平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 微粉石蜡复合材料的微波磁性及吸波性能

李锐, 潘灿瑜, 池啸, 伊海波, 王浩达, 王涛*, 李发仲

兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: wtao@lzu.edu.cn

2013-04-13 收稿, 2013-07-31 接受

国家自然科学基金(11144008, 11204115)、国家重点基础研究发展计划(2012CB933101)和中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2013-22)资助

摘要 通过熔炼及高温热处理的方法成功制备出 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 合金, 该合金不但保持了与 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}$ 同样的平面型磁晶各向异性类型, 还具有高的饱和磁化强度($M_s=143.9 \text{ emu/g}$)和高于室温的居里温度($T_c=450 \text{ K}$). 样品经高能球磨后得到的合金微粉与石蜡混合制成复合材料, 通过矢量网络分析仪对其微波磁性进行表征. 结果显示平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 材料的微波磁性突破了 Snoek 极限, 并获得了大幅度提升. 另外, 对平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 复合材料的吸波性能进行了研究, 其在 1~10 GHz 频段都能得到小于 -10 dB 的反射损耗, 并且最强吸收峰在 S 波段内, 峰值达到 -35 dB, 匹配厚度为 4.7 mm.

关键词

平面型
磁晶各向异性
磁导率
微波吸收

近年来, 随着无线通讯技术的发展和电磁波被广泛地应用在商业、军事和民用领域所涉及到的卫星系统、雷达技术、手机等, 获得在吉赫兹频段拥有更高磁导率的磁性材料, 是高频设备、抗电磁干扰和雷达波隐身技术的一项重要需求^[1,2]. 与碳纳米管、碳纤维、钙钛矿陶瓷体和各类导电高聚合物这类电损耗型材料相比较, 磁性材料因其损耗大、损耗频带宽且容易调控、阻抗匹配比较容易实现等优点, 是目前国内外普遍使用和研究比较多的吸波材料. 例如 NdFeB, SmFeN, 稀土钴合金等硬磁材料的使用已经深入我们的生活当中, 它们具有很高的饱和磁化强度和很强的单轴各向异性, 但是微波磁性很低^[3~5]. 这是因为轴各向异性材料的起始磁导率 μ_i 和自然共振频率 f_r 的乘积受到 Snoek 极限的限制^[6]:

$$(\mu_i - 1)f_r = \frac{2}{3}\gamma M_s, \quad (1)$$

γ 是旋磁比, 其值为 28 GHz T^{-1} , M_s 是饱和磁化强

度. 由 Snoek 极限公式可知, 对于饱和磁化强度确定的铁磁体来说, 想要提高自然共振频率, 材料的初始磁导率必然会降低. 可是, 高性能的磁性电磁波吸收材料应该同时具有高的磁导率和高共振频率.

随着研究发现, 具有易磁化面的平面型材料, 如 Co_2Z 、六角结构平面型铁氧体和某些稀土-3d 过渡族金属间化合物, 可以突破 Snoek 极限的限制^[7~10], 其初始磁导率和共振频率存在如下关系:

$$(\mu_i - 1)f_r = \frac{2}{3}\gamma M_s \sqrt{\frac{H_\theta}{H_\phi}}, \quad (2)$$

其中 H_θ 是面外各向异性场, H_ϕ 是面内各向异性场. 和式(1)相比, 由于平面型材料的 H_ϕ 小于 H_θ , 所以可以使初始磁导率与共振频率的乘积得到提高, 在高的自然共振频率下依然保持高的初始磁导率, 从而提升材料的微波磁性. 但是 Co_2Z 和铁氧体的饱和磁化强度普遍很小, 这对其微波磁性的提高仍然有

引用格式: 李锐, 潘灿瑜, 池啸, 等. 平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 微粉石蜡复合材料的微波磁性及吸波性能. 科学通报, 2013, 58: 3806–3811

Li R, Pan C Y, Chi X, et al. High-frequency magnetic and microwave absorption properties of planar anisotropy $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ particles/paraffin composite (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 3806–3811, doi: 10.1360/972013-436

很大的限制. 铁氧体的微波吸收强度仅为-10 dB 左右; Co_2Z 虽然微波吸收强度突破了-20 dB, 但是它的吸波体厚度高达几厘米, 这对于实际应用是没有意义的. 然而, 某些易面型稀土-3d 过渡族金属间化合物因为具有很高的饱和磁化强度^[11,12], 它的微波吸收强度可以突破-30 dB 的同时还可以保证厚度仅为几毫米, 所以将其作为吸波材料是非常有研究价值的.

对于稀土-3d 过渡族金属间化合物 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}$, 其晶体结构属于 $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 结构, 晶体的 c 面为易磁化面, 属于平面型材料. 但是对于这种结构, 在其晶格的“哑铃”占位上的 Fe-Fe(6c)原子间距(239 pm)由于小于 244 pm, 从而表现为一种负交换作用, 导致居里温度很低($T_c=220\text{ K}$), 饱和磁化强度很小^[13]. 为了削弱这种负交换作用, 实验上通过氮化的方式使得晶格膨胀从而增大“哑铃”占位上的 Fe-Fe 原子间距, 大幅提高居里温度和饱和磁化强度, 进而获得高的磁导率. 但是在氮化过程中, 不可避免地会出现 $\alpha\text{-Fe}$ 的析出, 对实验结果有一定的影响^[14]. 另外, 在 2:17 结构中, “哑铃”占位上的原子对磁晶各向异性的改变贡献最大, 并且也最容易被其他同类原子替代^[15]. 根据文献[16]所报道的, $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{17}$ 随着 Co 元素的替代, 居里温度会提升, 而且少量的 Co 替代仍能保持平面各向异性, 大量的 Co 替代便会变成单轴各向异性. 其中 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 不但居里温度高于室温, 而且还保持了平面各向异性, 具有较高的饱和磁化强度, 因此我们通过实验制备出 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 材料, 研究了它的微波磁性和吸波性能. 另外, 为了验证平面型材料的优越性, 还制备了与 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 的饱和磁化强度相当, 但具有单轴各向异性的 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 材料.

1 实验

将纯度为 99.9% 的稀土 Ce 和纯度为 99.99% 的 Fe, Co 在氩气保护下, 通过电弧熔炼炉熔成铸锭, 考虑到稀土的挥发, Ce 过量 5%, 并且反复熔炼 3 次, 确保熔炼充分均匀. 然后, 样品在真空石英管中在 1000℃ 退火 1 周. 退火后的样品在 QM-3SP2 行星式球磨机中, 用酒精作为保护剂, 以 400 r/min 为转速球磨 8 h. 球磨微粉先在小型无磁圆柱型容器内与石蜡混合, 然后将容器放置于外加磁场中旋转取向, 确保样品的易磁化方向平行于容器圆形表面, 最后通

过 X 射线衍射仪表征结构和各项异性类型. 同时, 球磨微粉与石蜡以 3:7 体积浓度混合均匀制成复合材料, 压制同轴环形样品(内径为 3.04 mm, 外径为 7.00 mm, 厚度为 1~3 mm), 用 Agilent 8363B 微波矢量网络分析仪测量同轴样品在 1~10 GHz 频率范围内的微波电磁性能.

2 结果与分析

图 1 是 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 球磨微粉 SEM 照片, 从中可以看出, 微粉的颗粒尺寸分布在 2~7 μm 之间, 呈现出不规则的岩石状结构, 并且 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 也具有同样的微观形貌. 图 2(a)是研究对象 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 与对比样品 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 的 XRD 图, 可以看出样品都形成了较好的 2:17 结构相. 根据表 1 中列出的晶格参数, 发现 a 和 c 随着 Co 替代量的增加而减小, 说明 Co 元素成功替代 Fe. 图 2(b)是样品在磁场中旋转取向后的 XRD 图. 取向后 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 样品只有(006)面的强衍射峰, 其余晶面的衍射峰几乎消失, 说明样品为易面型材料; 而 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 则只保留了(300)和(220)面的衍射峰. 这是由于大量 Co 原子的替代使样品转变成了易轴型材料. 图 2(c)是两种样品的磁滞回线. 另外, 从表 1 可以看出它们的饱和磁化强度数值相当, 并且大约是 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}$ 的 7 倍. 图 2(d)是样品在重力方向外加磁场后所测得的热重数据, 经过处理后得到的质量对温度的一阶导数随温度的变化曲线, 通过表 1 看出, 居里温度均高于室温, 并得到了大幅提高, 这是因为 Co 元素的替代削弱了 Fe-Fe(6c)间的负交换作用所引起的. 因此, 我们就得到了纯相的、具有较高饱和磁化强度和居里温度, 并且仍保持与 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}$ 同样的磁晶各向异性类型(平面型)的 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 材料.

图 1 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 球磨微粉样品形貌

图 2 (a) $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 球磨微粉的 XRD 图; (b) $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 取向样品的 XRD 图; (c) $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 球磨微粉的磁滞回线; (d) $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 球磨微粉在垂直单向的外加磁场作用下质量与温度的一阶微分随温度的变化曲线

表 1 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 球磨微粉与 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}$ 的晶格参数 a, c, V , 饱和磁化强度 M_s 及居里温度 T_c

样品	a (Å)	c (Å)	V (Å ³)	M_s (emu/g)	T_c (K)
$\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$	8.440	12.359	762.45	130.5	570
$\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$	8.472	12.482	775.86	143.9	450
$\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}$	8.501	12.427	777.81	19.0	220 ^[13]

2.1 复磁导率及其磁谱拟合

图 3 是研究对象 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和对比样品 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 的复合材料的磁谱, 点状曲线为实际测得的数据, 实线为拟合曲线, 它们的一些微波磁性参数见表 2. 一般来说, 磁性材料的高频损耗主要有磁滞损耗、畴壁共振、涡流损耗和自然共振. 其中磁滞损耗在微弱的外加场下是可以忽略不计的, 畴壁共振产生在 1~100 MHz 波段下. 涡流损耗对于磁导率实部的贡献主要与厚度 d 和电导率 σ 有关^[17,18]:

$$\mu''(\mu')^{-2}f^{-1} = \frac{2}{3}\pi\mu_0d^2\sigma, \quad (3)$$

其中 μ_0 是真空磁导率. 从公式可以看出, 等号右边

是常数, 如果损耗主要由涡流损耗引起, 那么等号左边应该也是常数. 但是通过实际测的复磁导率计算得到的 $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}$ 随频率变化曲线(图 4)可以看出, $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}$ 并不是一个恒值, 所以涡流损耗可以被排除. 这样, 高频磁损耗主要是由自然共振引起.

对于自然共振原理, 我们可以用 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程拟合磁谱^[14,19], 其表达式为

$$\mu'' = \sum_i^n \chi'_i \frac{(f/f_i)\alpha(1+(f/f_i)^2(1+\alpha^2))}{(1-(f/f_i)^2(1+\alpha^2))^2 + 4\alpha^2(f/f_i)^2}, \quad (4)$$

其中 n 是峰的个数, χ' 是初始磁导率, f 是频率, f_i 是自旋共振频率(样品的固有自然共振频率), α 为阻尼因子. 对于复合材料的实验拟合曲线如图 3 所示, 从图中可以看到, 磁导率的虚部有两个峰, 平面各向

图3 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 样品与石蜡复合材料的磁谱及其拟合曲线

表2 样品的初始磁导率、拟合频率和 Snoek 极限比较

样品	μ_i	f_i (GHz)	$(\mu_i - 1)f_i$ (GHz)	$\frac{2}{3}\gamma M_s$ (GHz)
$\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$	2.45	3.4	4.9	2.3
$\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$	3.23	9.4	21.0	2.5

图4 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 和 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 样品与石蜡复合材料的 $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}$ 随频率的变化曲线

异性材料的自然共振峰一般高于 1 GHz, 而前面的低频共振根据文献[14]有可能是由于少量 α -Fe 引起的.

从表2可以看出, 平面型材料的磁导率和共振频率均明显大于具有单轴各向异性的样品. 对于 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 复合材料, 它的磁导率大小同样可以达到与 $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 一样的值^[14], 并且磁导率和共振频率的乘积明显大于 Snoek 极限. 因此, 平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 材料可以突破 Snoek 极限, 在更高的频率下获得更大的磁导率.

2.2 平面型复合材料的微波吸收

根据传输线理论^[1,20], 单层吸波材料在于空气界

面上的输入阻抗 Z_{in} 是

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh\left(j \frac{2\pi f t}{c} \sqrt{\mu \varepsilon}\right), \quad (5)$$

式中, t 是吸波材料的厚度, f 是微波频率, c 是光速, $\mu = \mu' - j\mu''$ 是复磁导率, $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 是复介电常数, Z_0 是真空阻抗.

材料的反射损耗 RL 为

$$RL(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|. \quad (6)$$

图5是 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 复合材料的介电常数, 可以看出其数值在 1~10 GHz 频段内保持一定的恒值

图5 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 样品与石蜡复合材料的介电常数

(实部数值大约为 20, 虚部数值大约为 4), 再结合复合材料的复磁导率, 我们就可以通过式(5)和(6)计算出此复合材料的反射损耗, 研究它的微波吸收性能. 图 6(a)是样品在 1~10 GHz 下, 匹配厚度在小于 6 mm 的变化范围内, 所对应的最大反射损耗与匹配频率的关系曲线, 从中可以看出随着匹配厚度的减小, 反射吸收峰逐渐向高频方向移动, 而且这种平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 复合材料在 1~10 GHz 频段内, 对于不同的匹配厚度, 它的反射吸收峰均小于 -10 dB (反射吸收率大于 90%). 然后根据计算得到的相对输入阻抗 $Z = |Z_{\text{in}}/Z_0|$ 随频率的变化曲线(虚线)可以看出, 在 $Z=1$ 时, 复合材料在频率 2.3 GHz 附近有最小反射吸收峰, 其值为 -35 dB, 它所对应的匹配厚度仅有 4.7 mm. 材料在此厚度下的反射损耗随频率变化如图 6(b)所示, 发现反射损耗小于 -5 和 -10 dB 的频带宽度分别为 2.1 和 0.8 GHz. 这种平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 复合材料由于具有较优越的微波磁性, 磁导率的大大提高使其作为吸波体可以具有更小的匹配厚度, 并且仍然保持较高的反射损耗, 是一种非常有潜力的微波软磁及微波吸收材料.

3 结论

通过实验成功制备出了平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 合金微粉并研究了材料的微波磁性, 与单轴型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{17}$ 材料相比较, 平面型的 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 材料明显超越了 Snoek 极限, 在更高的频率下仍具有较高的磁导率. 另外, 对平面型 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 微粉

图 6 $\text{Ce}_2(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_{17}$ 复合材料的微波吸收特性曲线
(a) 样品最大的反射吸收与匹配频率的关系; (b) $Z=1$ 时, 材料的反射吸收与频率的关系

石蜡复合物的微波吸收性能进行了研究. 结果表明, 复合材料在 S 微波段具有最佳吸波性能, 其中最佳吸波频率为 2.3 GHz, 最佳匹配厚度为 4.7 mm, 吸收峰强为 -35 dB, 可用作 2 GHz 附近电磁波的吸波材料.

参考文献

- Naito Y, Suetaki K. Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1971, 19: 65-72
- Kim D Y, Chung Y C, Kang T W, et al. Dependence of microwave absorbing property on ferrite volume fraction in MnZn Ferrite-rubber composites. *IEEE Trans Magn*, 1996, 32: 555-558
- Sagawa M, Fujimura S, Togawa N, et al. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe. *J Appl Phys*, 1984, 55: 2083-2087
- Katter M, Wecker J, Schultz L. Structural and hard magnetic properties of rapidly solidified Sm-Fe-N. *J Appl Phys*, 1991, 70: 3188-3196
- Fujii H, Satyanarayana M V, Wallace W E. Magnetic and crystallographic properties of substituted $\text{Ce}_2\text{Co}_{17-x}\text{T}_x$ compounds (T = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Cu, Zr and Hf). *J Appl Phys*, 1982, 53: 2371-2373
- Snoek J L. Dispersion and absorption in magnetic ferrites at frequencies above one Mc/s. *Physica*, 1948, 14: 207-217
- Li Z W, Lin G Q, Kong L B. Microwave reflection characteristics of Co_2Z barium ferrite composites with various volume concentration. *IEEE Trans Magn*, 2008, 44: 2255-2261
- Li Z W, Chen L F. High-frequency magnetic properties of W-type barium-ferrite $\text{BaZn}_{2-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ composites. *J Appl Phys*, 2003, 94: 9
- Liu X, Qiao L, Li F S. Microwave properties in relation to magnetic anisotropy of the $\text{Nd}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{10}\text{V}_2$ system. *J Phys D Appl Phys*, 2010, 43: 165004

- 10 Xue D S, Li F S, Fan X L, et al. Bianisotropy picture of higher permeability at higher frequencies. *Chin Phys Lett*, 2008, 25: 4120–4123
- 11 Kou X C, de Boer F R, Grossinger R, et al. Magnetic anisotropy and magnetic phase transitions in R_2Fe_{17} with $R = Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm$ and Lu . *J Magn Magn Mater*, 1998, 177-181: 1002–1007
- 12 Kou X C, Zhao T S, Grossinger R. Ac-susceptibility anomaly and magnetic anisotropy of R_2Co_{17} compounds, with $R = Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm$ and Lu . *Phys Rev B*, 1992, 46: 6225–6235
- 13 Andreev A V. Thermal expansion anomalies and spontaneous magnetostriction in rare-earth intermetallics with cobalt and iron. *Handbook Magn Mater*, 1995, 8: 59–187
- 14 Zuo W L, Qiao L, Chi X, et al. Complex permeability and microwave absorption properties of planar anisotropy $Ce_2Fe_{17}N_3$ -delta particles. *J Alloys Compd*, 2011, 509: 6359–6363
- 15 Strnat K J. Rare earth-cobalt permanent magnets. *J Magn Magn Mater*, 1991, 100: 38–56
- 16 Xu X, Shaheen S A. Structural and magnetic properties of rare-earth iron nitride $Ce_2(Fe_{1-x}Co_x)_{17}N_y$ series. *J Appl Phys*, 1993, 73: 5896–5898
- 17 Wu M, Zhang Y D, Hui S, et al. Microwave magnetic properties of $Co_{50}/(SiO_2)_{50}$ nanoparticles. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 4404–4406
- 18 Wen F S, Qiao L, Zhou D, et al. Influence of shape anisotropy on microwave complex permeability in carbonyl iron flakes/epoxy resin composites. *Chin Phys B*, 2008, 17: 2263
- 19 Wen F S, Yi H B, Qiao L, et al. Analyses on double resonance behavior in microwave magnetic permeability of multiwalled carbon nanotube composites containing Ni catalyst. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 042507
- 20 Yusoff A N, Abdullah M H, Ahmad S H, et al. Electromagnetic and absorption properties of some microwave absorbers. *J Appl Phys*, 2002, 92: 876–882

High-frequency magnetic and microwave absorption properties of planar anisotropy $Ce_2(Fe_{0.7}Co_{0.3})_{17}$ particles/paraffin composite

LI Rui, PAN CanYu, CHI Xiao, YI HaiBo, WANG HaoDa, WANG Tao & LI FaShen

Key Laboratory of Magnetism and Magnetic Material of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

The high-frequency magnetic and microwave absorption properties of rare earth-3d intermetallic compounds $Ce_2(Fe_{0.7}Co_{0.3})_{17}$ (Th_2Zn_{17} -type) have been studied. Not only does it keep the same c-plane anisotropy as Ce_2Fe_{17} , but also $Ce_2(Fe_{0.7}Co_{0.3})_{17}$ has a higher saturation magnetization ($M_s=143.9$ emu/g) and a higher Curie temperature ($T_c = 450$ K). The high frequency properties of paraffin composites with 30% volume concentration of particles are measured using vector network analyzer. Compared with the uniaxial composite, the planar ones have a higher resonant frequency and microwave permeability. In addition, a minimum RL value of -35 dB is observed at 2.3 GHz on the specimen with the marching thickness 4.7 mm.

planar anisotropy, magnetocrystalline anisotropy, complex permeability, microwave absorption

doi: 10.1360/972013-436