

离子取代镍基铁氧体的性能及吸波涂层优化设计

刘 渊, 刘祥萱, 王煊军, 张泽洋, 李 茸, 郭 磊

(第二炮兵工程大学 603 教研室, 西安 710025)

摘 要: 在同等实验条件下, 以镍铁氧体为基体, 通过溶胶-凝胶法, 制备二元镍基复合铁氧体 $\text{Ni}_{0.5}\text{A}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($\text{A}=\text{Zn}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu}$)。用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、振动样品磁强计和矢量网络分析仪对粉末的结构及电磁性能进行表征并对其吸波性能进行优化设计。结果表明: 4 种离子取代后均能形成在室温条件下具有超顺磁性的纯净镍基铁氧体粉末。离子取代使铁氧体样品的复介电常数实部 ϵ' 增大, 虚部 ϵ'' 在 2~6 GHz 和 13~18 GHz 变小, 在 6~13 GHz 增大。 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 3 种离子取代样品与未进行离子取代的 NiFe_2O_4 相比, 其复磁导率实部 μ' 变化不大, 而 Co^{2+} 离子取代样品的 μ' 整体要大于其他几种离子取代样品及未取代样品的 μ' ; 在 2~11 GHz 进行 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 3 种离子取代样品的虚部 μ'' 变大, 且以 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的最大, Cu^{2+} 取代样品的虚部 μ'' 与未取代样品的虚部 μ'' 相比变化不大。利用传输线理论优化设计时发现, Co^{2+} 取代后的复合铁氧体没有匹配点, Zn^{2+} 取代后的复合铁氧体匹配效果最好, 在最佳匹配厚度为 5.63 mm 时, 其最小反射率峰值为 -36.26 dB, 小于 -10 dB 的频宽可达 4.7 GHz。

关键词: 镍基铁氧体; 溶胶凝胶法; 离子取代; 磁性能; 优化设计

中图分类号: TB383, TM277

文献标志码: A

Performance of nickel ferrite replaced by different ions and optimization design of absorbing coating

LIU Yuan, LIU Xiang-xuan, WANG Xuan-jun, ZHANG Ze-yang, LI Rong, GUO Lei

(No. 603 Faculty, Xi'an Research Institute of High Technology, Xi'an 710025, China)

Abstract: The binary nickel composite ferrites $\text{Ni}_{0.5}\text{A}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($\text{A}=\text{Zn}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu}$) were prepared under the same condition via sol-gel method. The powder structure and electromagnetic properties were characterized by X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM), vibrating sample magnetometer (VSM) and vector network analyzer, and its absorbing coating was optimized. The results show that the replacement of four kinds of ions can form pure nickel ferrite powders with super paramagnetic at room temperature. After the ions replacement, the real part ϵ' of complex permittivity of the ferrite samples increases, and the imaginary part ϵ'' of complex permittivity of the ferrite samples decreases in 2–6 GHz and 13–18 GHz while increases in 6–13 GHz. The real part μ' of complex permeability of the samples replaced by Zn^{2+} , Mn^{2+} or Cu^{2+} has little change compare with that of NiFe_2O_4 , while μ' of the sample replaced by Co^{2+} is greater than those of other samples whether being replaced or not; the imaginary part μ'' of the samples replaced by Zn^{2+} , Co^{2+} or Mn^{2+} becomes larger in 2–11 GHz, and that of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ is the largest one, that of the sample replaced by Cu^{2+} has little change compared with that of the sample before replacement. It is found by the design of coating optimization that the composite ferrite replaced by Co^{2+} has no match point, and the composite ferrite replaced by Zn^{2+} has the best match point. The minimum microwave reflection loss is -36.26 dB under the match thickness of 5.63 mm, and the bandwidth less than -10 dB can reach 4.7 GHz.

Key words: nickel ferrite; sol-gel method; ion replace; magnetic property; optimization design

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ2007)

收稿日期: 2012-03-22; 修订日期: 2012-07-20

通信作者: 刘祥萱, 教授, 博士; 电话: 029-83348158; E-mail: xiangxuanstudy@sina.cn

吸波材料的研究是军事隐身技术领域中的前沿课题之一, 其目的是最大限度地减少或消除雷达、红外等对目标的探测特征^[1]。当今电子工业迅速发展, 电磁辐射已成为一种新的环境污染, 吸波材料在环保中也有其重要作用^[2-3]。因此, 开展吸波材料研究无论是军事还是民用都有深远意义。

铁氧体材料因其特殊的性质, 对微波具有良好的衰减作用而在隐身技术和电磁波屏蔽领域中获得了广泛的应用^[4-6]。不同的离子取代基与铁氧体复合后, 其复合磁导率和复介电常数均具有可调性, 由此可以优化设计高吸收电磁波能力的新型复合材料。因此, 研究多元复合型铁氧体材料已成为该方面研究的一个发展趋势^[7-8]。

目前, 可以通过改善材料的电磁参数、减小反射系数和涂层匹配厚度来实现铁氧体吸波性能的优化^[9-11]。主要通过不同离子的取代掺杂, 改善铁氧体材料的电磁参数, 以达到提高其吸波性能的目的。不少文献对单个离子取代的镍基铁氧体进行了研究^[12-14], 但是对于不同离子在相同实验条件下取代的镍基铁氧体却较少涉及, 使得无法在同一条件下比较出不同取代基对镍基铁氧体性能的影响。本文作者以镍铁氧体为基体, 制备了 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 4 种不同离子在相同实验条件下取代的二元镍基复合铁氧体 $\text{Ni}_{0.5}\text{A}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($\text{A} = \text{Zn}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu}$), 并对其吸波涂层进行了优化设计, 以期找出一种最好的取代离子, 从而进行下一步的深入研究。

1 实验

1.1 样品制备

按化学计量比 2:0.5:0.5 称取 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{A}(\text{NO}_3)_2$ ($\text{A} = \text{Zn}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu}$) 于烧杯中, 加入 100 mL 去离子水配成溶液, 按物质的量比 $n_{\text{CA}}:n_{\text{Fe}^{3+}}:(n_{\text{Ni}^{2+}} + n_{\text{A}^{2+}}) = 4:2:1$ 向溶液中加入柠檬酸, 搅拌 0.5 h 后形成均一透明橙红色溶液。在不断搅拌下向混合溶液中滴入浓氨水调节溶液至 $\text{pH}=7$, 此时溶液呈墨绿色, 将盛有该溶液的烧杯置于水浴锅中, 在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴条件不断搅拌加热蒸发, 形成黏稠的湿凝胶。将湿凝胶置于恒温干燥箱中, 在 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥至形成干凝胶。将干凝胶置于封闭电炉上加热, 在空气中引燃得到蓬松的前躯体, 最后在高温结炉中于 $1\text{ }200\text{ }^\circ\text{C}$ 下高温煅烧 3 h (升降温速率为 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 降至 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 自然冷却), 得到目标产品粉末。

1.2 粉体表征

采用 X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析, 型号为 Rigaku D/max-2400(Cu 靶, K_α 射线, $\lambda=0.154\text{ }18\text{ nm}$, 靶电压 40 kV , 靶电流 100 mA , 步进扫描, 步长 0.02° , 扫描速率 $15\text{ }^\circ/\text{min}$, 扫描范围 $15^\circ\sim 80^\circ$); 扫描电子显微镜(SEM)研究其形貌及微观组织, 型号为捷克 TESCAN 公司生产的 VEGAII XMU INCN; 采用美国 LakeShore 公司生产的 CDJ-7400 振动样品磁强计对粉体的磁性特征进行测试; 使用 HP-8720ES 矢量网络分析仪, 用同轴法测量电磁参数。样品的制备及测试过程如下: 分别称量所需的基体石蜡和吸波剂粉体样品(质量分数为 60%), 将吸波剂粉体加入到熔融的石蜡中并充分搅拌, 冷却后用研钵研磨, 再熔融搅拌, 冷却研磨, 如此反复 3~4 次; 再加入适量酒精, 在高速乳化机下剪切分散, 然后蒸干研磨成粉末, 压制成外径 $d7\text{ mm}$ 、内径 $d3\text{ mm}$ 、长度 $2\sim 5\text{ mm}$ 的圆形同轴试样。将制作好的样品放入同轴测试夹具中, 使用校准好的 HP8720ES 矢量网络分析仪在 $2\sim 18\text{ GHz}$ 频带对试样进行测试, 扫描频点为 201 点。

2 结果与分析

2.1 X 射线衍射分析

图 1 所示为不同复合铁氧体粉末的 XRD 谱。由图 1 可以看出: 4 个样品的衍射峰均与 NiFe_2O_4 的粉末衍射卡片数据库(JCPDS 71-1269)的特征峰很好地吻合, 没有其他杂质峰出现, 而且所有晶面的衍射峰形尖锐, 相对强度强, 说明此时形成晶体的晶型趋于完整, 生成纯净的 $\text{Ni}_{0.5}\text{A}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉末。

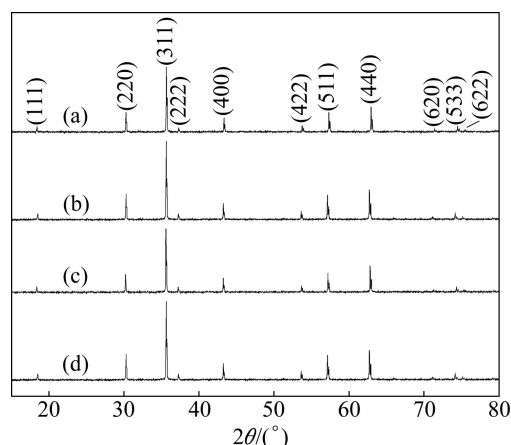


图 1 离子取代复合铁氧体样品的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of composite ferrites replaced by different ions: (a) Cu^{2+} ; (b) Mn^{2+} ; (c) Co^{2+} ; (d) Zn^{2+}

2.2 扫描电镜分析

图2所示分别为不同离子取代复合镍基铁氧体粉末的SEM像。由图2可以看出, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉末和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉末的轮廓比较圆滑, 呈米粒状, 颗粒尺寸大部分在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右。 $\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉末和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粉末的颗粒棱角鲜明, 成多面体形状, 前者颗粒尺寸较大, 在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 后者颗粒尺寸较小, 大部分在 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 少量颗粒超过 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.3 离子取代对样品磁性能的影响

图3所示为不同离子取代复合铁氧体的磁滞回线。由图3可以看出, 4种粉末的剩余磁场强度都几乎接近于零, 说明用溶胶-凝胶法制备的4种复合铁氧体粉末在室温条件下具有超顺磁性。测试得到4种复合铁氧体样品的饱和磁化强度 M_s 由大至小的顺序如下: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, 分别为 77.0 、 61.4 、 59.4 和 $54.4\text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ 。DHO等^[15]研究表明矫顽力与晶体颗粒的形态和晶体缺陷有关。铁氧体粒径的大小和分布直接影响着矫顽力的高低, 4种样品的矫顽力的大小与其平均粒径的大小的关系与理论分析是一致的, 其中 Zn^{2+} 取代所得产物的磁性能最好。

2.4 离子取代对样品电磁参数的影响

图4所示为不同复合铁氧体的复介电常数。由图4可以看出, 离子取代复合铁氧体样品的复介电常数实部 ϵ' 分布于 $3.5\sim 4.1$ 之间, 都大于 NiFe_2O_4 的, 且 ϵ' 由大至小的顺序为 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 。4种样品的复介电常数虚部 ϵ'' 在 $2\sim 6\text{ GHz}$, 都随频率的增加而减小; 在 $6\sim 18\text{ GHz}$ 呈波浪式增大, 总体上以 $\text{Ni}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的最大, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的最小, $\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 和 $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的介于两者之间; 在 $2\sim 6\text{ GHz}$ 和 $13\sim 18\text{ GHz}$ 的4种样品的小于 NiFe_2O_4 的, 在 $6\sim 13\text{ GHz}$ 的4种样品的大于 NiFe_2O_4 的。

样品的介电常数实部 ϵ' 与所制备的样品组成及合成过程有关。几种样品的制备过程基本一致, 可排除过程的影响。当镍基铁氧体掺入其他离子后, 进入A位或者B位, 使得A位 Fe^{3+} 减少, 同时B位 Fe^{2+} 减少, 使尖晶石的晶格结构发生畸变, B位铁离子总数增加, 这样在B位的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 之间的电子交换增强, 从而使得导电性变强, 电阻率下降, 介电常数和介电损耗增加^[16]。

图5所示为不同镍基铁氧体的复磁导率。由图5可以看出, Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 3种离子取代复合铁氧

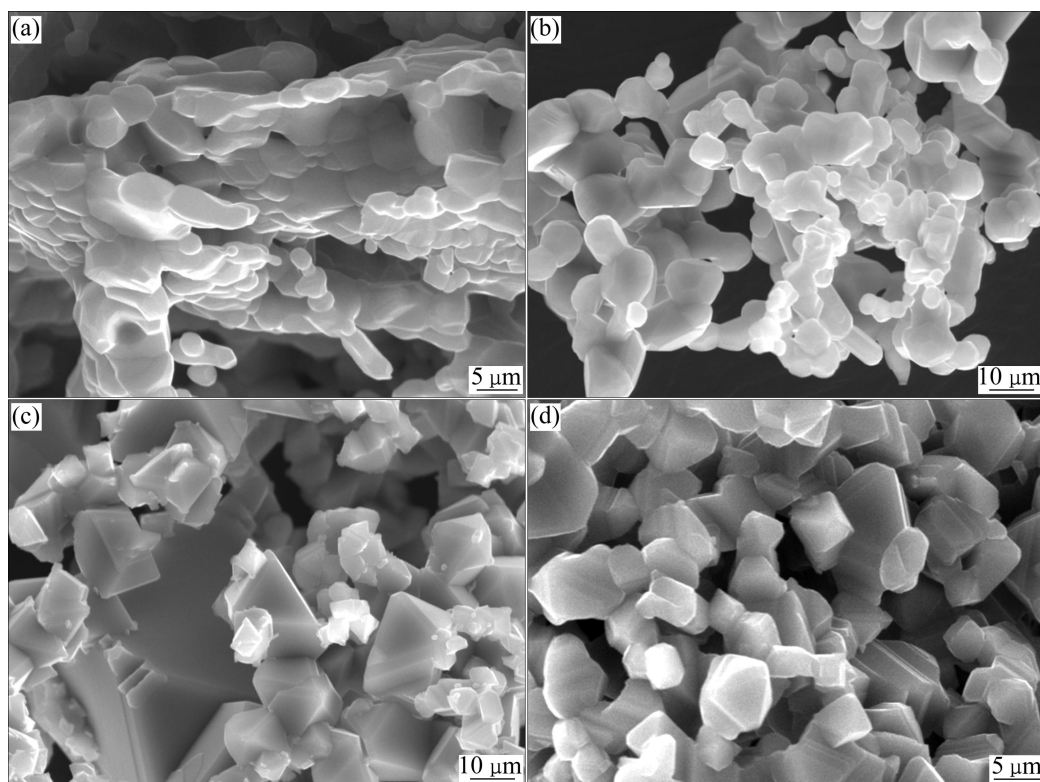


图2 不同离子取代复合铁氧体的SEM像

Fig. 2 SEM images of composite ferrite replaced by different ions: (a) $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (b) $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (c) $\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (d) $\text{Ni}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

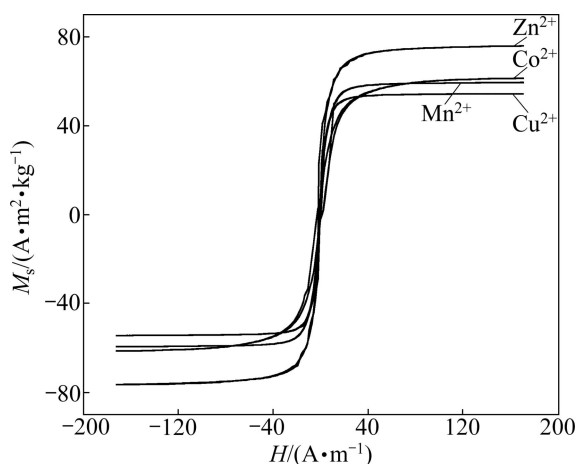


图 3 不同离子取代复合铁氧体的磁滞回线

Fig. 3 Magnetic hysteresis loops of composite ferrite replaced by different ions

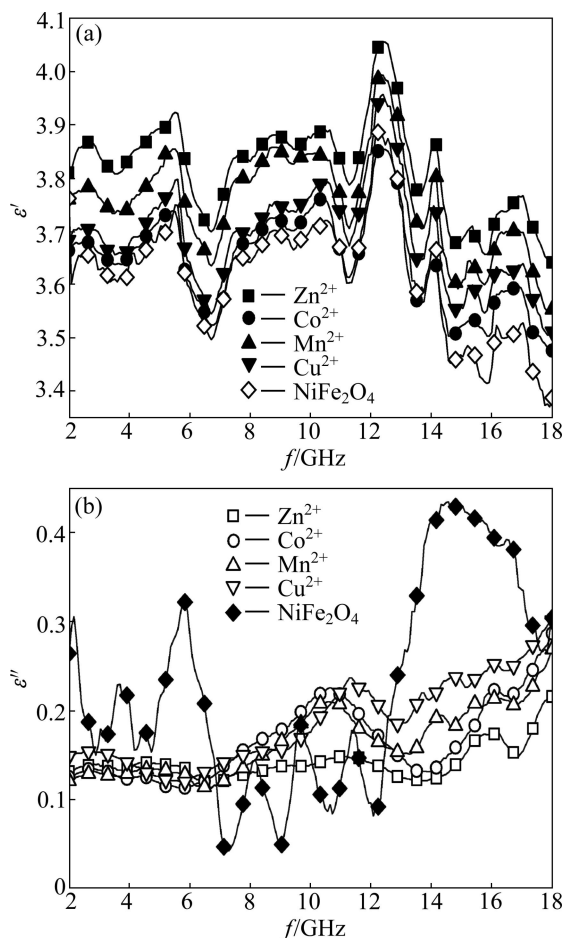


图 4 不同镍基铁氧体的复介电常数

Fig. 4 Complex permittivity of different Ni-ferrites

体与未进行离子取代的 NiFe_2O_4 相比, 其复磁导率实部 μ' 变化不大, 都是在 2~6 GHz 急剧减小, 在 6~18 GHz 逐渐回升, 且回升幅度不大; 而 Co^{2+} 取代复合铁

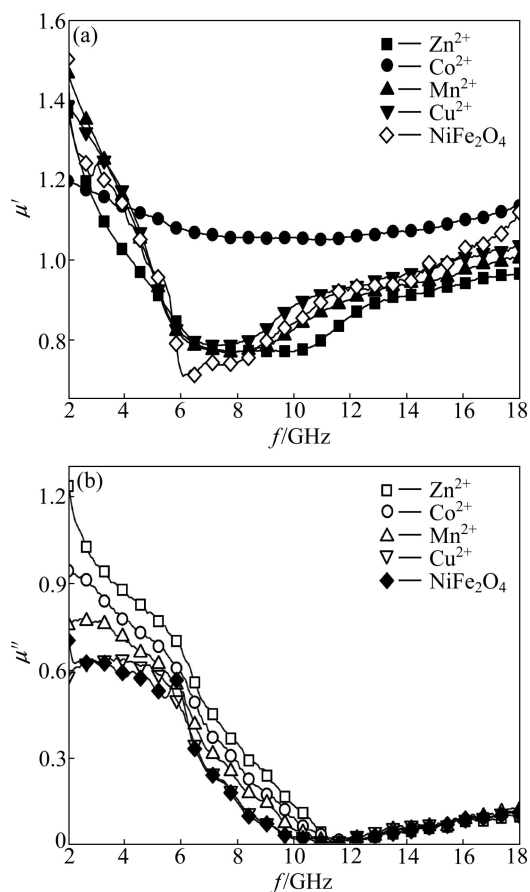


图 5 不同镍基铁氧体的复磁导率

Fig. 5 Permeability of different Ni-ferrites

氧体的复磁导率实部 μ' 随频率的增大的先减小后增大, 分布于 1.05~1.2 之间, 整体要大于其他几种复合铁氧体的。在 2~11 GHz 进行 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 3 种离子取代的复合铁氧体的虚部 μ'' 变大, 且以 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的最大, 最大值达到 1.37; Cu^{2+} 取代复合铁氧体的虚部 μ'' 与未取代时 μ'' 变化不大; 在 11 GHz 左右时几种复合铁氧体的虚部 μ'' 减至最小, 接近于 0, 在 11~18 GHz 所有复合铁氧体的磁导率虚部 μ'' 都有少许回升。

样品的复磁导率实部 μ' 与样品中增加的磁性组分和晶粒尺寸有关。 Co^{2+} 取代 Ni^{2+} 进入铁氧体 B 位, 且 Co^{2+} 和位于 B 位的 Fe^{2+} 的 K_1 值均是正值, 而同在 B 位的 Fe^{3+} 的 K_1 值是负值。由于 Co^{2+} 的 K_1 值很大, 约为 Fe^{2+} 的 200 倍左右, 所以掺入的 Co^{2+} 可以使尖晶石铁氧体负的 K_1 值接近于 0, 从而提高其磁导率^[17]。尖晶石型铁氧体属立方晶系, 自然共振引起的磁损耗 μ'' 与饱和磁化强度 M_s 成正比^[18-19]。由 2.3 节中的结果可知, 4 种离子取代的复合铁氧体的复磁导率虚部以 Zn^{2+} 取代的最大, Cu^{2+} 取代的最小。在测量频率范围

内制备的铁氧体磁谱呈现松弛共振,磁导率随频率的增大呈下降趋势,这是在高频区畴壁共振减小,以自旋共振为主要作用的缘故^[13]。

3 单层吸波性能优化设计

单层材料的吸收性能主要由其厚度及电磁参数决定。对单层吸波材料的理论计算不仅要考虑其反射系数,还要考虑电磁参数的匹配问题。根据电磁波传输理论,当频率为 f 的均匀平面电磁波垂直射入表面涂覆单层吸波材料的导体表面时,材料对电磁波的功率反射率为^[20]

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (1)$$

式中: Z_{in} 为材料的输入阻抗。

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j\epsilon''}} \cdot \tanh[j(2\pi fd/c) \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j\epsilon''}}] \quad (2)$$

式中: f 为频率, c 光速, d 为涂层厚度, μ' 为复磁导率实部, μ'' 为复磁导率虚部, ϵ' 为复介电常数实部, ϵ'' 为复介电常数虚部。在优化设计中,涂层和自由空间的电磁匹配是最重要的,当两者达到完美匹配时涂层对入射电磁波零反射,这时 $Z_{in}=1-j0$ 。当式(2)中频率 f 和厚度 d 使得 $Z_{in}=1-j0$ 时被称为最佳匹配频率和最佳匹配厚度。利用测得的同轴环样品的电磁参数,可模拟计算出单层吸波涂层在匹配厚度时所对应的理论反射率曲线。

3.1 镍铁氧体吸波性能优化

图6所示为单层镍铁氧体阻抗匹配解析图。由图6中数据计算出镍铁氧体的最佳匹配频率及最佳匹配厚度分别为5.92 GHz, 6.48 mm。

3.2 过渡金属离子取代的影响

图7所示为不同复合铁氧体涂层的阻抗匹配解析图。由图7可以看出, Co^{2+} 取代复合铁氧体在测试频段没有匹配点,这可能是由于 Co^{2+} 取代量为0.5时,镍铁氧体的复磁导率实部过于增大,而虚部增大较少。而 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Cu^{2+} 3种离子取代复合镍基铁氧体有一个匹配点。结合图7中匹配点 d/λ 值求出 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Cu^{2+} 3种离子取代时样品的匹配厚度 d_m 分别为5.63、5.84和5.73 mm,可以看出,以 Zn^{2+} 取代时匹配频率最大,且匹配厚度最小。

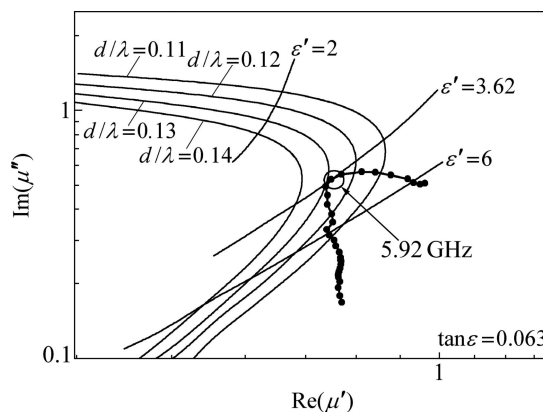


图6 镍铁氧体涂层阻抗匹配解析图

Fig. 6 Impedance matching solution maps and microwave absorption diagrams for Ni-ferrite coatings

利用测得的同轴环样品的电磁参数,模拟计算出镍铁氧体及不同复合镍基铁氧体涂层在其匹配厚度下的反射率曲线,如图8所示。由图8可以看出, Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 3组离子取代复合铁氧体的最小反射率峰值为-36.26、-24.70和-19.56 dB,分别出现在5.92、5.84和5.68 GHz,小于-10 dB的频宽分别为4.7、3.8和3.1 GHz。而没有进行离子取代时 NiFe_2O_4 的反射率吸收峰为-21.36 dB,峰值出现在5.92 GHz,小于-10 dB的频宽为3.5 GHz。说明在取代量 $x=0.5$ 时, Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 取代有利于增大样品的吸波性能,而 Cu^{2+} 取代会使样品的吸波性能减小,并且 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 取代使复合铁氧体的反射率吸收峰向低频移动。

4 结论

1) 4种离子取代均能生成在室温条件下具有超顺磁性的纯净的镍基铁氧体粉末。由于取代元素的种类不同,对铁氧体结构和磁性能有不同的影响,磁性能的变化主要归因于掺杂离子的磁矩大小及其在晶体结构中的不同分布。

2) 离子取代使铁氧体样品的 ϵ' 增大, ϵ'' 在2~6 GHz和13~18 GHz变小,在6~13 GHz增大。 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Cu^{2+} 3种离子取代复合铁氧体与未进行离子取代的 NiFe_2O_4 相比,其复磁导率实部 μ' 变化不大,而 Co^{2+} 离子取代复合铁氧体的 μ' 整体要大于其他几种取代复合铁氧体及未取代的 NiFe_2O_4 ;在2~11 GHz进行 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 和 Mn^{2+} 3种离子取代复合铁氧体的虚部 μ'' 变大,且以 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的最大, Cu^{2+} 取代复合铁氧

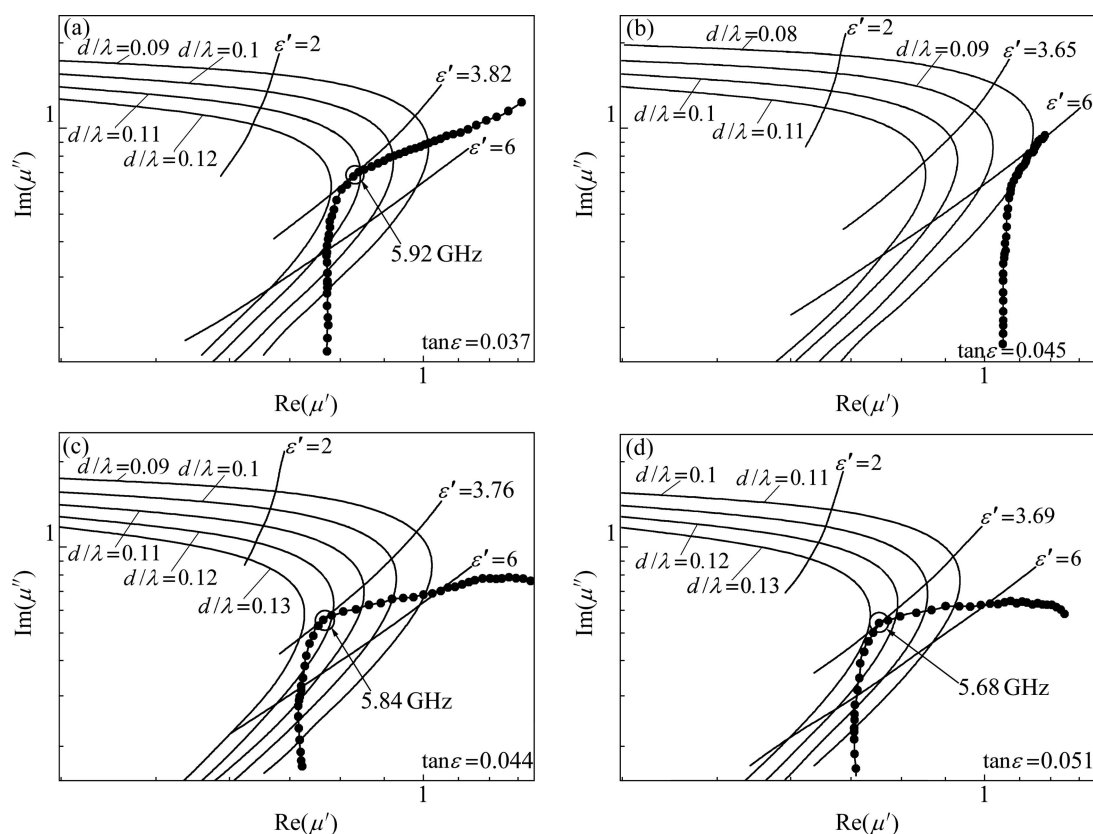


图7 不同复合铁氧体涂层的阻抗匹配解析图

Fig. 7 Impedance matching solution maps and microwave absorption diagrams for different ions composite ferrite coatings: (a) Zn^{2+} ; (b) Co^{2+} ; (c) Mn^{2+} ; (d) Cu^{2+}

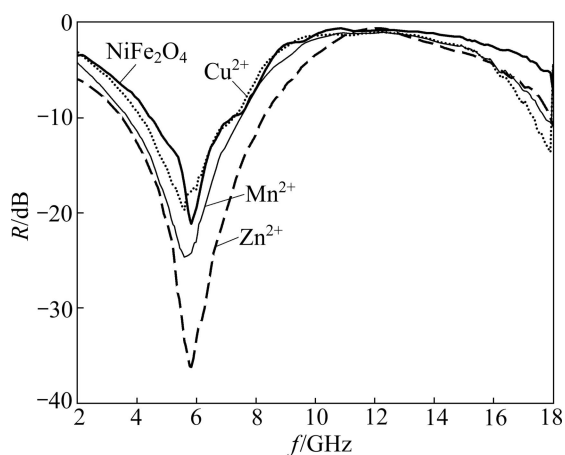


图8 离子取代镍基铁氧体样品在匹配厚度下反射率曲线

Fig. 8 Microwave reflection loss of different ion-Ni-ferrite powder

体与未取代时的相比变化不大。

3) Co^{2+} 取代复合铁氧体在测试频段没有匹配点; Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Cu^{2+} 取代复合铁氧体有一个匹配点, 其在匹配厚度下的最小反射率峰值分别为-36.26、-24.70 和-19.56 dB, 说明此时 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 取代有利

于增大样品的吸波性能, 而 Cu^{2+} 取代会使样品的吸波性能减小, 其中 Zn^{2+} 取代复合铁氧体, 小于-10 dB 的频宽可以达到 4.7 GHz。

REFERENCES

- [1] ZHANG Ze-yang, LIU Xiang-xuan, WANG Xuan-jun, WU You-peng, LI Rong. Effect of Nd-Co substitution on magnetic and microwave absorption properties of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 525: 114-119.
- [2] 黄煜镔, 钱觉时, 张建业. 高铁粉煤灰建筑吸波材料研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 135-139.
HUANG Yu-bin, QIAN Jue-shi, ZHANG Jian-ye. Research on the building electromagnetic wave absorber mixing high-iron fly ash [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 135-139.
- [3] HIRATA A, MORITA M, SHIOZAWA T. Temperature increase in the human head due to a dipole antenna at microwave frequencies [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 109-116.
- [4] ADRIANA M G, MIRABEL C R, CHRISTINE C D. Dependence of microwave absorption properties on ferrite volume fraction in MnZn ferrite/rubber radar absorbing materials

- [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323(22): 2782–2785.
- [5] 赵海涛, 张 罡, 马瑞廷, 李喜坤. 镍铁氧体/聚苯胺复合材料的制备及其性能[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(4): 843–847.
- ZHAO Hai-tao, ZHANG Gang, MA Rui-ting, LI Xi-kun. Preparation and properties of nickel ferrite-polyaniline composites [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(4): 843–847.
- [6] HADDER H, JOLY P. Effective boundary conditions for thin ferromagnetic layers: The one-dimensional model [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2001, 61(4): 1386–1417.
- [7] ZHAO Hai-tao, MA Rui-ting, ZHANG Gang, LI Xi-kun. Influence of Nd doping on microwave absorbing properties of nanocrystalline Ni-Zn ferrites [J]. *Integrated Ferroelectrics: An International Journal*, 2011, 127(1): 1–8.
- [8] 武晓威, 冯玉杰, 陈 宇, 韦 韩. 包覆 Ni-Co-P 的钡铁氧体红外-微波一体化隐身材料制备与性能[J]. *功能材料与器件学报*, 2011, 17(5): 454–459.
- WU Xiao-wei, FENG Yu-jie, CHEN Yu, WEI Han. Preparation of IR and microwave absorbing barium ferrite material by electroless Ni-Co-P plating [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2011, 17(5): 454–459.
- [9] SINGHAL S, SINGH J, BARTHWAL S K, CHANDRA K. Preparation and characterization of nanosize nickel-substituted cobalt ferrites ($\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$) [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2005, 178(10): 3183–3189.
- [10] CHO S B, KANG D H, OH J H. Relationship between magnetic properties and microwave-absorbing characteristics of NiZnCo ferrite composites [J]. *Journal of Mater Science*, 1996, 31(17): 4719–4722.
- [11] GIANNAKOPOULOU T, KOMPOTIATIS L, KONTOGEORGAKOS A, KORDAS G. Microwave behavior of ferrites prepared via sol-gel method [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, 246(3): 360–365.
- [12] LI Qiao-ling, CHANG Chuan-bo, JING Hong-xia, WANG Yong-fei. Synthesis and characterization of shape-controlled $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ via the coprecipitation method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 495(1): 63–66.
- [13] 唐培朵, 杨 祥, 沈 翔, 吴癸丽. 镍锌钴铁氧体的水热低温合成与高频电磁性能研究[J]. *材料导报*, 2009, 23(20): 48–51.
- TANG Pei-duo, YANG Xiang, SHEN Xiang, WU Gui-li. Study on low-temperature hydrothermal synthesis and high frequency electromagnetic properties of NiZnCo-ferrite [J]. *Materials Review*, 2009, 23(20): 48–51.
- [14] XIANG Jun, SHEN Xiang-qian, SONG Fu-zhan, LIU Ming quan. One-dimensional NiCuZn ferrite nanostructures: Fabrication, structure, and magnetic properties [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2010, 183(6): 1239–1244.
- [15] DHO J, LEE E K, PARK J Y, HUR N H. Effects of the grain boundary on the coercivity of barium ferrite $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, 285(1/2): 164–168.
- [16] 金沈贤, 钟智勇, 张怀武. 锰掺杂钴铁氧体粉末的磁性能和介电性能[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(7): 838–842.
- JIN Shen-xian, ZHONG zhi-yong, ZHANG huai-wu. Magnetic and dielectric properties of Mn-doped cobalt ferrite powers [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(7): 838–842.
- [17] 马瑞廷, 赵海涛, 张 罡, 赵 晖, 宋 凯. 尖晶石型纳米晶钴锌铁氧体的制备及其电磁和微波吸收性能[J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, 7(1): 15–18.
- MA Rui-ting, ZHAO Hai-tao, ZHANG Gang, ZHAO Hui, SONG Kai. Preparation electromagnetic and microwave absorption properties of spinel nanocrystalline Co-Zn ferrite [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, 7(1): 15–18.
- [18] 钟文定. 铁磁学(中册)[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 329.
- ZHONG Wen ding. *Ferromagnetic theory (Volume 2)* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 329.
- [19] 廖绍彬. 铁磁学(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 40.
- LIAO Shao bin. *Ferromagnetic theory (Volume 3)* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 40.
- [20] 陈雪刚, 叶 瑛, 程继鹏. 电磁波吸收材料的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2011, 26(5): 449–457.
- CHEN Xue-gang, YE Ying, CHENG Ji-peng. Recent Progress in electromagnetic wave absorbers [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, 26(5): 449–457.

(编辑 何学锋)