

W 型钡铁氧体的研究进展

王潇雅 黄英 吴燕飞 赵阳

(西北工业大学理学院应用化学系,西安 710072)

文 摘 W 型钡铁氧体具有吸波性能好、价格低廉的特点,因此,越来越引起广泛的重视和深入的研究。本文介绍了 W 型钡铁氧体 $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 的主要制备方法,总结了 Me 为不同元素以及稀土离子掺杂时 W 型钡铁氧体的研究现状,展望了 W 型钡铁氧体未来的研究方向。

关键词 W 型钡铁氧体,离子掺杂,吸波性能

Research Progress of W-Type Barium Ferrite

Wang Xiaoya Huang Ying Wu Yanfei Zhao Yang

(Department of Applied Chemistry, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129)

Abstract Since the excellent microwave absorption properties and good cost-effectiveness, W-type barium ferrite has been extensively studied. This paper introduces the main preparation methods of $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ and summarizes the current research status of using different elements as Me and rare earth ions doped W-type barium ferrite. And the research direction of W-type barium ferrite in the future is described.

Key words W-type barium ferrite, Ions doped, Microwave absorption properties

0 引言

W 型钡铁氧体因其独特的电磁性能,一直以来在家用电器、电子产品、通讯设备以及数据处理装置中被广泛应用^[1]。W 型铁氧体具有吸收性能最佳的片状结构、较高的磁晶各向异性等效场及自然共振频率,且在微波频率下仍能保持较高的复磁导率实部(μ')和虚部(μ''),频带宽,被认为是最具有发展前途的铁氧体吸收剂,也是目前国内外众多学者关心的话题。W 型钡铁氧体的一般分子式为 $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$,其中 Me 为 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 等二价离子。通过改变 Me^{2+} , W 型钡铁氧体(BaW)可以成为具有比 M 型钡铁氧体(BaM)更高能量的磁性材料。近几年关于 W 型钡铁氧体的研究主要集中在使用溶胶-凝胶法、化学共沉淀法、传统陶瓷工艺等合成不同离子取代的 W 型钡铁氧体和对这些铁氧体的电磁特性及微波吸

收性能的研究上。

本文介绍了 W 型钡铁氧体 $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 的主要制备方法,总结离子联合取代 Me_2 以及稀土离子掺杂时 W 型钡铁氧体的研究现状,并展望其发展方向。

1 主要制备方法

W 型钡铁氧体的制备方法比较多,已报道的主要有物理法和化学法。物理法的制备工艺过程比较简单,但由于该法所用的原料物性相差大,物料不易完全混合均匀,所得产品性能欠佳,近几年研究者在制备 W 型钡铁氧体过程中更倾向于采用化学法。目前,制备 W 型钡铁氧体的化学方法主要有溶胶-凝胶法^[2-4]、化学共沉淀法^[5-7]、传统陶瓷法^[8-9]、微乳液法、微波高温合成法^[10]以及聚合物吸附燃烧法等,各方法的制备工艺及其特点见表 1。

收稿日期:2011-10-28;修回日期:2011-11-20

基金项目:航天科技创新基金(N9XT0001)

作者简介:王潇雅,1988 年出生,硕士研究生,主要从事吸波材料的研究工作。E-mail: wangxiao901721ya@163.com

表 1 W 型钡铁氧体的主要制备方法

Tab.1 Main preparation methods of W-type barium ferrite

制备方法	制备工艺	特点
溶胶-凝胶法	以无机盐或金属醇盐为前驱体,通过水解缩聚由溶胶逐渐形成凝胶,经过老化、干燥等后处理得到所需材料	所得产品化学均匀性好 ^[11] ,纯度高、粒径小,但易发生团聚现象
化学共沉淀法	向可溶性盐溶液中加入适当沉淀剂,将金属离子均匀沉淀出来,再经过滤、洗涤、干燥、煅烧和热分解得到铁氧体纳米粉体材料	易精确控制粉体成分;可控制粉料粒径分布;烧结温度低;但易引入杂质,效率低,不利于工业化生产
传统陶瓷法	反应物经研磨、成丸、预烧结、冷却、再研磨、再成丸、再烧结等过程得到铁氧体粉末 ^[12]	是合成铁氧体粉末的有效方法之一,但预烧产物发生固相反应时对温度控制要求高 ^[13]
微乳液法	两种互不相溶的溶剂在表面活性剂作用下形成乳液,即形成微型反应器,反应物在其中反应生成固相	可调控纳米颗粒的晶态、形貌等,且合成颗粒的单分散性和界面性较好,但样品粒径受表面活性剂种类的影响大 ^[14] ,且后处理困难,难于得到纯净产物
微波高温合成法	利用微波能量在高温下得到铁氧体粉末	生产过程简单、污染少,反应速度快
聚合物吸附燃烧法 ^[15]	将吸附有各反应物的吸附物在一定温度下经预处理,得到干燥前驱物,前驱物经高温烧结得到铁氧体粉末	所得铁氧体样品粒径小,均匀性好,同时也缓解了团聚现象,但因含吸附物,预处理过程需耗能,且污染较大

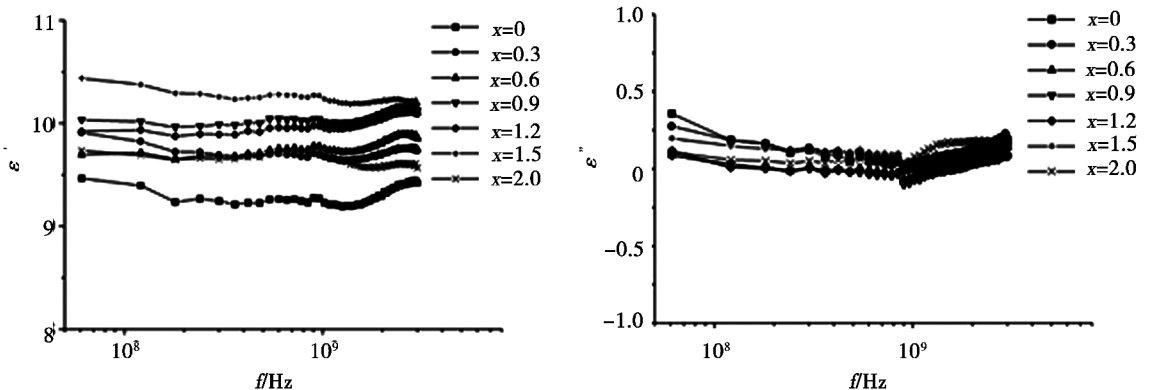
2 离子联合取代

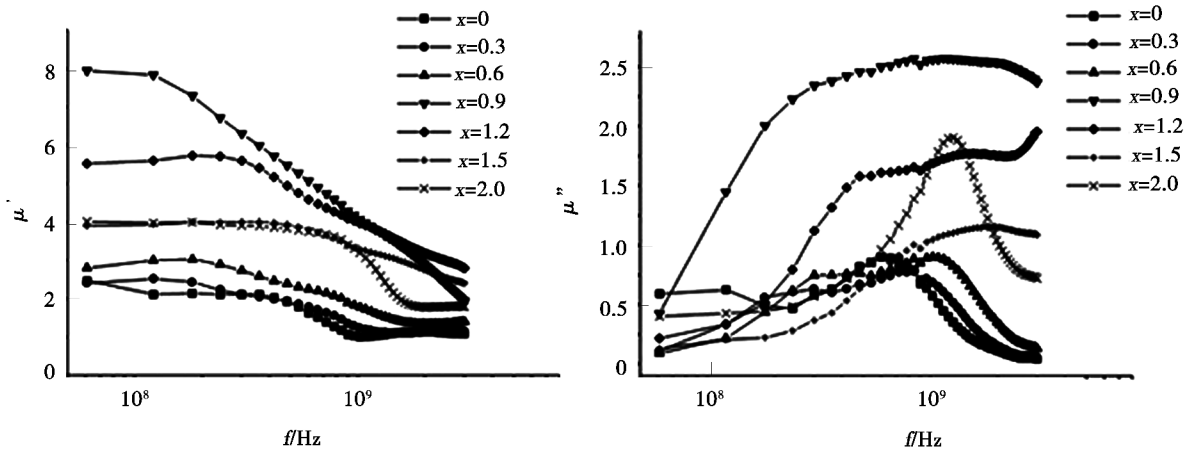
改变 W 型钡铁氧体 $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 中的 Me_2 , W 型钡铁氧体的性能将有所不同。目前研究较多的是 Me_2 为 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子时的铁氧体,其中,以 Zn-Co 组合作为 Me_2 的铁氧体研究的较多。

研究发现,改变 W 型钡铁氧体中 Zn、Co 的掺杂比例,晶体的结构会受到影响。对于 W 型铁氧体样品 $\text{BaZn}_x\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8$), 随着 Zn 掺杂量的增加,Co 含量的降低,晶格参数 a 、 c 均减小,这是由于 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 离子半径不同引起的, Co^{2+} 的离子半径为 0.082 nm ,而 Zn^{2+} 的仅为 0.074 nm ^[16]。

改变 Zn、Co 掺杂比例,在铁氧体晶体结构发生改变的同时,铁氧体样品 $\text{BaZn}_x\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8$) 的磁性能和电磁损耗性能也会受到影响。Z. F. Zi 通过研究,发现随着 Zn 掺杂量的

增加,铁氧体样品的饱和磁化强度 M_s 增加,而矫顽力 H_c 减小:在 $x=1.8$ 时,样品的室温 M_s 达到最大值 92.8 emu/g , H_c 达到最小值 585 Oe ^[17]。这可能是由于二价阳离子 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 较易占据铁氧体 S 块中四面体和八面体的位置,随着非磁性离子 Zn^{2+} 对磁性离子 Co^{2+} 的取代,整个磁矩逐渐增加,四面体与八面体之间的超交互作用逐渐增强,从而导致铁氧体样品的 M_s 增加。研究铁氧体样品 $\text{BaZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x=0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 2.0$) 在 $50 \text{ MHz} \sim 3 \text{ GHz}$ 的电磁损耗规律,发现在 $1200^\circ\text{C}/5 \text{ h}$ 的焙烧条件下,铁氧体样品 $\text{BaZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 的介电损耗因子实部 ϵ' 与虚部 ϵ'' 值以及磁损耗因子实部 μ' 与虚部 μ'' 的值均与 Co^{2+} 的掺杂量 x 有很大关系[图 1(a)、(b)^[18]]; ϵ' 的值在 $x=1.5$ 时最大,在 $x=0$ 时最小; μ' 的值在 $x=0.9$ 时最大,在 $x=0$ 时最小; μ'' 的值在 $x=0.9$ 时较大,而在 $x=1.5$ 和 0 时较小。

(a) 介电损耗因子 ϵ



(b) 磁损耗因子 μ

图 1 1200°C/5 h 时 $\text{BaZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 的损耗因子实部与虚部值随频率的变化曲线^[18]

Fig. 1 Frequency dependence of ε and μ of $\text{BaZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ferrite at 1200°C/5 h

还有学者致力于对 Cd-Sr、Ca₂、Zn-Ni^[19] 等组合取代 W 型钡铁氧体的研究上,但所得铁氧体样品与 Zn-Co 取代的 W 型铁氧体样品的磁性性能相差很多,如 W 型铁氧体样品 $\text{BaCd}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x=0.0, 0.5, 1, 1.5, 2.0$) 室温下的最大 M_s 仅为 14.311 emu/g ($x=2.0$ 时取得)^[20], 样品 $\text{BaCa}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 在室温下的最大 M_s 也仅为 24.601 emu/g^[14], 均较上面提到的 $\text{BaZn}_{1.8}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 样品的室温 M_s 值 92.8 emu/g 小很多,这可能也与制备方法的不同有关。

3 稀土离子掺杂

在研究中发现,与没有进行掺杂的铁氧体吸波材料相比,稀土离子 (RE^{3+}) 掺杂后所得的 W 型铁氧体吸波材料复介电常数更低,并表现出了明显的弛豫现象,同时还具有匹配厚度低、吸收频带宽等优点^[21]。掺杂后的 W 型钡铁氧体之所以具有更好的电磁和吸波性能,这与稀土元素的特殊原子结构有关。稀土元素具有未成对的 4f 电子,它们受 $5s^25p^6$ 壳层的屏蔽,不受邻近原子和离子的影响,因而具有特殊的电磁吸波性能。同时,稀土元素的离子半径比较大,取代部分铁氧体中离子半径小的元素,会使晶格常数变大^[22],出现晶格畸变,从而增加物理活性,提高了介电损耗。

近几年,人们对稀土离子掺杂 W 型钡铁氧体的研究主要集中在用稀土 La、Nd、Er、Sm 等元素对 W 型钡铁氧体 $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 中 Ba 和 Fe 的取代上。

3.1 Ba^{2+} 被取代

3.1.1 La 掺杂

掺杂稀土 La^{3+} 的 W 型钡铁氧体,其结构和性能会发生很大的变化。对于 W 型钡铁氧体样品 $\text{BaCo}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 进行 La^{3+} 取代 Ba^{2+} 的研究,发现掺杂 La^{3+} 后会使铁氧体的晶格发生畸变,而且 La^{3+} 的掺杂量越多,

晶格畸变越严重,这将导致掺杂 La^{3+} 的钡铁氧体的 W 相形成温度升高^[23]。

研究铁氧体样品 $\text{Ba}_{0.7}\text{La}_{0.3}\text{Co}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 在 12.4 ~ 18 GHz 的电磁性能,发现掺杂 La^{3+} 后的铁氧体其 ε' 和 ε'' 均变大^[4],即介电性能提高。由电介质物理学相关理论可知^[24],这与固有电偶极子极化和界面极化有关。 La^{3+} 取代 Ba^{2+} 后,为保持电荷中性,W 型钡铁氧体结构中一些 Fe^{3+} 转变为 Fe^{2+} ,电子在 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 之间转移,导致介电损耗增加,且由于 Fe^{2+} 更易被极化,过多的 Fe^{2+} 还会加剧铁氧体样品的界面极化,同时, La^{3+} 的离子半径与结构中其他阳离子半径不同,这还会形成附加固有电矩,这些都是导致介电常数增大的因素。然而与未掺杂 La^{3+} 的样品相比,掺杂 La^{3+} 后, $\text{Ba}_{0.7}\text{La}_{0.3}\text{Co}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 的 μ' 和 μ'' 值均变小,且因畴壁共振而产生的 μ'' 峰值向高频移动,由 12.9 移至 13.9 GHz,这可能是由加强了的有效各向异性场引起的。

掺杂 La^{3+} 后的 W 型钡铁氧体虽然复磁导率降低了,但其介电性能却提高了,而且 W 型钡铁氧体的吸波性能是介电损耗和磁损耗共同决定的。研究发现,对 W 型钡铁氧体进行 La^{3+} 掺杂,其吸波性能得到提高^[24],样品 $\text{Ba}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Co}_{0.9}\text{Zn}_{1.1}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 在 2 ~ 18 GHz 的反射损失 (RL) 峰值达 -39.6 dB,带宽约为 8 GHz,而 $\text{BaCo}_{0.9}\text{Zn}_{1.1}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 反射损失的峰值仅为 -33.4 dB。

3.1.2 Nd 掺杂

研究 Nd^{3+} 掺杂的 W 型钡铁氧体,发现 Nd^{3+} 的掺杂量不仅会影响铁氧体的晶体结构,还对铁氧体的电磁性能有较大影响。吉林大学的 Xu Jijing 等^[25] 用溶胶-凝胶法合成了系列 W 型钡铁氧体 $\text{Ba}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Co}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x=0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$)。结果表明,形成单一 W 相时, Nd^{3+} 的最大掺杂浓度为 $x=0.25$,且掺杂 Nd^{3+} 后铁氧体的晶格常数 c 略微变

小,这是因 Nd^{3+} 的离子半径比 Ba^{2+} 离子半径小的缘故。观察铁氧体的形貌,发现掺杂后的样品粒径变小,平均粒径达 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$,晶体比较完美。同时还发现掺杂后 $\text{Ba}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Co}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 的 ε' 和 ε'' 值均增加, μ' 减小,这与稀土 La^{3+} 取代 Ba^{2+} 的结论一致,但 μ'' 却增加了,这是因为掺杂 Nd^{3+} 后铁氧体的 M_s 增加了,同时因掺杂导致的晶格畸变产生的内应力也增加了,从而导致 μ'' 增加。

3.1.3 Er 掺杂

Er^{3+} 的离子半径在镧系元素中较小,因此用它取代 W 型钡铁氧体中的 Ba^{2+} 较容易。研究铁氧体 $\text{Ba}_{1-x}\text{Er}_x\text{Zn}_{0.6}\text{Co}_{1.4}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x=0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$), 发现虽然 Nd^{3+} 的离子半径 (0.108 nm) 较 Er^{3+} 的离子半径 (0.096 nm) 大^[1], 但 Er^{3+} 的最大掺杂量却为 $x=0.15$ ^[15], 比前面提到的 Nd^{3+} 掺杂时的最大掺杂量 ($x=0.25$) 小, 这可能是由于不同的 Me_2 导致晶体结构差异造成的。与 La^{3+} 和 Nd^{3+} 掺杂时类似, 在最大掺杂浓度值 $x=0.15$ 以下, $\text{Ba}_{1-x}\text{Er}_x\text{Zn}_{0.6}\text{Co}_{1.4}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 的 ε' 、 ε'' 和 μ'' 均随 Er^{3+} 取代浓度的增加而增加, 但在 $x \geq 0.15$ 后, ε' 、 ε'' 以及 μ'' 的值却随 Er^{3+} 取代浓度的增加略微降低, 这是因为过多 Er^{3+} 掺杂导致晶格畸变和杂相的产生, 使电子分散加剧, 导致涡流损耗减小, 因此 ε' 和 ε'' 值减小, 而 μ'' 值减小是因为过量 Er^{3+} 取代导致的晶格畸变影响了 $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ 和 $\text{Er}^{3+}-\text{O}^{2-}$ 之间超交互作用的距离和角度, 从而导致了 μ'' 值减小。掺杂 Er^{3+} 后, 铁氧体样品对电磁能的储存和损耗能力均有提高, 这说明, 掺杂 Er^{3+} 后, W 型钡铁氧体的吸波性能提高了。

3.1.4 Sm 掺杂

对 W 型钡铁氧体进行稀土 Sm^{3+} 离子取代 Ba^{2+} 的研究, 研究者用传统固相反应法合成了系列 W 型钡铁氧体 $\text{Ba}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Co}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ($x=0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$)^[26], 研究样品的结构和形貌特征, 发现形成单一 W 相的 Sm^{3+} 的最大取代浓度为 $x=0.15$, 且掺杂 Sm^{3+} 后, 晶粒尺寸明显减小, 这说明 Sm^{3+} 的存在可能会抑制晶粒的生长。研究还表明, 在 $x \leq 0.15$ 时, 掺杂 Sm^{3+} 的铁氧体其 ε' 和 ε'' 值均较未掺杂 Sm^{3+} 的铁氧体高, 且随着 Sm^{3+} 掺杂浓度的增大, ε' 和 ε'' 的最大值均向低频移动。这说明掺杂后铁氧体对电磁能的储存能力提高了。

除了对用以上几种稀土元素取代 W 型钡铁氧体中的 Ba^{2+} 有研究外, 还有学者选择用 Gd^{3+} ^[2]、 Y^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Ce^{3+} ^[1,21] 等稀土离子取代 Ba^{2+} , 研究结果均表明, 掺杂稀土离子后的 W 型钡铁氧体其电磁吸波性能明显提高, 这也许就是众学者对稀土离子取代 Ba^{2+} 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 1 期

这方面研究感兴趣的原因。

3.2 Fe^{3+} 被取代

有关 Fe^{3+} 被取代的报道要比 Ba^{2+} 被取代的报道少些, 但通过某些元素 (主要是稀土元素) 取代钡铁氧体中的 Fe^{3+} , W 型钡铁氧体的物理结构和电磁吸波性能均能得到提高。研究铁氧体 $\text{BaZn}_2\text{La}_x\text{Fe}_{16-x}\text{O}_{27}$ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$)^[22], 发现 La^{3+} 取代 Fe^{3+} 后, 铁氧体的晶格参数 a 、 c 均变大, 这是因为随着 Fe^{3+} 从八面体位置迁到四面体的 A 位, La^{3+} 占据八面体位置造成的。随着 La^{3+} 掺杂浓度的增加, 样品的 M_s 和剩余磁化强度 M_r 也增加, 这可能与 La^{3+} 和 Fe^{3+} 的离子半径不同有关, 离子半径不同, 导致局部应力产生, 从而引起局域电子态混乱和变形, 因而 M_s 和 M_r 增加。同时在 Fe^{3+} 被 La^{3+} 取代后, 研究铁氧体的电阻率, 发现铁氧体的室温电阻率随 La^{3+} 掺杂浓度的增加而增加, 最高达 $8.42 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, 掺杂 La^{3+} 后的铁氧体可用于高频领域。

之前有研究结果表明, 对于 W 型钡铁氧体 $\text{Ba}(\text{MnZn})_{0.3}\text{Co}_{1.4}\text{R}_{0.01}\text{Fe}_{15.99}\text{O}_{27}$ ($\text{R}=\text{Dy}, \text{Nd}, \text{Pr}$), 只有在稀土离子的磁矩 $n_B(\text{RE}^{3+})$ 大于 Fe^{3+} 的磁矩 $n_B(\text{Fe}^{3+})$ 时, RE^{3+} 取代后的铁氧体对电磁波的反射能力才能提高^[5], Pr^{3+} 的磁矩 $n_B(\text{Pr}^{3+})=3.58 \mu_B$, Fe^{3+} 的磁矩 $n_B(\text{Fe}^{3+})=5.92 \mu_B$, 若按此推论, 掺杂 Pr^{3+} 后 W 型钡铁氧体 $\text{BaCoNiPr}_x\text{Fe}_{16-x}\text{O}_{27}$ 的吸波能力应该较未掺杂 Pr^{3+} 前的 W 型钡铁氧体的吸波能力弱, 然而 Wu Yan-fei 等^[27] 通过研究稀土离子 Pr^{3+} 掺杂的 W 型钡铁氧体 $\text{BaCoNiPr}_x\text{Fe}_{16-x}\text{O}_{27}$ ($x=0 \sim 0.20$), 发现掺杂 Pr^{3+} 后, μ'' 增加, 且 ε'' 也随 Pr^{3+} 掺杂浓度的增加而增加, 即掺杂 Pr^{3+} 后, 铁氧体的吸波性能会提高。之所以会出现两种截然相反的结论, 这可能与不同的 Me_2 和稀土离子掺杂量有关。

4 结语

W 型钡铁氧体作为一种低成本、高性能的吸波剂, 是吸波材料未来的发展趋势。但作为吸收剂的 W 型钡铁氧体也存在密度大、居里温度低等缺点, 在高温环境和高频段范围内它们的吸波性能比较差, 因而其应用受到一定的限制。因此, 研究具有质量轻、频带宽、厚度薄、吸附能力强等特性的 W 型钡铁氧体已成为需要。W 型钡铁氧体吸波材料的主要发展方向可能为: (1) 纳米化, 即把 W 型钡铁氧体制成超细粉末, 大大降低其密度, 改变其电、磁、光等物理性能, 从而提高其吸波性能; (2) 制造含大量游离电子的 W 型钡铁氧体或在 W 型钡铁氧体中加入少量放射性物质, 在雷达波作用下, 游离电子做急剧循环运动, 大量消耗电磁能, 从而使 W 型钡铁氧体吸波性能大大提

高;(3)将微米或纳米级 W 型钡铁氧体吸波材料与有机高分子材料(如聚苯胺、聚吡咯等)复合或用有机高分子材料包裹,这样可降低密度,同时所制材料兼具电损耗和磁损耗性能,W 型钡铁氧体的吸波性能得到提高;(4)将 W 型钡铁氧体通过改变化学组成、粒径分布、粒子形状、混合量和表面处理技术等来提高其吸波性能,如对 W 型钡铁氧体进行元素掺杂等。

参考文献

[1] Ahmeda M A, Okashab N, Kershi R M. Extraordinary role of rare-earth elements on the transport properties of barium W-type hexaferrite [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 113:196-201

[2] Huang Xiaogua, Chen Jiao, Wang Lixi. Electromagnetic and microwave absorbing properties of W-type barium ferrite doped with Gd^{3+} [J]. *Rare Metals*, 2011, 30(1):44-48

[3] Gong Jian, Xu Guangliang, Li Yangxing. Preparation of Co_2W type hexagonal ferrite used in the load side of isolator [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 687:151-157

[4] Shen Guozhu, Xu Zheng, Li Yi. Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on W-type La-doped ferrite and carbon ber composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, 301:325-330

[5] Wang Jing, Zhang Hong, Bai Shuxin. Microwave absorbing properties of rare-earth elements substituted W-type barium ferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 312:310-313

[6] Muhammad Javed Iqbal, Rafaqat Ali Khan, Shigemi Mizukami. Tailoring of structural, electrical and magnetic properties of $BaCo_2$ W-type hexaferrites by doping with Zr-Mn binary mixtures for useful applications [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323:2137-2144

[7] Aen F, Niazi S B, Islama M U. Effect of holmium on the magnetic and electrical properties of barium based W-type hexagonal ferrites [J]. *Ceramics International*, 2011, 37:1725-1729

[8] Feng Y B, Qiu T, Shen C Y. Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on carbonyl iron and barium ferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 318:8-13

[9] Li Z W, Yang Z H, Kong L B. Resonancelike dispersion for W-type barium ferrite composites with c-axis anisotropy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109:033916

[10] Victor Nicoara, Iulian Stefan. Researches regarding the barium W ferrite pyrosynthesis by microwave heating [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 672:323-326

[11] asko A P, Mazaleyrat F, oBue M L. Magnetic and structural characterization of nanosized $BaCo_xZn_{2-x}Fe_{16}O_{27}$ hexaferrite in the vicinity of spin reorientation transition [J]. *Journal of Physics*, 2011, 303:012045

[12] Ahmed M A, Okasha N, Oaf M. The role of Mg substitution on the microstructure and magnetic properties of Ba Co Zn W-type hexagonal ferrites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 314:128-134

[13] Pasko A, Mazaleyrat F, LoBue M. Magnetic and structural characterization of nanosized $BaCo_xZn_{2-x}Fe_{16}O_{27}$ hexaferrite in the vicinity of spin reorientation transition [J]. *Journal of Physics*, 2011, 303:012045

[14] Jotania R B, Khomane R B, Chauhan C C. Synthesis and magnetic properties of barium-calcium hexaferrite particles prepared by sol-gel and microemulsion techniques [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320:1095-1101

[15] Huang Xiaogu, Zhang Jing, Wang Hongzhou. Er^{3+} -substituted W-type barium ferrite: preparation and electromagnetic properties [J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28(6):940-943

[16] Hemeda D M, Al-Sharif A, Hemeda O M. Effect of Co substitution on the structural and magnetic properties of Zn - W hexaferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 315:L1-L7

[17] Zi Z F, Dai J M, Liu Q C. Magnetic and microwave absorption properties of W-type $Ba(Zn_xCo_{1-x})_2Fe_{16}O_{27}$ hexaferrite platelets [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109:07E536

[18] Zhang Haijun, Liu Zhichao, Yao Xi. The Synthesis, characterization and microwave properties of ZnCo-substituted W-type barium hexaferrite, from a Sol-Gel precursor [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2003, 27:277-285

[19] Laszlo Trif, Gyula Tolnai, Istvan Sajó. Preparation and characterization of hexagonal W-type barium ferrite nanoparticles [J]. *Progr. Colloid. Polym. Sci.*, 2008, 135:38-43

[20] Murtaza Rai G, Faiza aen, Misbah-ul-Islam. Dielectric and magnetic behavior of $BaCd_{2-x}Sr_xFe_{16}O_{27}$ W-type hexagonal ferrites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011

[21] Ahmeda M A, Okasha N, Kershi R M. Influence of rare-earth ions on the structure and magnetic properties of barium W-type hexaferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320:1146-1150

[22] Mukhtar Ahmad, Faiza Aen, Islama M U. Structural, physical, magnetic and electrical properties of La-substituted W-type hexagonal ferrites [J]. *Ceramics International*, 2011

[23] Li Hongying, Zou Haifeng, Yuan Lanying. Preparation and charactelization of W-type hexaferrite doped with La^{3+} [J]. *Journal of Rare Earths*, 2007, 25:590-595

[24] Deng Lianwen, Ding Li, Zhou Kesheng. Electromagnetic properties and microwave absorption of W-type hexagonal ferrites doped with La^{3+} [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011

[25] Xu Jijing, Zou Haifeng, Li Hongying. Influence of Nd^{3+} substitution on the microstructure and electromagnetic properties of barium W-type hexaferrite [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 490:552-556

[26] Wang Lixi, Song Jie, Zhang Qitu. The microwave magnetic performance of Sm^{3+} doped $BaCo_2Fe_{16}O_{27}$ [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 481:863-866

[27] Wu Yanfei, Huang Ying, Niu Lei. Pr^{3+} -substituted W-type barium ferrite: preparation and electromagnetic properties [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011

(编辑 吴坚)