

# Ce 取代对纳米晶 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 电磁性能的影响

Influences of  $\text{Ce}^{3+}$  Substitution on Electromagnetic Properties  
of Nanocrystalline  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  Ferrites

马瑞廷, 赵海涛, 赵 辉, 张 罡, 宋 凯

(沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110168)

MA Rui-ting, ZHAO Hai-tao, ZHAO Hui, ZHANG Gang, SONG Kai

(Materials Science & Engineering College, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

**摘要:** 以丙烯酰胺为聚合单体, N, N-亚甲基双丙烯酰胺为网络剂, 采用聚丙烯酰胺凝胶法制备了尖晶石型  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) 纳米晶。采用 X 射线, FT-IR, TEM 和波导等方法对产物进行了表征。X 射线结果表明, 当煅烧温度为  $600^\circ\text{C}$  时, 形成纯相的尖晶石型  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ); 由透射电镜照片可知  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  平均粒径约为 30nm; 纳米晶体在 8~12 GHz 的测试频率范围内具有介电损耗( $\epsilon''$ )和磁损耗( $\mu''$ ),  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_{0.05}\text{Fe}_{1.95}\text{O}_4$  的  $\epsilon''$  和  $\mu''$  均高于  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_{0.05}\text{Fe}_{1.95}\text{O}_4$  的  $\epsilon''$  和  $\mu''$  的最大值分别为 0.93 和 0.15。

**关键词:** 聚丙烯酰胺凝胶法; 取代;  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ; 电磁性能

**中图分类号:** TB 383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2008)10-0114-04

**Abstract:** Nanocrystalline  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) powders were prepared using polyacrylamide gel method with acrylamide as monomer and N, N'-methylene diacrylamide as lattice agent. The analysis methods of X-ray, FT-IR, TEM and wave-guide were used to characterize the products. The X-ray study showed that the pure spinel  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) formed at  $600^\circ\text{C}$ . The average diameter of the  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  crystalline particles was about 30nm identified by TEM. The nanocrystalline  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) had both dielectric loss ( $\epsilon''$ ) and magnetic loss ( $\mu''$ ), while the  $\epsilon''$  and  $\mu''$  of  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_{0.05}\text{Fe}_{1.95}\text{O}_4$  were higher than that of  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ . The maximum of  $\epsilon''$  and  $\mu''$  of the  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_{0.05}\text{Fe}_{1.95}\text{O}_4$  was around 0.93 and 0.15, respectively.

**Key words:** polyacrylamide gel; substitution;  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ; electromagnetic property

尖晶石型镍锌铁氧体作为一种软磁性材料, 具有较高的电阻系数、较低的涡旋电流损耗和高饱和磁化强度, 被广泛地应用在高速指针式读写磁头、避雷针、磁共振装置和电磁波吸收材料<sup>[1-6]</sup>。近年来, 镍锌铁氧体纳米晶的制备方法主要有: 溶胶-凝胶法<sup>[1-3]</sup>、高能球磨法<sup>[4]</sup>、回流法<sup>[5]</sup>和共沉淀法<sup>[6]</sup>等。在软磁铁氧体中, 稀土元素的引入可进一步改善铁氧体的磁性能, 提高材料的稳定性, 并为研究新型超常特性的铁氧体材料奠定基础<sup>[7]</sup>。在以前的工作中, 讨论了稀土元素的掺杂量对铁氧体电磁性能的影响<sup>[8]</sup>, 本研究尝试在  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  中掺杂  $\text{Ce}^{3+}$  离子, 详细讨论了  $\text{Ce}^{3+}$  离子对  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  电磁性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 制备

用分析纯的  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot$

$6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  为原料, 按照化学计量比  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) 称取的原料放到容积为 100 mL 的烧杯中, 经 30min 搅拌和 30min 超声分散后形成均匀、稳定的溶液, 在搅拌下将 2g 丙烯酰胺和 0.4g N, N-亚甲基双丙烯酰胺加入烧杯中, 将烧杯放入  $80^\circ\text{C}$  恒温水浴锅中, 加入 0.05g 引发剂过硫酸铵, 制得均匀、稳定的凝胶。凝胶在真空干燥箱  $90^\circ\text{C}$  下干燥 12h 得到干凝胶, 干凝胶在  $600^\circ\text{C}$  煅烧 1h 制得粉体。

### 1.2 表征

物相分析在 Philips Analytical X-ray Service Hot Line 上进行, 测试条件为铜靶,  $\lambda = 0.154178\text{nm}$ , 电压 35kV, 扫描速率  $0.1^\circ/\text{s}$ , 范围  $(2\theta) 20 \sim 80^\circ$ ; Philips EM 420 透射电子显微镜, 高压 100kV, 测量粉体的形貌; 美国 NICOLET 公司的傅里叶变换红外光谱仪(AVATAR-360, FT-IR) 分析产物的红外吸收峰; 使用波导法对  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ )

和石蜡的复相粉体在 8~12.4GHz 频率范围的介电常数和磁导率进行测量,所使用的仪器为 HB8510B 矢量网络分析仪。

2 结果与讨论

2.1 X-ray 谱图和粒子形貌

图 1 为干凝胶在 600℃ 下煅烧得到的  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) X-ray 谱图。与 X 射线衍射卡(JCPDS CARD 52-278)对比,所得产物与标准  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  的衍射峰相同,可以确认产物为立方晶系尖晶石结构,比 Sileo E E 等<sup>[9]</sup> 制备镍锌铁氧体的煅烧温度低 200℃。 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) 的晶格常数分别为 0.838nm 和 0.8409nm,晶格常数根据公式(1)计算,即

$$a = \frac{\lambda (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}}{2 \sin \theta} \tag{1}$$

式中: $a$  为晶格常数; $\lambda = 0.154178\text{nm}$ ;  $(h, k, l)$  为最强峰(311)晶面指数; $\theta$  为布拉格衍射角。晶格常数  $a$  的数值依赖于晶格中阳离子的有效半径,镍锌铁氧体为复杂型尖晶石结构,氧离子按立方紧密堆积排列,金属离子则分布在氧离子的间隙中,这种间隙分为四面体(A 位)和八面体(B 位)两种。 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  的分子式可以写成  $(\text{Zn}^{2+}_5\text{Fe}^{3+})[\text{Ni}^{2+}_5\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$ , 金属元素的阳离子在晶格中能够表现其共价键的性质,共价键的空间配位性在一些离子的占位优先趋势上显示非常突出。 $\text{Zn}^{2+}$  在形成共价键时倾向于形成  $\text{sp}^3$  杂化轨道,它的空间配位恰好对应于四面体的四个顶点,因此具有强烈的占据四面体 A 位置的优先趋势。镍锌铁氧体中阳离子占据四面体 A 位置的优先次序是,  $\text{Zn}^{2+}$

$> \text{Fe}^{3+} > \text{Ni}^{2+}$ , 而占据八面体 B 位置的优先次序相反<sup>[10]</sup>。因此,  $\text{Zn}^{2+}$  占据尖晶石结构中四面体 A 位置,  $\text{Ni}^{2+}$  占据八面体 B 位置,而  $\text{Fe}^{3+}$  占据 A 位置和 B 位置。由于  $\text{Ce}^{3+}$  的有效离子半径为 108pm, 大于  $\text{Fe}^{3+}$  的 65pm, 因此  $\text{Ce}^{3+}$  通常会进入空位较大的八面体 B 位置,取代少量的  $\text{Fe}^{3+}$ , 导致了晶格常数  $a$  变大。

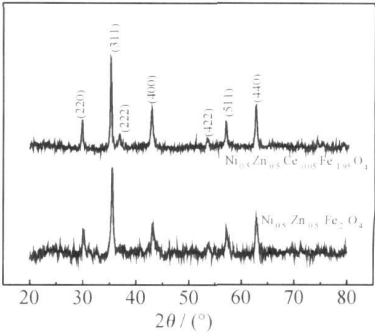


图 1 纳米晶  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) 的 X-ray 谱  
Fig 1 X-ray diffraction patterns of the nanocrystalline  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) powders

图 2 为干凝胶在煅烧温度 600℃ 时  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  的 TEM 照片和电子衍射像(SAD)。从图 2 可以看出粒子形貌约为球形,平均粒径约为 30nm,主要是聚丙烯酰胺凝胶法利用丙烯酰胺自由基聚合反应,同时利用网络剂有两个活化双键的双功能团效应,将高分子链联结起来构成网络,网络阻止煅烧过程中的传质过程,制备的纳米粉体粒度小。从图 2 还看到,粒子之间有一定的团聚,原因是粒子尺寸小于 100nm 时,粒子之间由于高的表面能导致粒子之间产生团聚,文献<sup>[11]</sup>报道了类似的现象。电子衍射像(SAD)为多晶环状,说明所得样品是多晶。

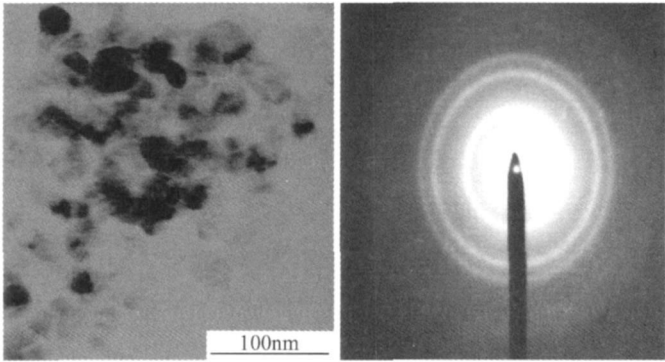


图 2 纳米晶  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  的 TEM 照片(a)和电子衍射像(b)  
Fig 2 TEM images (a) and SAD patterns (b) of the nanocrystalline  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  particles

2.2 FT-IR 分析

图 3 为干凝胶在 600℃ 煅烧得到的  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x$

$\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x = 0, 0.05$ ) 粉体的红外光谱图。从图 3 中观察到在  $500\text{cm}^{-1}$  到  $600\text{cm}^{-1}$  之间分别有一个明显的

吸收峰, 这个吸收峰为金属-氧离子(Fe—O)的特征伸缩振动吸收峰, 这个吸收峰属于  $V_1$  振动吸收峰, 为铁氧体结构中四面体的特征振动吸收<sup>[12]</sup>。红外光谱吸收峰的移动实质上是分子振动频率变化的结果, 影响分子振动频率的直接因素是化学键力常数, 本研究中发现, 掺杂物质的量比为 0.05 的  $Ce^{3+}$ , Fe—O 键吸收峰没有明显的移动, 这是因为  $Ce^{3+}$  进入空位较大的八面体 B 位, 导致四面体 A 位的 Fe—O 键之间的键力常数变化不大, 表现在吸收峰上, Fe—O 键的峰值变化不大。

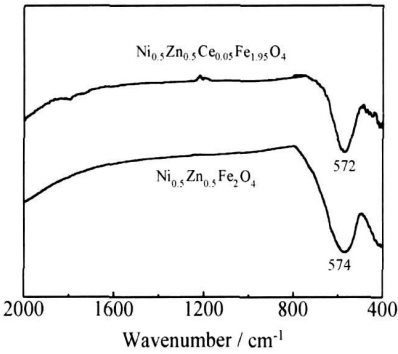


图 3 纳米晶  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) 的 FT-IR 谱图  
Fig. 3 FT-IR spectra of the nanocrystalline  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) ferrites

2.3 电磁性能

图 4 为  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) 的介电常数实部( $\epsilon'$ )和虚部( $\epsilon''$ )随测试频率变化曲线。从图 4 中可以看出, 2 个试样的介电常数  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  在 8.2~12.4GHz 的频率范围内变化都比较平稳, 频率对介电常数  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  影响很小, 没有出现共振吸收峰, 说明在此频率范围内, 具有比较好的频率特性, 这样有利于实现阻抗匹配, 展宽频带<sup>[13]</sup>。 $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_{0.05}Fe_{1.95}O_4$  的  $\epsilon'$  最大值为 6.3,  $\epsilon''$  最大值为 0.93, 比  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  ( $\epsilon'=4.8, \epsilon''=0.30$ ) 高。在微波频段, 镍锌铁氧体的  $\epsilon''$  主要由分子电偶极子极化弛豫引起, 稀土元素 Ce 具有变价的性质, 分布在晶体中易于形成较多的固有电偶极子, 掺杂适量的稀土元素 Ce 有利于增大材料的  $\epsilon''$ 。

图 5 为  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) 的复数磁导率  $\mu'$  和  $\mu''$  随测试频率变化曲线。从图 5 中可以看出,  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_{0.05}Fe_{1.95}O_4$  的  $\mu'$  的最大值为 1.01,  $\mu''$  的最大值为 0.15, 比  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  ( $\mu'=0.965, \mu''=0.08$ ) 高。在  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  铁氧体中, 当少量  $Fe^{3+}$  被  $Ce^{3+}$  取代后, 由于  $Ce^{3+}$  的离子半径分别为 108pm, 大于  $Fe^{3+}$  的 65pm,  $Ce^{3+}$  倾向于占 B 位,

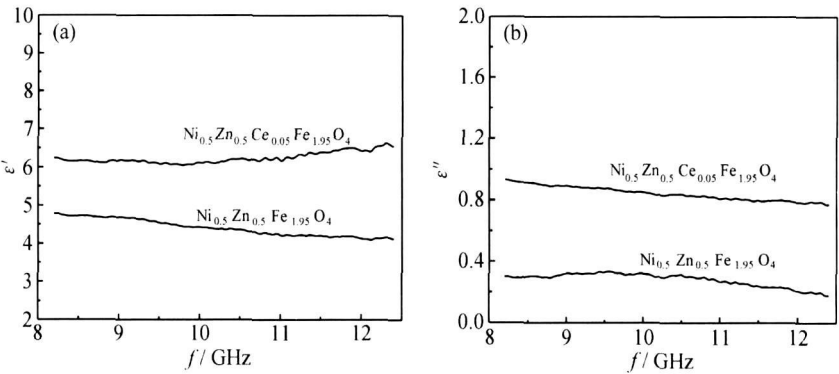


图 4 纳米晶  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) 复介电常数曲线 (a)  $\epsilon'$ ; (b)  $\epsilon''$   
Fig. 4 Dielectric constant curves of the nanocrystalline  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) powders (a)  $\epsilon'$ ; (b)  $\epsilon''$

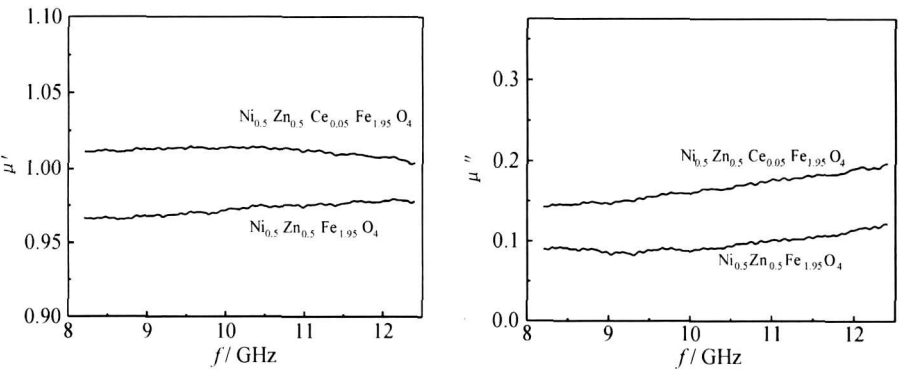


图 5 纳米晶  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) 复数磁导率曲线 (a)  $\mu'$ ; (b)  $\mu''$   
Fig. 5 Magnetic conductance curves of  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Ce_xFe_{2-x}O_4$  ( $x=0, 0.05$ ) powders (a)  $\mu'$ ; (b)  $\mu''$

直接取代了 B 位中的  $\text{Fe}^{3+}$ , 取代后金属离子的分布情况为:  $(\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5})[\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_{1.95}\text{Ce}_{0.05}]\text{O}_4$ , 由于  $\text{Fe}^{3+}$  的 d 轨道受晶体场的影响较大, 轨道运动对磁矩的贡献被周围配位原子的电场所抑制, 几乎完全消失,  $\text{Fe}^{3+}$  的离子磁矩主要来源于它的未成对电子的自旋运动磁矩, 为  $5\mu_B$ , 而  $\text{Ce}^{3+}$  的离子半径较大, 它的 f 轨道受晶体场的影响较小, 离子磁矩包含未成对电子的自旋运动磁矩和轨道运动磁矩。因此, 在  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  铁氧体中掺杂少量的稀土  $\text{Ce}^{3+}$  后, 由于提高了物质的分子饱和磁矩, 从而提高了它的吸波损耗特性。文献<sup>[14]</sup>报道的在煅烧温度为  $800^\circ\text{C}$  下制备的镍锌铁氧体粉体, 在  $0.0\sim 1.0\text{GHz}$  的频率范围内介电常数  $\epsilon'$  数值在  $2.8\sim 3.2$  之间, 介电常数  $\epsilon''$  在  $0.08\sim 0.10$  之间, 但没有测试粉体的复数磁导率  $\mu'$  和  $\mu''$ ; 文献<sup>[15]</sup>报道的在煅烧温度为  $1150^\circ\text{C}$  下制备的  $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  粉体, 介电常数  $\epsilon'$  数值均小于  $0.1$ 。本研究中  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x=0, 0.05$ ) 的介电损耗和磁损耗均高一些, 具有较好的微波吸收性能。

### 3 结论

(1) 当煅烧温度为  $600^\circ\text{C}$  时, 形成纯相的尖晶石型  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x=0, 0.05$ );

(2) 纳米晶  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  ( $x=0, 0.05$ ) 在  $8.2\sim 12.4\text{GHz}$  的测试频率范围内具有介电损耗 ( $\epsilon''$ ) 和磁损耗 ( $\mu''$ ), 掺杂物质的量比为  $0.05\text{ Ce}^{3+}$  的  $\epsilon''$  和  $\mu''$  均高于纯相的  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_{0.05}\text{Fe}_{1.95}\text{O}_4$  的  $\epsilon''$  和  $\mu''$  的最大值分别为  $0.93$  和  $0.15$ 。

### 参考文献

- [1] HWANG C C, TSAI J S, HUANG T H. Combustion synthesis of Ni-Zn ferrite by using glycine and metal nitrates-investigations of precursor homogeneity, product reproducibility, and reaction mechanism[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 93(2-3): 330-336.
- [2] GUPTA N, VERMA A, KAHYAP S C. Dielectric behavior of spin-coated nanocrystalline nickel-zinc ferrite thin films processed by citrate route[J]. Solid State Communications, 2005, 134(10): 689-694.
- [3] 孙杰, 李建华, 李松梅. 尖晶石型  $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  纳米晶体的制备及电磁性能的研究[J]. 无机材料学报, 2005, 20(5): 1077-1082.
- [4] BID S, PRADHAN S K. Characterization of crystalline structure of ball-milled nano-Ni-Zn-ferrite by rietveld method[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 84(2-3): 291-301.
- [5] ZHONG Z F, LI Q, ZHANG Y L. Synthesis of nanocrystalline Ni-Zn ferrite powders by refluxing method[J]. Powder Technology, 2005, 155(3): 193-195.
- [6] 云月厚, 刘永林, 张伟. 化学共沉淀法制备的纳米  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  铁氧体微波吸收特性研究[J]. 材料工程, 2008, (3): 58-62.
- [7] 郭秀盈, 颜秀茹, 崔晓亮, 等. 镧系元素掺杂 Mn-Zn 铁氧体的制备和研究[J]. 无机化学学报, 2004, 20(8): 910-914.
- [8] MART, TIAN Y W, ZHANG C L, et al. Influences of  $\text{La}^{3+}$  substitution on the structure and electromagnetic properties of nanocrystalline nickel ferrites[J]. Journal of Rare Earths, 2007, 25(6): 17-20.
- [9] SILEO E E, ROTELO R, JACOBO S E. Nickel-zinc ferrites prepared by the citrate precursor method[J]. Physics B, 2002, 320(1-4): 257-260.
- [10] KIM C K, LEE J H, KATO H S, et al. Synthesis of Co-, Co-Zn ferrite powders by the microwave-hydrothermal method[J]. Materials Research Bulletin, 2001, 36(12): 2241-2250.
- [11] XIE J L, HAN M G, CHEN L, et al. Microwave-absorbing properties of NiCoZn spinel ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 314(3): 37-42.
- [12] BIRAJADAR D S, DEVATWAL U N, JADHAV K M. X-ray, IR and bulk magnetic properties of  $\text{Cu}_{1+x}\text{Mn}_x\text{Fe}_{2-2x}\text{O}_4$  ferrite system[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(2): 1443-1448.
- [13] 张海军, 姚熹, 张良莹. X, U 铁氧体的溶胶-凝胶合成及微波性能研究[J]. 功能材料, 2003, 34(1): 39-40.
- [14] WU K H, HUANG W C, WANG G P. Effect of pH on the magnetic and dielectric properties of  $\text{SiO}_2/\text{NiZn}$  ferrite nanocomposites[J]. Materials Research Bulletin, 2005, 40(10): 1822-1831.
- [15] MANGALURAJA R V, ANANTHAKUMAR S, MANOHAR P. Microwave-flash combustion synthesis of  $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  and its dielectric characterization[J]. Materials Letters, 2004, 58(3): 1593-1596.

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2040189)

收稿日期: 2008-06-25; 修订日期: 2008-08-18

作者简介: 马瑞廷(1968—), 男, 副教授, 博士, 主要从事纳米材料制备及电磁性能的研究, 联系地址: 沈阳市浑南新区南屏中路6号材料学院。E-mail: mtr-1118@163.com