

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

Study on Microwave Absorption Properties of Nanometer

$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ Ferrite by Chemistry

Coprecipitation Method

云月厚, 刘永林, 张 伟

(内蒙古大学 理工学院, 呼和浩特 010021)

YUN Yue-hou, LIU Yong-lin, ZHANG Wei

(College of Sciences and Technology, Inner Mongolian University, Huhhot 010021, China)

摘要: 采用化学共沉淀法制备了纳米 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 0, 0.005, 0.01, 0.015$) 铁氧体吸波材料, 用 AV3618 型微波矢量网络分析仪测试了样品在 8.2~12.5GHz 范围内的微波吸收特性, 实验结果表明: 稀土元素铈的含量影响材料的吸波性能, 当 $x = 0.01$ 时, 纳米 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 铁氧体的吸波性能最佳。对于 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_{0.01}\text{Fe}_{1.99}\text{O}_4$ 铁氧体吸波材料, 当涂层厚度为 1mm 时, 在测试频段内有三个吸收峰, 在 8.8GHz 处, 其最大吸收衰减量为 15.4dB, 10 dB 以上带宽达 3.8GHz, 适量掺杂稀土元素铈是提高镍锌铁氧体吸波材料性能的一种有效途径。

关键词: 铈; 化学共沉淀法; 纳米铁氧体; 微波吸收材料

中图分类号: TM 25; TB34 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)03-0058-05

Abstract: Nanometer $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 0, 0.005, 0.01, 0.015$) were prepared by the chemistry coprecipitation method, and microwave absorption coefficient in the range of 8.2~12.5GHz were measured by AV3618 net analyzing apparatus. It shows that the content changing of Ce would affect the microwave absorbing properties. When the thickness of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ is 1.0mm and $x = 0.01$, the capability of microwave absorbing is the best one. There are three absorption peaks; The maximum absorption quantity is 15.4dB when the frequency is 8.8GHz, and effective band width reaches 3.8GHz above 10dB. So adulteration of appropriate amount of rare earth Ce is an effective way to improve the microwave absorbing properties of the Ni-Zn ferrite.

Key words: cerium; chemistry coprecipitation method; nanometer ferrite; microwave absorbing material

吸波材料是指能够将投射到它表面的电磁波大部分吸收并转化成其他形式的能量, 而几乎无反射的材料^[1], 微波吸收材料广泛应用于隐身技术, 微波通信, 环保科学等方面, 可有效改善电磁环境, 抑制电磁干扰、辐射、泄露, 是国内外学者深入研究和开发的新型功能材料, 国内外学者已有不少相关研究报道^[2~4]。由于铁氧体微波吸收材料本身具有介电损耗和磁损耗双重特性, 已获得广泛的研究及应用, 但是它也有密度大、温度稳定性差等缺点有待进一步改进, 因而, 铁氧体吸波材料性能的改善和新型铁氧体材料的开发一直是吸波材料研究的重点。由于超细微粒材料其独特的表面效应, 在材料科学领域得以迅速发展, 纳米材料受到许多研究者的关注, 镍锌铁氧体是一种应用广泛的

软磁材料, 其磁性能比较独特^[5,6], 在微波吸收材料研究方面, 已有学者对镍锌铁氧体超微粉末微波吸收特性进行探讨, 发现镍锌铁氧体超微粉末在低频段(100~1800MHz)具有优异吸波性能^[7,8], 而在较高频段的吸波特性还未见有研究报道。本工作研究了掺杂微量稀土元素的纳米镍锌铁氧体材料, 在较高频段(8.2~12.5GHz)的微波吸收性能, 以 SUNG-SOO KIM 等学者报道^[8]的具有优异吸波性能的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体材料为基础, 以 Ce^{3+} 部分置换 Fe^{3+} , 采用化学共沉淀法制备了纳米 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 铁氧体吸波材料, 就铈元素的含量对该铁氧体吸波性能的影响进行了对比研究, 探讨其微波吸收规律, 得到了一些有益的结果。

1 实验

1.1 化学共沉淀法制备铁氧体

以分析纯的 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 及 NH_4HCO_3 , NH_4OH 为原料, 将 Fe^{3+} 盐溶液和组成所制备的铁氧体材料的其他金属盐溶液配料混合, 加入一定量的 NH_4HCO_3 - NH_4OH 作为沉淀剂, 采用化学共沉淀法制备铁氧体。以化学式 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 为参考配方, 将一定化学当量含镍、锌、铁离子的硝酸盐溶解于 200 mL 蒸馏水中, 分别加入不同配比的稀土元素 Ce^{3+} , 以 Ce^{3+} 部分置换 Fe^{3+} , 选取 x 为 0, 0.005, 0.01, 0.015, 相应编号为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#] 样品, 配料得到红褐色溶液, 缓慢加入沉淀剂, NH_4HCO_3 用量是 $[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{金属离子}] = 1.2$, NH_4OH 用量是 $[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{NH}_4^+] = 2.5 \sim 2.8$, 加热保持恒温 50℃, 电磁搅拌溶解, 调节溶液 pH 值至弱酸性, 经低温老化 4h, 使硝酸盐完全沉淀。沉淀物经去离子水洗涤 5 次、过滤, 将得到的沉淀物放入 80℃ 的烘箱中烘干。最后将干燥好的沉淀物置于空气气氛的硅钼炉中, 在 940℃ 煅烧并保温 3h, 然后随炉冷却即得纳米 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 铁氧体材料。

1.2 材料的物性测试

采用 STAR TG/SDTA 851 型差热分析测试仪对前驱体进行综合热分析 (DTA-TG), 升温速度为 10℃/min; 采用日本理学 D/MAX-II 衍射仪 (XRD) 对煅烧后所得纳米粉体进行相结构分析, Cu 靶 K_α ($\lambda = 0.1542\text{nm}$), 管压为 35kV, 管流 25mA, 扫描范围为 20~80°, 并估算其晶粒尺寸; 采用日立公司 H-800 透射电镜 (TEM) 观察样品的微观形貌特征。

1.3 材料的微波吸收特性测试

采用 AV3618 系列微波一体化矢量网络分析仪测量样品的反射式吸波特性, 以制备的铁氧体粉料研磨后与石蜡按 4:1 混合加热, 熔化后搅拌均匀, 待冷却后压制成 1mm 厚的矩形样品, 测量时将样品置于矩形波导中, 安装于两同轴波导转换器之间, 置于系统的反射端, 在 8.2~12.5GHz 频率范围进行测试, 得到样品的复相对介电常数、复磁导率和单位长度的衰减量随频率的变化曲线。

2 实验结果及讨论

2.1 前驱体的热分析

为了研究化学共沉淀法制备前驱体的分解与合成性能, 确定前驱体煅烧最佳温度, 对所得前驱体粉末进

行差热和热重分析, 结果如图 1 所示。从图 1 可见, 大部分失重发生在 400℃ 以下, 几乎占总失重的 70%。这主要归因于氨的分解, 吸附以及化学结合分子水的排除。在更高温度下的失重则是由于碳酸根的分解引起的。从差热曲线可见, 在 940℃ 左右有小放热峰出现, 应该是 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 晶相形成所产生的, 故在 940℃ 煅烧就应当完全形成尖晶石型铁氧体晶相, 与文献[7] 研究报道的结果相符, 由不同样品的 XRD 分析结果也证明这一点。

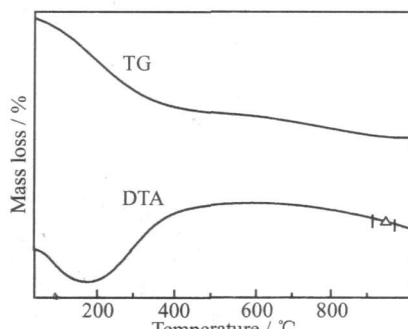


图 1 前驱体粉末的差热-热重曲线

Fig. 1 DTA-TG curve of precursor powder

2.2 粉体相结构及微观形貌分析

图 2 为煅烧后 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 粉体 (x 分别为 0, 0.005, 0.01, 0.015) 四种样品的 XRD 衍射图谱, 由以上图谱分析可知, 由共沉淀法制备的前驱体, 经 940℃ 煅烧即可获得单一尖晶石型铁氧体相, 与 JCPDS 卡片 (No: 08-0234) 的峰位及 d 值完全一致, 而无其他的过渡相, 晶面指数分别为 (2, 2, 0), (3, 1, 1), (5, 1, 1), (4, 4, 0), 其主要衍射峰的物相为面心立方结构, 且当 $x = 0.01$ 时, 尖晶石结构相的三强衍射峰均较高, 说明已形成单一尖晶石型铁氧体相。

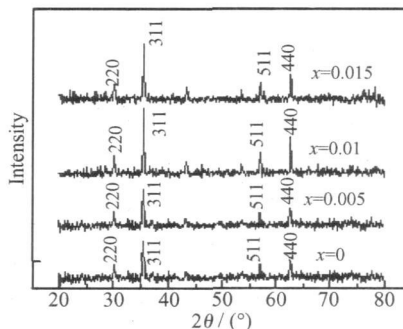


图 2 样品 X 射线衍射图谱

Fig. 2 The XRD patterns of samples

利用 Scherrer 公式可估算出微粉粒径 D , 对不掺杂稀土的 1[#] 铁氧体样品, 其尖晶石相最强衍射峰 $2\theta = 35.54^\circ$, 半高宽 $\beta = 0.306^\circ$, 而仪器宽化度 $\beta_1 = 0.21^\circ$

$= 0.00366\text{rad}$, 故 1[#] 样品的粒径为:

$$D = \frac{0.89\lambda}{(\beta - \beta_1) \cos \theta} =$$

$$\frac{0.89 \times 0.1542}{(0.00535 - 0.00366) \times 0.9527} \approx 86\text{nm}$$

适量掺杂稀土元素铈的 3[#] 样品 ($x = 0.01$), 其尖晶石结构相最强峰 $2\theta = 35.54^\circ$, 半高宽 $\beta = 0.321^\circ = 0.00560\text{rad}$, 而仪器宽化度 $\beta_1 = 0.21^\circ = 0.00366\text{rad}$, 对 3[#] 样品粒径进行计算得:

$$D = \frac{0.89\lambda}{(\beta - \beta_1) \cos \theta} =$$

$$\frac{0.89 \times 0.1542}{(0.00560 - 0.00366) \times 0.9527} \approx 74\text{nm}$$

采用透射电镜检测制备的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 铁氧体粉料, 经 940°C 煅烧制备的该铁氧体粉料 1[#] 样品 ($x = 0$) 和 3[#] 样品 ($x = 0.01$) 的微观形貌 (TEM) 如图 3 所示。

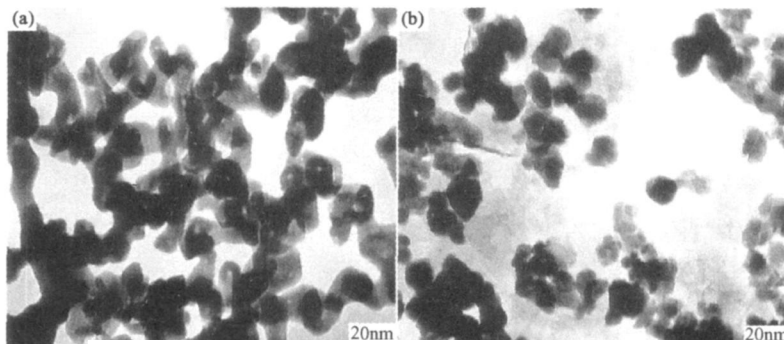


图 3 940°C 煅烧温度下粉体的 TEM 照片

Fig. 3 TEM photograph of powder sintered at 940°C

不掺杂稀土元素铈的 1[#] 铁氧体样品, 颗粒形状不是很规则, 有轻微的团聚现象, 平均粒径约为 80nm 。适量掺杂稀土元素铈的 3[#] 铁氧体样品颗粒形状近似球形, 并且颗粒也比 1[#] 样品颗粒稍小, 平均粒径约为 70nm 。这和对以上样品的 XRD 分析结果一致。由此可知, 添加稀土元素铈有细化铁氧体粉料晶粒作用。

2.3 粉体吸波性能分析

采用 AV3618 系列微波一体化矢量网络分析仪测量样品的反射式吸波特性, 1[#] - 4[#] 样品吸波衰减量随频率变化关系如图 4 所示。

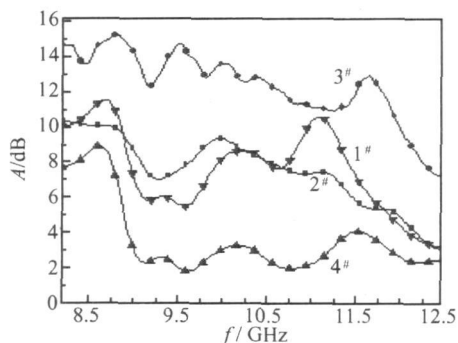


图 4 涂层厚度 1mm 的四种不同样品吸收值随频率变化关系

Fig. 4 Absorption vs frequency when the coating thickness is 1mm for four different samples

有一定的吸波性能, 在整个测试频率范围内, 有三个吸收峰, 第一吸收峰在 8.7GHz 处, 其吸收峰值为 11.5dB , 第二吸收峰在 10.2GHz 处, 其吸收峰值为 8.9dB , 第三吸收峰在 11.3GHz 处, 其吸收峰值为 10.4dB 。少量掺杂稀土铈的 2[#] 样品 ($x = 0.005$), 在 $8.8 \sim 10.5\text{GHz}$ 频段小范围内比 1[#] 样品的吸波性能稍有提高, 但在 10.5GHz 以上频段比不掺杂稀土铈的 1[#] 样品的吸波性能明显下降, 仅在 10.1GHz 处出现一个吸收峰, 其峰值为 8.8dB , 总体分析其吸波性能 2[#] 样品比 1[#] 样品差。而过量掺杂稀土铈的 4[#] 样品 ($x = 0.015$), 从 $9 \sim 12.5\text{GHz}$ 的频率范围内, 吸波性能大幅度下降, 比 1[#] 及 2[#] 样品的吸波衰减量平均降低约 5dB 。当适量掺杂稀土元素铈的 3[#] 样品 ($x = 0.01$), 在整个测试频率范围内, 比 1[#], 2[#] 及 4[#] 样品的吸波性能有大幅度的提高, 而且吸收曲线较平坦, 有三个较明显的吸收峰, 第一吸收峰在 8.8GHz 处, 其吸收峰值为 15.4dB , 第二吸收峰在 9.5GHz 处, 其吸收峰值为 14.8dB , 第三吸收峰在 11.6GHz 处, 其吸收峰值为 13.10dB 以上带宽达 3.8GHz 。

从以上四组样品的吸收情况看, $x = 0.01$ 的样品吸波性能显著优于其它样品, 此种材料吸收峰值高, 并且频带较宽 (10dB 以上带宽 3.8GHz), 即在制备工艺相同的条件下, 掺杂适量 ($x = 0.01$) 的稀土铈能改善该铁氧体材料的吸波性能, 主要表现为吸收峰值增大、频带增宽。但是掺杂稀土铈过量 ($x = 0.015$) 或欠量

1[#] 样品 ($x = 0$) 为不掺杂稀土铈的镍锌铁氧体, 具

($x = 0.005$) 均使材料的吸波性能下降。

由于铁氧体材料属于双复介质, 具有铁磁性和介电性, 在微波场中, 主要是介电损耗及磁损耗, 而介电损耗和磁损耗的大小, 由复介电常数 $\tilde{\epsilon}$ 的虚部 ϵ'' 和复磁导率 $\tilde{\mu}$ 的虚部 μ'' 来表征, 故需要测量分析微波吸收材料的复介电常数 $\tilde{\epsilon}$ 和复磁导率 $\tilde{\mu}$, 电磁波在无限均匀介质传播时, 以电场矢量 E 和磁场矢量 H 描述波阻抗^[9]:

$$Z = E/H = \sqrt{\mu/\epsilon}, \text{ 而 } \tilde{\epsilon} = \epsilon' + j\epsilon''; \tilde{\mu} = \mu' + j\mu'',$$

复介电常数 $\tilde{\epsilon}$ 和复磁导率 $\tilde{\mu}$ 是吸波材料电磁特性的两个基本参数, 其值是评价吸波材料性能优劣的主要依据, 其中 ϵ' , μ' 分别为吸波材料在电场或磁场作用下产生的极化和磁化程度的度量; ϵ'' 为外加电场作用下材料电偶极矩产生的重排引起的损耗量度; μ'' 为在外磁场作用下, 材料磁偶极矩产生的重排引起的损耗量度。表征介电损耗和电磁损耗分别为 $\tan\delta_e = \epsilon''/\epsilon'$, $\tan\delta_\mu = \mu''/\mu'$, 材料介电损耗及电磁损耗角的正切越大, 则电磁波能量转化为其他形式的能量(主要是热能)而被消耗掉的越多, 即 ϵ'' , μ'' 越大, 材料的电磁吸收效能就越好。

采用 AV3618 系列微波一体化矢量网络分析仪测量 1[#] - 4[#] 样品的复磁导率 ϵ'' 和复介电常数 μ'' 随频率的变化关系曲线如图 5 和图 6 所示。由图可以看出, 不掺杂稀土铈的 1[#] 样品, 其复磁导率的虚部, 在整个测试频率范围内具有三个较明显的吸收峰, 与其微波吸收特性的三个吸收峰峰位相对应。掺杂稀土元素铈对该铁氧体材料的复磁导率 μ'' 和复介电常数 ϵ'' 均有影响, 从 8.2~12.5GHz 的频率范围内, 当掺杂稀土铈欠量($x = 0.005$) 的 2[#] 样品或过量($x = 0.015$) 的 4[#] 样品均会使材料的磁导率 μ'' 下降, 仅当适量掺杂稀土元素铈的 3[#] 样品($x = 0.01$) 复磁导率虚部值比 1[#], 2[#] 及 4[#] 样品普遍增大, 在 8.8GHz 处, μ'' 最大值为 0.73, 仅在 11~11.5GHz 小区间稍低于 1[#] 样品, 其变化规律与吸收量随频率变化关系基本一致, 但对于材料复介电常数虚部值 ϵ'' 随频率的变化关系, 是随着稀土元素铈添加量的增加而起伏变化, 适量掺杂稀土元素铈的 3[#] 样品, 其复介电常数虚部值比 1[#], 2[#] 及 4[#] 样品明显增大, ϵ'' 的最大值达到 1.8, 比 1[#] 样品复介电常数虚部值平均增大 4 倍, 由综合分析可看出, 3[#] 样品的 μ'' 及 ϵ'' 均得到提高。镍锌铁氧体的复磁导率虚部是由畴壁共振引起, 掺杂适量的铈离子会分布在畴壁上, 对畴壁有钉扎作用, 从而阻碍畴壁的运动, 宏观表现为复磁导率虚部的增大。在微波频段, 镍锌铁氧体的复介电常数虚部主要由分子电偶极子极化弛豫引

起, 稀土元素铈具有变价的性质, 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铈有利于增大材料的复介电常数虚部。

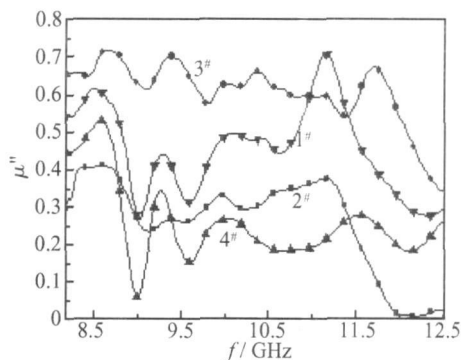


图 5 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 样品的 μ'' - f 图
Fig. 5 Permeability vs frequency for $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ samples

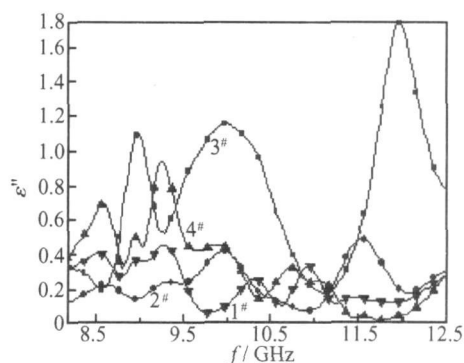


图 6 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 样品的 ϵ'' - f 图
Fig. 6 Permittivity vs frequency for $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ samples

通过综合分析可知, 在制备的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 铁氧体粉料中, 仅当掺杂稀土元素铈 $x = 0.01$ 时, 能够显著提高该镍锌铁氧体的吸波性能。根据文献[10]及铁磁学理论可知, 铁氧体晶格结构及金属阳离子的分布情况是影响材料电磁学性质的重要因素, 通过增加或减少材料晶体结构中的磁性离子数可有效调节铁氧体的饱和磁化强度、控制磁晶各向异性场的大小。尖晶石型铁氧体中, 氧离子按紧密堆积排列, 金属离子分布在氧离子间隙中, 其结构通式为 AB_2O_4 , A, B 为金属离子, 属于面心立方结构, 单位晶胞有 8 个 A 位(四面体), 16 个 B 位(八面体), 32 个氧离子, 等于 8 个 AB_2O_4 的离子数, Zn^{2+} 占 A 位, Ni^{2+} 占 B 位, Fe^{3+} 分别占 A 位、B 位, 故 Ce^{3+} 部分置换 Fe^{3+} 后, 变为尖晶石型复合铁氧体, A, B 之间产生超交换作用, 使特性阻抗增加, 造成电磁损耗。

稀土 Ce^{3+} 离子半径比铁氧体中其它元素离子半径都大, 掺杂适量的铈元素取代铁氧体中部分离子半

径较小的其它元素,使晶格常数发生变化,出现晶格畸变,提高了物理活性,掺杂稀土元素铈会在铁氧体中形成间隙离子,形成固有电偶极子,从而引起介电损耗增大。铁氧体磁损耗主要有畴壁共振和自然共振引起,当受到外磁场作用时,铁氧体内部磁化强度矢量在等效交换场和磁晶各向异性场的共同作用下,所处的稳态被破坏,从而产生畴壁共振和自然共振,由于稀土铈具有很高的磁晶各向异性,掺杂适量的稀土铈离子,可增加晶体的磁晶各向异性场,提高矫顽力,从而增加在微波磁场中的磁滞损耗。掺杂适量稀土元素铈的纳米镍锌铁氧体材料,由于晶粒细化及晶格畸变造成晶粒不规则,使微波在其内部传播时增多反射次数,从而增加了该镍锌铁氧体的吸波衰减量。

3 结论

(1) 用化学共沉淀法制备的纳米 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 铁氧体吸波材料,当掺杂稀土铈为 $x=0.01$ 时,在煅烧温度为 940°C ,其吸波性能最佳。当样品涂层厚度为 1mm 时,在 $8.2\sim 12.5\text{GHz}$ 频率范围内测试其吸波性能,有三个较明显的吸收峰,第一吸收峰位于 8.8GHz 处,其吸收峰值为 15.4dB ,第二吸收峰位于 9.5GHz 处,其吸收峰值为 14.8dB ,第三吸收峰位于 11.6GHz 处,其吸收峰值为 13.10dB 以上带宽达 3.8GHz 。

(2) 稀土铈能够改善纳米 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ 铁氧体的吸波特性,但稀土铈的加入量并非越多越好,实验研究结果表明,当掺杂稀土铈为 $x=0.01$ 时才能显著提高其吸波性能,掺杂稀土铈欠量($x=0.005$)及过量($x=0.015$)均会使材料吸收性能下降。

(3) 对材料进行 XRD 分析及 TEM 分析表明,化学

共沉淀法制备的 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x=0.01$) 铁氧体吸波材料,平均粒径约为 70nm ,掺杂适量稀土铈有利于优化该铁氧体材料的尖晶石结构相,并能细化铁氧体材料的晶粒,提高其吸波性能。

参考文献

- [1] 邢丽英.隐身材料[M].北京:化学工业出版社,2004.172-176.
- [2] 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.
- [3] 阮圣平,吴凤清,吴永伟,等.钡铁氧体纳米复合材料的制备及其微波吸收性能[J].物理化学学报,2003,19(3):275-277.
- [4] MESHARAM R, NAWAL K AGRAWALA, BHAROTI SINGH A A, et al. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite based wide band microwave absorber [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 271: 207-214.
- [5] ELSA E SILEO, RAMIRO ROTELLO, SILVIA E JACOBO. Nickel zinc ferrites prepared by the citrate precursor method [J]. physics B: Condensed Matter, 2002, 320(1): 257-260.
- [6] 李东风,孟哲,贾振斌,等.化学共沉淀法制备纳米级软磁铁氧体研究进展[J].应用科技,2003,30(4):54-57.
- [7] 庄稼,迟燕华,石军宁,等.纳米 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体的制备及电磁损耗特性研究[J].功能材料,2006,37(1):43-46.
- [8] SUNG-SOO KIM, DAE-HEE HAN, SUNG-BAEG CHO. Microwave absorbing properties of sintered Ni-Zn ferrite [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(6): 4554-4556.
- [9] 黄永杰.磁性材料[M].北京:电子工业出版社,1994.200-203.
- [10] 庄稼,迟燕华,石军宁,等.铈对纳米铁氧体粉末电磁学性质影响的研究[J].中国稀土学报,2002,20(4):324-326.

基金项目:内蒙古自治区教育厅基金资助项目(NJ04097)

作者简介:云月厚(1962-),男,高级实验师,主要从事稀土提纯及电磁功能复合材料方面的研究,联系地址:内蒙古大学理工学院(010021).
E-mail: Ndyh@Tom.com

美国制造先进复合材料货运机

为了配合美国空军对下一代运输机的关注,诺斯罗普·格鲁门公司正在开展飞翼/动力增升短距起降先进运输机的研制,洛克希德·马丁公司则正在制造“先进复合材料货运机”ACCA 飞行试验验证机。美国空军研究实验室“先进复合材料飞机”(ACCA)飞行验证项目的后期阶段进行试验,这个计划现在正和“S 速度-敏捷”概念验证项目平行展开,将为用于 Ajacs 项目的技术铺平道路。目前,洛克希德·马丁公司正在制造预计在 2008 年开始试飞的 ACCA 飞行试验验证机。该验证机是用一架多尼尔 328 喷气飞机改装的,用先进的低温复合材料机身更换了原飞机的中/后机身和尾段。这项技术已经用于公司的“臭鼬”无人飞机验证机上。

洛克希德·马丁公司采用了低温非高压炉固化工艺等,先进复合材料技术和常规制造方法相比,这种先进复合材料可以减少 80%~90% 的飞机部件的数量,并使飞机更轻、更便宜、使用时间更久,维修也更方便。采用这种材料制造的“臭鼬”无人机整个飞机的部件还不到 200 个。