

纳米磁性金属电磁波吸收剂

赵秀芬¹ 王树伦² 于名讯¹ 徐勤涛¹ 杨丰帆^{1,3}

(1 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

(2 总装南京军事代表局济南代表室, 济南 250031)

(3 山东大学物理学院, 济南 250061)

文 摘 分析了纳米磁性金属电磁波吸收剂的吸波原理, 综述了纳米磁性金属电磁波吸收材料如零维磁性纳米颗粒、一维磁性金属纳米线、二维磁性薄膜、二维片状磁性金属颗粒的国内外研究进展情况, 并对未来的研究方向提出见解。

关键词 吸波材料, 电磁波吸收剂, 纳米磁性金属

Electromagnetic Wave Absorbents of Nano-Magnetic Metals

Zhao Xiufen¹ Wang Shulun² Yu Mingxun¹ Xu Qintao¹ Yang Fengfan^{1,3}

(1 The 53RD Research Institute of China North Industries Corporation, Jinan 250031)

(2 The Jinan Agent's Room of the GAD Nanjing Military Representative Bureau, Jinan 250031)

(3 Physics College, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract The absorbing mechanism of nano-magnetic metals is analytically discussed in this paper. And the recent research progress of nano-magnetic metals including nano-magnetic particles of zero dimension, nanowire arrays of one dimension, magnetic thin films of two dimension and flaky metal magnetic powders of two dimension at home and abroad is reviewed. At last, the future research trends are introduced.

Key words Absorbing material, Electromagnetic wave absorbent, Nano-magnetic metal

0 引言

雷达吸波材料(RAM)不仅作为隐身技术的重要手段得到各军事国家的重视,在信息技术领域的应用也不断深化。例如频段为UHF(0.3-3 GHz)和SHF(3-30 GHz)的电磁波广泛应用于高速信息传输,局域网(LAN)系统频段设置为2.4、5.0和19.0 GHz,电子不停车自动收费系统(ETC)频段为5.8 GHz,作为下一代信息传输技术候选者的超宽带(UWB)系统在美国的频段设定为3.1-10.6 GHz^[1]。另外,电子信息技术的发展使得电子元器件日益小型化、集成化和高速化,会产生严重的电磁干扰、电磁辐射和信息泄露等危害^[2],吸波材料亦可作为电磁防护材料得以应用。

由于纳米材料结构和组成的特殊性,例如小尺寸效应、表面与界面效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应;磁性金属具有高饱和磁化强度、高磁导率和

小的磁致伸缩系数,对于获得高吸收的电磁波吸收材料至关重要。而纳米结构磁性金属材料兼具纳米材料和磁性金属的优异性能,表现出表面磁矩增强、巨磁电阻效应和自旋重取向等特性^[3],可获得良好的吸波效果。本文主要介绍零维磁性金属纳米颗粒、一维磁性金属纳米线、二维磁性薄膜和二维片状磁性金属颗粒吸收剂的研究进展情况,并对纳米磁性金属电磁波吸收剂的吸波理论进行探讨。

1 纳米磁性金属电磁波吸收剂的吸波理论

半个多世纪以来,吸波材料的主要成分电磁波吸收剂已有较大的发展,传统的吸收剂主要有:电介质型的导电炭黑和石墨、碳纤维、碳化硅纤维、钛酸钡铁电陶瓷等,具有较高的介电损耗,依靠介质的电子极化、界面极化衰减或介质极化迟豫损耗来吸收电磁波,但是添加电介质吸收剂不能改变磁导率,且对厚度的依赖性较高;磁介质型的铁氧体、羰基铁粉以及

收稿日期:2010-03-02

基金项目:总装预研资助项目(40401030202)

作者简介:赵秀芬,1986年出生,硕士研究生,主要从事电磁屏蔽及吸波材料方面的研究。E-mail:xfzhao53@126.com

各种金属合金粉,以铁氧体为例,具有磁滞损耗、涡流损耗和剩余磁损耗,可达到强吸收、宽频带的吸波效果,但是铁氧体的密度较高,且高频吸波性能受制于 Snoek 极限不够理想^[4]。现在广受关注的新型吸波材料主要有纳米材料、手性吸收剂、导电高聚物、蓝相聚合物、席夫碱类吸收剂、纤维类吸收剂、左手材料等^[4-6],尤其是纳米磁性金属电磁波吸收剂(Fe、Co、Ni 及其合金),可开发性强,易获得高磁导率、高磁损耗、高频吸收效果较佳、匹配较好的吸波材料。

一般认为,磁性金属对电磁波能量的吸收由晶格电场热振动引起的电子散射、杂质和晶格为缺陷引起的电子散射以及电子和电子之间的相互作用三种效应决定^[4]。由于粒子的细化使得组成粒子的原子数大大减少,活性大大增加,在微波辐射下,分子、电子运动加剧,促进磁化,使电磁能转化为热能;铁磁性金属粒子的晶体结构比较简单,没有铁氧体中磁性次格子之间磁矩的相互抵消,饱和磁化强度一般比铁氧体高四倍以上,可获得较高的磁导率和磁损耗,且磁性能具有较高的热稳定性。

对于各向同性单畴球形颗粒吸收剂有 Snoek 法则^[7]

$$(\mu_s - 1)f_r = 2\gamma(4\pi M_s)/3 \quad (1)$$

式中, μ_s 为静态磁导率, f_r 为共振频率, γ 为旋磁比, $4\pi M_s$ 为饱和磁化强度,可见静态磁导率和共振频率只与饱和磁化强度有关,而与各向异性场无关。

对于铁磁薄膜,可得到近似于 Snoek 极限的公式^[7]

$$(\mu_s - 1)f_r^2 = (\gamma 4\pi M_s)^2 \quad (2)$$

显然在相同的共振频率下,薄膜材料可获得较高的磁导率。

对于强磁晶各向异性材料,如六角晶系铁氧体,可获得如下公式^[7]

$$(\mu_s - 1)f_r^2 = \frac{1}{3} (\gamma 4\pi M_s)^2 \left(1 + \frac{H_\theta + H_\phi}{4\pi M_s} \right) \quad (3)$$

式中, H_θ 为面外各向异性场,一般为 10 kOe, H_ϕ 为面内各向异性场,一般为 100 kOe,但是由于其饱和磁化强度低于铁磁性金属材料,故磁导率也相对较低。

对于各向异性针状和扁平旋转椭球状铁磁性颗粒,有如下公式^[8]

$$(\mu_r - 1)f_r^2 = (2.8)^2 4\pi M_s [H_k + 4\pi M_s (D_\perp - D_e)] \quad (4)$$

式中, D_\perp 为难磁化轴方向的退磁因子, D_e 为易磁化轴方向的退磁因子,针状时 $D_\perp = 1/2$ 、 $D_e = 0$,扁平时 D_\perp 与扁平率有关, D_e 较小。

从公式(1)-(4),可以看出,要想突破传统材料 Snoek 极限的限制,一是提高材料的饱和磁化强度;

二是增加各向异性,包括磁晶各向异性和形状各向异性。对于磁性金属材料来说,其饱和磁化强度较高,通过降低维度和尺寸,即可获得高的各向异性,提高磁导率,从而提高微波吸收性能。

2 纳米磁性金属电磁波吸收剂的研究进展

2.1 零维磁性金属纳米颗粒

L. Z. Wu 等^[9]运用 Gilbert 方程和扩展 Bruggeman 有效媒质理论,计算了填充于非磁性基体(环氧树脂)中的 Fe 基磁性金属颗粒的固有磁导率和有效磁导率。结果表明:复合材料的微波性能,即相对复磁导率受饱和磁化强度($4\pi M_s$)、晶粒各向异性场(H_a)和电阻率(ρ)的影响,同时球形粒子的颗粒尺寸对微波性能起着决定作用,超细铁磁性颗粒在微波吸收材料中具有良好的应用前景。

Masahiro Itoh 等^[11]通过对 FeNdB 型烧结磁体回收再利用过程中产生的金属残渣粉末进行氢化处理得到磁性金属粉。由于还原磁性粉末的表面不均匀,可以抑制由趋肤效应引起的涡流损耗。将 65% 组分含量的粉末添加到环氧树脂中制成同轴样,采用 Agilent8720ES 测量其 0.05-18 GHz 的散射参数。所制得 1.2 mm 电磁波吸收体在 16.5 GHz 的反射损失最小值为 -32 dB,9-18 GHz 的反射损失低于 -20 dB;与介电型和碳电阻堆叠后能展宽频带,在 4-15 GHz 低于 -10 dB。Jiu Rong Liu 等^[10]使用金属间化合物 $Y_2(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{17}$ 经熔融纺丝技术,氢化歧化反应和氧化处理,制备了 FeCo 颗粒和 Y_2O_3 颗粒。将 80% 组分含量的颗粒加入环氧树脂制成同轴样,采用网络分析仪测量 0.05-20 GHz 频段的散射参数 S_{11} 和 S_{21} ,以及电磁参数,再利用电磁参数计算得到反射损失。在厚度为 2.2-5.7 mm 时 2.7-8.1 GHz 频段的反射损失低于 -20 dB,厚度为 3 mm 时 5.6 GHz 的最小反射损失为 -43 dB。Kenji Sakai 等^[11]研究了磁性金属 Sendust 合金颗粒和坡莫合金颗粒电磁参数的频率特性。研究所用 Sendust 合金和坡莫合金颗粒均为球形,其中 Sendust 合金颗粒的平均尺寸分别为 5、10、20 μm ,坡莫合金的平均颗粒尺寸为 10 μm 。分别将 53% 体积分数的四种颗粒添加到溶于丙酮的聚苯乙烯树脂中,经热压成型制成同轴样和矩形样,同轴法测量 50 MHz-12.4 GHz 的散射参数并计算得到电磁参数;矩形波导法分别测量 P、K、R 波段的散射参数并计算得到电磁参数。结果表明,金属背底单层吸波材料在 20 GHz 以上的吸收超过 99%,5 μm 颗粒的反射损失在几 GHz 和 30 GHz 以上频段都低于 -20 dB。

磁性金属颗粒应用于吸波材料中具有良好的基础,另有研究表明^[12],具有单轴各向异性的单畴铁磁性颗粒复合材料可实现左手特性,将金属性的单轴

各向异性单畴铁磁颗粒和非磁性绝缘的球形颗粒介质相互混合,颗粒磁矩取向在空间上无序分布,由于金属性颗粒的介电常数在低于等离子频率时为负,电磁波的频率在铁磁共振频率附近时单畴颗粒的磁导率也为负,控制体积分数,便可能获得负 ϵ 和负 μ ,这对于吸波材料的制备来说又是一个利好信息。但是由于球形纳米颗粒的团聚现象较为严重,更多的研究集中在具有形状各向异性的一维和二维纳米材料。

2.2 一维磁性金属纳米线

G. H. Lee 等^[13]采用磁场条件下热分解五羰基铁化合物分子制备铁磁性 Fe 纳米线,并对其生长机制进行了分析。磁性铁粒子以堆积方式形成纳米线,在不同的蒸汽压力下会长成不同的形状。Munekazu Motoyama 等^[14]采用痕迹刻蚀聚碳酸酯(PC)模板恒压电沉积法制备了 Cu 纳米线和 Ni 纳米线阵列,直径为 15–200 nm,长径比能达到 50–400。Shaoguang Yang 和 Hao Zhu 等^[15–16]分别采用多孔阳极氧化铝模板(AAO)和阳极铝模板(AAT)制备了 Fe 纳米线和 Fe₁₄Ni₈₆合金纳米线,长径比能达到 1 000 以上,直径分别为 35 nm 和 43 nm,具有明显的形状各向异性,易磁化轴方向垂直于样品平面。D S Xue 等^[17]多孔阳极氧化铝模板(AAO)电沉积方法制备了非晶 Fe_{0.88-x}Co_xP_{0.12}合金纳米线,并对其磁学性能进行了研究。磁滞回线显示,随着 Co 含量的增加 $H_c(11)$ 和 $M_r/M_s(11)$ 也增加;室温下的穆斯堡尔谱证明 Fe 原子的磁矩平行于纳米线方向,易磁化轴也平行于纳米线,即纳米线具有明显的形状各向异性。黄兰萍等^[18]采用脉冲和直流电沉积方式,以 FeSO₄·(NH₄)₂SO₄等混合溶液为电解液,在 AAO 微孔内制备了 Fe 磁性纳米线阵列。结果表明:沉积的纳米线为立方结构 a-Fe,在生长过程中沿(110)择优取向,在相同的沉积时间内,脉冲电沉积可获得直径更小的 Fe 纳米线。在沉积好的样品表面涂上环氧树脂胶用 RCS 空间反射法测试样品反射率,2–18 GHz 的最大反射率为 -4.8 dB,大于 -1 dB 的吸收带宽约为 10 GHz。

目前,对于一维磁性金属纳米线研究主要为制备方法和电磁性能,应用研究领域主要是超大规模集成电路(ULSIC)、光导纤维、微电子学、电致发光、微电极束、化学传感器、垂直磁记录、选择性太阳能吸收器、催化等领域^[19],对于吸波性能方面的研究较少,但由于其兼容性好、质量轻、厚度薄,具有磁晶各向异性和形状各向异性的共同作用,在宽频吸波方面具有良好的应用前景。

2.3 二维磁性薄膜

Kenji Ikad 等^[20]采用 FeCo 合金靶与 SiO₂玻璃靶

双射频共溅射在 0.4 mm SiO₂基体上,制备了(CoFe)-Si-O/Si-O 磁性纳米颗粒多层膜。所制得最优试样磁导率实部一直到 2 GHz 都可以达到 200,电阻率为 2.2 mΩ·cm,铁磁共振频率为 2.86 GHz。通过控制纳米磁性颗粒膜和绝缘层厚度可获得高频磁性能;二维结构各向异性引入单轴磁各向异性表现出优异的软磁性能,可实现高 μ 和高铁磁共振频率;非晶相可提高电阻率,促使 GHz 频段薄膜的实际开发应用。J. C. Sohn 等^[21]采用射频磁控溅射在 Si 基体上沉积了 Co-Fe-Al-O 磁性纳米颗粒膜。根据 Landau-Lifshitz-Gilbert 方程模拟了磁性薄膜厚度、电阻率、饱和磁化强度、各向异性场对电磁参数谱图的影响,随着饱和磁化强度的增加, μ' 和 μ'' 增加,但截止频率没有发生变化;随着各向异性场的增加, μ' 和 μ'' 降低,但截止频率升高。Sung Soo Kim 等^[22]采用两步化学镀法(先敏化处理,再还原处理)在中空 SiO₂陶瓷微珠表面镀上一层 2 μm 厚的 Co-Fe 合金薄膜,密度仅为 0.8 g/cm³,将其添加到硅橡胶基体中,制成同轴样,采用 HP8722D 测试其散射参数 S₁₁ 和 S₂₁,并计算得出电磁参数和反射率。结果表明,当吸收剂添加量为 50%、厚度为 1.5 mm 时,在 X 波段能达到 -18 dB 的吸收,厚度为 2 mm 时在 C 波段能达到 -20 dB 的吸收。

二维磁性薄膜是当前电子信息材料领域的研究热点,也是功能材料从三维向低维材料发展的必然趋势,近年来以 Fe 基、Co 基为主体的高饱和磁化强度铁磁纳米晶及非晶膜、高电阻率纳米磁性颗粒膜的研究十分活跃,对其在 GHz 频段工作的要求是:具有尽可能高的饱和磁化强度,以提高初始磁导率;较高的电阻率 ρ ,有利于减小涡流损耗;适当的各向异性 H_k ,可控制截止频率 f_r ^[23–26]。尤其是 T-M-O(T 是过渡族元素 Fe、Co 等及其合金,在薄膜中呈颗粒型纳米晶相或非晶相,是软磁性的来源,M 是 Mg、Al、Zr、Hf、Si、稀土等,M-O 在膜中呈氧化物绝缘层,包围在磁性纳米颗粒周围,是高电阻的来源)系磁性颗粒膜以其较高的饱和磁感应强度 B_s 和超高的电阻率 ρ ,在电磁波吸收材料中具有重要的研究价值^[25]。例如采用溅射方法直接在产品或设备上成膜,附着力好、厚度薄、成膜均匀,不会产生像吸波涂料一样剥落、不均匀的问题,具有极高的研究价值。但是二维磁性薄膜的生产设备成本较高,产率较低,目前尚无工业应用,仅导电性薄膜得以生产应用。

2.4 二维片状磁性金属粉末

作为金属软磁材料,纯铁、硅钢、铁铝合金、坡莫合金(FeNi 系)、铁硅铝合金在电力电子通信等领域应用不断拓展,将磁性金属粉扁平化处理,尤其是其

厚度在趋肤深度以下时,添加到绝缘基体中均匀混合,能降低导电性,减少涡流损耗,在高频范围具有良好的吸波特性。

美国的 Walser R. M. 等^[8,27]使用高能球磨法制备了 Fe、Fe₈₃Si₁₇和 Fe₈₁Ni₁₉合金的二维片状纳米晶铁磁微粉,厚度能达到 0.4 μm。结果表明纳米晶粒之间的交换耦合相互作用可以大大增强材料的软磁性能,通过将 Snoek 极限关系式应用于具有强形状各向异性的扁平旋转椭球软磁颗粒材料,发现当扁平率在 10-10 000 时,其微波磁导率在 1-20 GHz 可提高 10-100 倍。韩国的 Sang Woo Kim 等^[28]将 FeAlSi 合金粉末机械球磨得到厚度为 2-3 μm,扁平率比较高的片状软磁性金属粉末,并与聚氯乙烯粘合剂以 80:20 的比例混合,制得薄片状试样。结果表明:该薄片状试样在射频范围具有良好的噪声抑制效果,在电磁波吸收领域具有广阔的应用前景。韩国的 Moon Suk kim 等^[29]对雾化技术制得的 FeSiCr 金属磁粉进行球磨处理 30 h,经扫描电镜观察其形貌由球状变为片状,孔隙率降低较多。分别将原始磁粉 A 和球磨后

片状磁粉 B 与硅橡胶复合,制得不同厚度的薄片状试样,采用 HP8510C 测试其复介电常数和复磁导率,并计算反射率。结果表明,球磨后片状试样的磁导率和介电常数均有较大提高,磁损耗峰值向低频移动,在 1.6 mm 厚度 1.85 GHz 处的最大反射率可达到 -8.7 dB。

由于二维片状磁性金属微粉的制备一般采用物理法,在磁性金属 Fe、Co、Ni 中添加非晶形成元素 Si、B、P 和纳米晶形成元素 Cu、Ag、Nb 等,经合金熔炼,熔体快淬或气体雾化制粉工艺,然后经高能球磨即机械合金化工艺可制备二维片状磁性金属非晶纳米晶微波吸收剂,可采用卧式磨、双向球磨技术等提高产率,也可与其他吸收剂进行复配、拓宽频带,工业化可行性较高,具有良好的应用前景。日本的 TDK 公司制得 BN 系列、BLS 系列、AM 系列和 RF 系列吸波贴片,磁导率实部能到 40 左右,虚部能达到 8 左右,且透过特性和吸收特性均较好。

综述四种纳米磁性金属电磁波吸收材料的优劣,如表 1 所示。

表 1 四种纳米磁性金属电磁波吸收材料的比较

Tab. 1 Comparison between four electromagnetic wave absorbers of nano-magnetic metals

种类	吸波效果	制备方法	优点	缺点
零维磁性金属 纳米颗粒	较好	物理方法:机械合金化,物理粉碎; 化学方法:回收+氢化处理,熔融纺丝技术+ 氢化歧化反应+氧化处理,溶胶凝胶法等	制备简单, 可产业化	颗粒易团聚, 分散困难
一维磁性金属 纳米线	研究较少	磁场热分解;模板合成法:PC 模板电沉积; AAO 模板电沉积;AAT 模板电沉积; 电子束刻蚀法;X 射线刻蚀法	制备可控性高, 与模板关系密切	制备方法复杂, 产业化程度较低
二维磁性薄膜	较好	真空蒸镀法;溅射成膜法;磁控管溅射, 四极等离子体溅射,对向靶材溅射, 离子束溅射,外延生长	不易剥落,制备可控,均匀, 种类多元,可层层复合	产业化成本较高
二维片状磁性 金属粉末	较好	雾化技术+高能球磨; 熔体快淬+球磨;卧式磨	制备方法简单, 可大规模生产	片状不够均匀,扁平率与 球磨时间及设备有关

3 结语

纳米磁性金属电磁波吸收剂种类繁多,不仅包括各种形貌的吸波材料,每一种又包含各种金属以及合金,通过研究开发出吸波性能较好的纳米磁性金属材料是一项艰巨的任务,以后的研究方向主要为:(1)对纳米磁性金属电磁波吸收剂的吸波理论进行深入的研究,以指导新型吸收剂的开发;(2)将多种吸收剂进行复合,以获得多波段具有吸收效果的理想材料;(3)研究新的微观制备方法,获得均匀、可靠性较好的吸收剂。

参考文献

[1] Itoh M, Nishiyama K, Shogano F, et al. Recycle of rare earth sintered magnet powder scraps as electromagnetic wave absorbers in gigahertz range[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 451: 507-509

[2] 张晓宁. Fe-Ni 软磁合金吸波材料的设计与制备[D]. 北京:北京工业大学, 2004

[3] 蒋丽钦, 沈双娟, 张健敏. 磁性纳米颗粒的磁特性研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 36-40

[4] 刘顺华, 刘民军, 董星龙. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2007

[5] 邓惠勇, 官建国, 高国华. 雷达用隐身吸波材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2003, 31(3): 4-6

- [6] 张宝砚. 蓝相聚合物[J]. 中国材料进展, 2009, 28(6):45-50
- [7] Andrey N L, Konstantin N R. High-frequency behavior of magnetic composites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321:2082-2092
- [8] Walser R M, Win W, Valanju P M. Shape-optimized ferromagnetic particles with maximum theoretical microwave susceptibility[J]. IEEE Trans. Magn., 1998, 34(4):1390-1392
- [9] Wu L Z, Ding J, Jiang H B, et al. Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 285:233-239
- [10] Liu J R, Itoh M, Jiang J Z, et al. A GHz range electromagnetic wave absorber with wide bandwidth made of FeCo/Y₂O₃ nanocomposites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 271:147-152
- [11] Sakai K, Asano N, Wada Y, et al. Composite electromagnetic wave absorber made of soft magnetic material and polystyrene resin and control of permeability and permittivity[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30:347-353
- [12] 胡珍叶. 金属磁性纳米颗粒复合材料的左手特性[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2007, 23(2):60-64
- [13] Lee G H, Huh S H, Jeong J W, et al. Processing of ferromagnetic iron nanowire arrays[J]. Scripta Materialia, 2003, 49:1151-1155
- [14] Motoyama M, Fukunaka Y, Sakka T. Electrochemical processing of Cu and Ni nanowire arrays[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2005, 584:84-91
- [15] Yang S G, Zhu H, Yu D L, et al. Preparation and magnetic property of Fe nanowire array[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 222:97-100
- [16] Zhu H, Yang S G, Ni G, et al. Study on magnetic property of Fe₁₄Ni₈₆ alloy nanowire array[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001, 234:454-458
- [17] Xue D S, Fu J L, Shi H G. Preparation and magnetic properties of Fe_{0.88-x}Co_xP_{0.12} amorphous nanowire arrays[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 308:1-4
- [18] 黄兰萍, 陈康华, 李晶磊, 等. Fe 磁性纳米线阵列的制备与微波吸收性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(3):480-483
- [19] 韩萍, 宋国君, 徐思亭, 等. 电化学模板法制备金属 Ni 纳米线阵列的研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2008, 23(2):81-85
- [20] Ikeda K, Kobayashi K, Fujimoto M. Multilayer nanogranular magnetic thin films for GHz applications[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(9):5395-5400
- [21] Sohn J C, Byun D J, Lim S H. Theoretical and experimental permeability spectra of nano-granular Co-Fe-Al-O films for GHz magnetoelastic device applications[J]. Phys. Stat. Sol., 2004, 201(8):1946-1950
- [22] Kim S S, Kim S T, Ahn J M, et al. Magnetic and microwave absorbing properties of Co-Fe thin films plated on hollow ceramic microspheres of low density[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 271:39-45
- [23] 邓联文, 江建军, 何华辉. 磁性薄膜及其复合结构高频特性研究进展[J]. 功能材料, 2004, 35(2):151-153
- [24] 邓联文, 江建军, 冯则坤, 等. FeCoB-SiO₂ 磁性纳米颗粒膜的微波电磁特性[J]. 物理学报, 2004, 53(12):4359-4363
- [25] 陆海鹏, 邓龙江, 陈良. GHz 高磁导率铁磁薄膜研究进展[J]. 功能材料, 2005, 36(6):813-815
- [26] 陈忠强, 葛世慧, 姚东升, 等. 纳米磁性颗粒膜(Fe₆₅Co₃₅)_x(SiO₂)_{1-x}的微结构和磁性[J]. 低温与真空, 2008, 14(2):78-81
- [27] Walser R M, Kang W. Fabrication and properties of microforged ferromagnetic nanoflakes[J]. IEEE Trans Magn, 1998, 34(4):1144-1146
- [28] Kim S W, Yoon Y W, Lee S J, et al. Electromagnetic shielding properties of soft magnetic powder-polymer composite films for the application to suppress noise in the radio frequency range[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 316:472-474
- [29] Kim M S, Min E H, Koh J G. Comparison of the effects of particle shape on thin FeSiCr electromagnetic wave absorber[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321:581-585

(编辑 李洪泉)