercivity is as high as 5 831 Oe for  $x=0.1$  sample with only a little decrease in the saturation magnetization. Both saturation magnetization and coercivity drop with increasing La-Co concentration ,which can be attributed to the effects of La-Co doping and appearance of LaFeO<sub>3</sub>. The results show that La-Co co-doped hexaferrite Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>19</sub> hexaferrite may be potential candidates for application based on high density perpendicular recording technology.

**Key words:** solvothermal method; hexaferrite; La-Co substitution; magnetic properties; coercivity

( 责任编辑: 冉小晓)