

FeCo 基磁芯螺线管巨磁阻抗效应与 磁芯长度关系的研究*

方允樟¹⁾²⁾ 许启明^{1)†} 郑金菊²⁾ 吕葆华³⁾ 潘日敏²⁾ 叶慧群²⁾ 郑建龙²⁾ 范晓珍²⁾

1) (西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 西安 710055)

2) (浙江师范大学数理与信息工程学院, 金华 321004)

3) (金华市科技情报研究所, 金华 321000)

(2010年9月3日收到; 2011年8月15日收到修改稿)

研究了 $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{Nb}_4\text{Si}_{4.8}\text{B}_{19.2}$ 合金薄带为磁芯的螺线管 (FeCo 基磁芯螺线管) 的巨磁阻抗效应与磁芯长度之间的关系. 研究表明, 磁芯长度是影响 FeCo 基磁芯螺线管巨磁阻抗效应的重要因素. 当磁芯长度小于螺线管长度时, 磁芯螺线管巨磁阻抗的最大值 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 与磁芯长度呈线性关系, 其线性相关系数可以根据电磁学理论推导得到; 当磁芯的长度大于螺线管的长度时, 由于漏磁作用, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 与磁芯长度的关系偏离了线性关系, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 与磁芯长度的关系曲线中有一个极值点, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 在极值点达到最大. 磁芯螺线管巨磁阻抗效应曲线的尖刺部分高度 $(\Delta Z/Z)_T$ 与磁芯长度的关系也有类似的极值点, $(\Delta Z/Z)_T$ 在极值点达到最大值. 磁芯螺线管巨磁阻抗效应曲线的尖刺部分对弱磁场敏感, 受磁芯退磁场的影响明显, 磁芯的退磁场与磁芯长度呈负指数关系.

关键词: 磁芯螺线管, FeCo 基合金薄带, 巨磁阻抗效应, 磁芯长度

PACS: 75.50. Bb, 75.20. En, 75.50. Gg

1. 引言

Mohri 等^[1-3] 发现 $(\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ 非晶丝的交流阻抗在较低的外加磁场作用下就会有明显的变化, 这种现象被称为巨磁阻抗 (giant magnetoimpedance, 简记为 GMI) 效应. 随后各国学者对 GMI 效应开展了广泛研究^[4-12], Phan 等^[13] 引用了 356 篇典型文献, 对各国学者关于 GMI 效应的研究工作进行了较全面的综述. 已有的研究表明, 基于 GMI 效应的磁敏传感器与传统的磁敏传感器相比, 具有多个方面的优势. 尽管 GMI 传感器的发展刚起步, 但低价格和高灵敏特性将保证其在不久的将来会有广泛的应用^[13]. 在众多研究工作中, 值得重视的是, 杨介信等^[14] 采用纵向驱动模式获得的 GMI 效应 (LDGMI 效应) 与文献 [1] 采用的驱动模式获得的 GMI 效应相比, LDGMI 效应的灵敏度又

提高了一个数量级. 但是, 这种具有更高灵敏度的 LDGMI 效应并未得到同行的足够重视, 世界上只有少数几个小组开展 LDGMI 效应的研究. 关于磁芯长度与 LDGMI 效应关系的研究, 作者至今未见有报道, 然而这是利用 LDGMI 效应开发新型磁敏传感器时需要考虑的一项重要内容. 本文较系统地研究了 $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{Nb}_4\text{Si}_{4.8}\text{B}_{19.2}$ 合金薄带为磁芯的螺线管 (FeCo 基磁芯螺线管) 的 LDGMI 效应与磁芯长度之间的关系, 研究结果对于 GMI 磁敏传感器的研发具有重要的现实意义.

2. 实验

采用单辊快淬法制备宽度为 0.2 mm, 厚度为 45 μm 的 FeCo 基非晶薄带. 截取长度为 100 mm 的非晶薄带, 在氮气保护下通以电流密度为 32 A/mm^2 的直流电退火 10 min. 然后截取长度 l 分别为 6, 9, 12, 14, 18, 20, 25 和 30 mm 经电流退火的 FeCo 基

* 国家自然科学基金 (批准号: 50871104, 11079029)、浙江省自然科学基金 (批准号: Y4080324) 和陕西省自然科学基金 (批准号: SJ08E101) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xuqiming723@163.com

薄带制成长度 l 不同的磁芯,将不同长度的磁芯分别置入直径为 0.3 mm,长度为 11 mm(100 匝)的螺线管内构成磁芯螺线管.将磁芯螺线管置于直径为 20 cm 的 Helmholtz 线圈中,且使两者同轴.为了减小地磁场的影响,Helmholtz 线圈的轴向与地磁场方向垂直.在 Helmholtz 线圈产生的直流磁场作用下,用 4294A 型阻抗仪分别测量充有不同长度磁芯的螺线管阻抗.测量过程中,螺线管通有幅值为 10 mA 的交流电.

LDGMI 定义为

$$\Delta Z/Z = \left(\frac{Z_{H_{ex}} - Z_{H_{max}}}{Z_{H_{max}}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中 $Z_{H_{ex}}$ 和 $Z_{H_{max}}$ 分别为在任意外加磁场 H_{ex} 和最大外加磁场 H_{max} 作用时的阻抗值.

图 1 所示为 FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应曲线,图中还标注了 LDGMI 最大值 $(\Delta Z/Z)_{max}$ 、曲线“尖刺”部分高度 $(\Delta Z/Z)_T$ 、基底部分高度 $(\Delta Z/Z)_F$ 和肩膀跨度 H_w 等特征参量.特征参量间存在如下关系:

$$(\Delta Z/Z)_F = (\Delta Z/Z)_{max} - (\Delta Z/Z)_T. \quad (2)$$

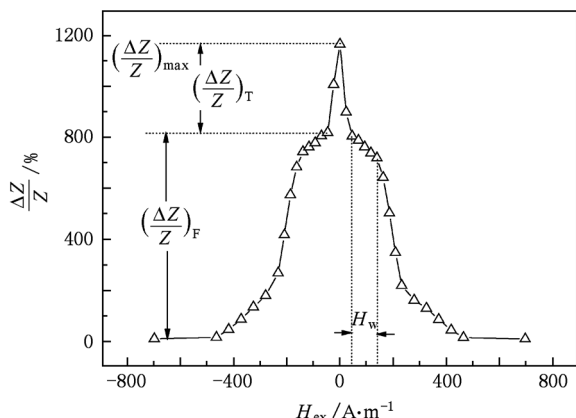


图 1 FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应曲线及特征参量

3. 结果及讨论

图 2 所示为磁芯长度 l 分别取 6,9,12,14 和 18 mm 时磁芯螺线管的 LDGMI 效应曲线,驱动电流频率 $f = 300$ kHz.由图 2 可见: $l = 6$ mm 时的 LDGMI 效应曲线顶部存在跨度为 930.2 A/m 的平台, $(\Delta Z/Z)_{max} = 151.8\%$,在曲线顶部未见有尖刺状突起部分;当 l 增加到 9 mm,平台基本消失, $(\Delta Z/Z)_{max}$ 增大到 520.2%,但曲线顶部仍未出现明显的“尖刺”;随着 l 进一步增加,LDGMI 效应曲

线顶部的尖刺状突起开始出现, $l = 12$ mm 时,“尖刺”部分高度 $(\Delta Z/Z)_T$ 达到 300.5%;当 l 继续增加到 18 mm 时,“尖刺”部分高度 $(\Delta Z/Z)_T$ 却下降到 280.4%.

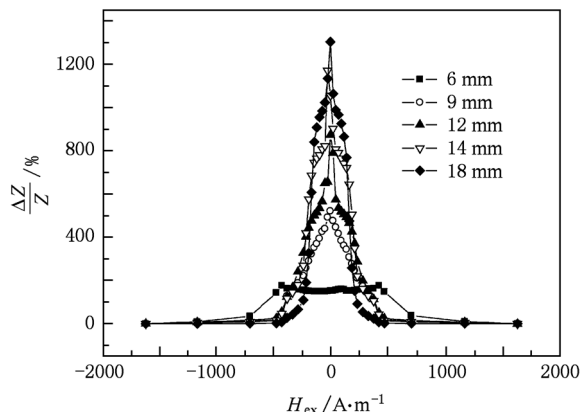


图 2 磁芯长度 l 分别为 6,9,12,14,18 mm 时的 FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应曲线

FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应曲线的 $(\Delta Z/Z)_{max}$ 与磁芯长度 l 间的关系如图 3 所示.由图 3 可见:当 l 从 6 mm 增加到 15 mm 时, $(\Delta Z/Z)_{max}$ 随着 l 的增加,以 $120\% \text{ mm}^{-1}$ 的斜率几乎呈线性地由 151.8% 上升到 1245.6%;随后,当 l 从 15 mm 继续增加到 20 mm 时, $(\Delta Z/Z)_{max}$ 则缓慢地下降,然后在大于 20 mm 范围内增加 l 时, $(\Delta Z/Z)_{max}$ 不再有明显的变化.

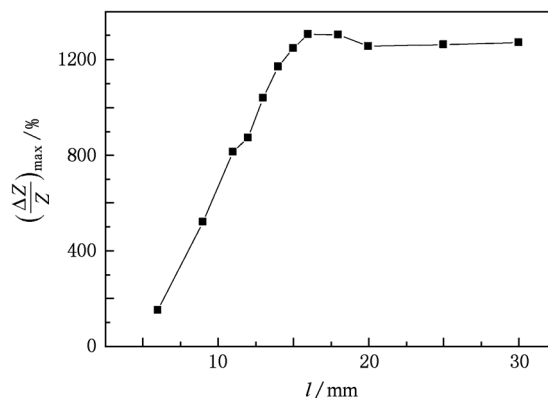


图 3 LDGMI 最大值 $(\Delta Z/Z)_{max}$ 与磁芯长度 l 的关系

图 4 示出了 $(\Delta Z/Z)_F$ 和 $(\Delta Z/Z)_T$ 与磁芯长度 l 间的关系.从图 4 可以看出: $(\Delta Z/Z)_F$ 除了在 l 接近螺线管长度 l_0 (11 mm) 处出现一个拐点外(这可能是由于漏磁作用所致),整体趋势是随着 l 的增加呈线性地提高.当 l 在 6—11 mm 和

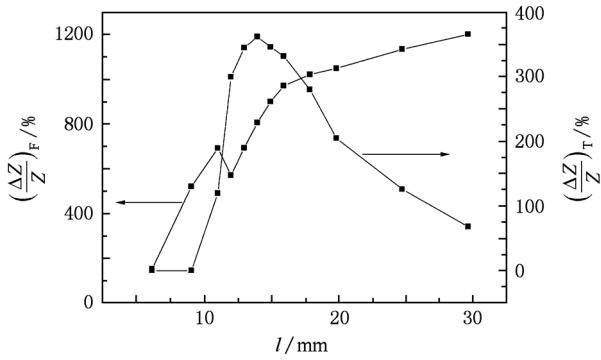


图4 LDGMI效应的 $(\Delta Z/Z)_F$ 和 $(\Delta Z/Z)_T$ 与磁芯长度 l 的关系

12—16 mm 范围内增加时, $(\Delta Z/Z)_F$ 增加的斜率为 $115\% \text{ mm}^{-1}$; 当 l 在 16—30 mm 范围内增加时, $(\Delta Z/Z)_F$ 增加的斜率约为 $16\% \text{ mm}^{-1}$. 而 $(\Delta Z/Z)_T$ 随 l 变化的曲线呈现一个峰值, 当 l 在 9—12 mm 范围内, 随着 l 的增加 $(\Delta Z/Z)_T$ 迅速增大, $l = 14 \text{ mm}$ 时 $(\Delta Z/Z)_T$ 达到最大值 362.5% , l 继续增加, $(\Delta Z/Z)_T$ 则缓慢减小. 由此可见, 在本实验条件下 l 存在一个最佳值, 当 l 取最佳值 $l_{\text{best}} = 14 \text{ mm}$ 时, $(\Delta Z/Z)_T$ 为最大值.

图 5 中的数据点是磁芯长度 l 取不同值时 FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应曲线肩膀跨度 H_w 的实验值. 由此可见, H_w 随着磁芯长度 l 的增加单调下降, 先是由 $l = 6 \text{ mm}$ 时的 465.1 A/m 迅速下降到 $l = 11 \text{ mm}$ 时的 165 A/m , 然后随长度增加缓慢减小, 直到 $l = 30 \text{ mm}$ 时的 64.7 A/m . 图 5 的曲线是根据下式拟合所得:

$$H_w = H_{w0} + A \exp(-l/t). \quad (3)$$

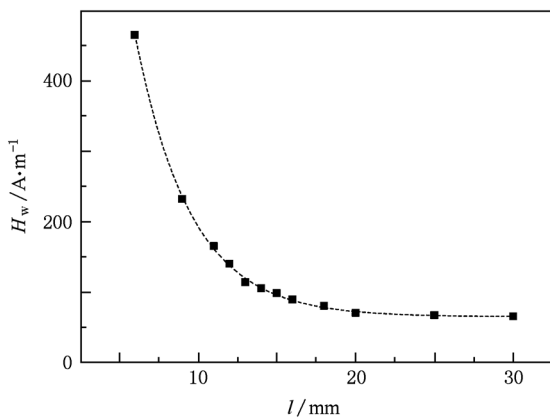


图5 FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应曲线的 H_w 与磁芯长度 l 的关系

经拟合, $H_{w0} = 65.01 \pm 1.57$, $A = 2207.70 \pm 64.74$, $t = 3.51 \pm 0.06$. 拟合曲线与实验数据的符合度为 0.9989.

以上实验结果表明, FeCo 基磁芯螺线管的 LDGMI 效应与磁芯长度 l 有灵敏的关系. 首先, l 的变化能灵敏地影响 $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$. 当 $l = 1.36l_0$ 时, $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$ 达到最大值, $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$ 达到最大值之前, 随着 l 的增加, $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$ 以 $120\% \text{ mm}^{-1}$ 的斜率几乎呈线性升高; $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$ 获得最大值之后, 随着 l 的增加, 则是呈非线性下降. 其次, $(\Delta Z/Z)_T$ 与 l 关系密切. 当 $l = 1.27l_0$ 时, $(\Delta Z/Z)_T$ 达到最大值, 当 l 在 $0.9l_0 - 1.27l_0$ 范围内增加时, $(\Delta Z/Z)_T$ 迅速增大, 在 $(\Delta Z/Z)_T$ 达到最大值之后, 继续增加 l 则使 $(\Delta Z/Z)_T$ 下降. 再者, $(\Delta Z/Z)_F$ 除了在 $l = l_0$ 处出现一个拐点外, 整体趋势是随着 l 的增加呈线性升高, 当 l 在 6—11 mm 和 12—16 mm 两个范围内增加时, $(\Delta Z/Z)_F$ 随着 l 增加的斜率约为 $115\% \text{ mm}^{-1}$, 当 l 在 16—30 mm 的范围内增加时, $(\Delta Z/Z)_F$ 随着 l 增加的斜率为 $16\% \text{ mm}^{-1}$. 另外, FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应曲线的肩膀跨度 H_w 随着磁芯长度 l 的增加单调下降, 通过对实验曲线的拟合得知, H_w 与 l 为负指数关系.

根据电磁学原理可得磁芯螺线管的阻抗 Z , 即

$$Z = R_s + jL_s, \quad (4)$$

式中 R_s 为螺线管的总电阻, L_s 为磁芯螺线管的总电感. (4) 式中螺线管的总电阻 R_s 由螺线管的直流电阻 R_c 和磁芯涡流损耗 R_m 组成, 即

$$R_s = R_c + R_m. \quad (5)$$

磁芯涡流损耗 R_m 可以根据电感应原理解. 由于螺线管产生的是交变磁场, 使得通过磁芯的磁通量也是交变的, 交变的磁通量导致磁芯在垂直交变磁场方向 (即沿磁芯薄带横向) 产生感应电流, 亦即产生了环绕磁芯薄带轴向的涡流. 由于磁芯薄带为导体, 涡流在导体中将产生焦耳热. 涡流产生的焦耳热即以直流电阻的形式反映在磁芯螺线管的阻抗中. 设单位长度磁芯涡流损耗电阻为 r , 则长度为 l 的磁芯的涡流电阻为

$$R_m = rl. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式可得

$$R_s = R_c + rl. \quad (7)$$

(4) 式中, 磁芯螺线管的总电感 L_s 是螺线管空芯部分电感 L_0 与含磁芯部分电感 L_m 的总和, 即

$$L_s = L_0 + L_m, \quad (8)$$

则有

$$Z = (R_c + rl) + j(L_o + L_m). \quad (9)$$

根据电磁学原理,螺线管空心部分的电感量为

$$L_o = \mu_0 N_o^2 S / l_o, \quad (10)$$

式中 μ_0 为真空磁导率, S 为螺线管的截面积, N_o 为螺线管空心部分的线圈匝数, l_o 为螺线管空心部分的长度. 充有磁芯部分的螺线管的电感量为

$$L_m = \mu_0 N_m^2 (S - S_m) / l + \mu_0 \mu_r N_m^2 S_m / l \\ = \mu_0 N_m^2 [(S - S_m) + \mu_r S_m] / l, \quad (11)$$

式中 μ_r 为磁芯相对磁导率, N_m 为螺线管含磁芯部分的线圈匝数, S_m 为磁芯截面积, l 为磁芯长度. 若螺线管的绕线密度为 n , 则(10)式可调整为

$$L_o = \mu_0 n^2 S l_o. \quad (12)$$

磁芯薄带的厚度为 a , 宽度为 b , (11)式可调整为

$$L_m = \mu_0 n^2 [(S - S_m) + \mu_r S_m] l \\ = \mu_0 n^2 [(S - ab) + \mu_r ab] l. \quad (13)$$

将(12)和(13)式代入(9)式可得

$$Z = (R_c + rl) + j\{\mu_0 n^2 S l_o + \mu_0 n^2 [(S - ab) \\ + \mu_r ab] l\}. \quad (14)$$

在以上推导中, 隐含了一项假设条件, 即磁芯长度 l 小于螺线管的长度, 设螺线管的长度为 l_o , 则有

$$l_o = l_o - l. \quad (15)$$

将(15)式代入(14)式并作适当整理可得

$$Z = R_c + rl + j\{\mu_0 n^2 (S - S_m) l_o \\ + \mu_0 n^2 [(\mu_r - 1) ab] l\}. \quad (16)$$

本文重点研究磁芯长度 l 与磁芯螺线管 LDGMI 效应之间的关系, 只有 l , r , μ_r 为变量, 其他参量都不变化. 因此(16)式可简写为

$$Z = R_c + rl + j[A + (B\mu_r - B)l], \quad (17)$$

式中

$$A = \mu_0 n^2 S l_o,$$

$$B = \mu_0 n^2 ab.$$

根据 LDGMI 定义(1)式, 可由(17)式得磁芯螺线管的磁阻抗变化为

$$\Delta Z = \Delta r l + jB\Delta\mu_r l. \quad (18)$$

本文研究 FeCo 基磁芯螺线管 LDGMI 效应与磁芯长度 l 的关系, 根据实验条件, (18)式可以进一步调整表达形式为

$$\Delta Z = \alpha l, \quad (19)$$

式中 $\alpha = \Delta r + jB\Delta\mu_r$ 称之为磁芯因子. 研究磁芯长度变化对磁芯螺线管 LDGMI 效应的影响时, (19)式中磁芯因子 α 可视为常数, 显然 ΔZ 与 l 呈线性

关系. 据此, 便容易理解图 3 所示在 $l < l_o$ 的范围内增加 l 时, 磁芯螺线管的 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 随磁芯长度 l 呈线性增加的实验结果.

以上推导过程未考虑磁芯螺线管的漏磁问题. 当磁芯长度 l 大于螺线管长度 l_o , 即 $l > l_o$ 时, 漏磁现象不能忽略, 此时(19)式需要修正为

$$\Delta Z = \alpha l_m - \beta(l - l_o), \quad (20)$$

式中 β 为漏磁因子. 漏磁因子的具体表现形式原则上可以根据安倍环路定理进行推导, 但在 LDGMI 磁敏传感器研究过程中一般不采用 $l > l_o$ 的情况, 因此研究漏磁因子的具体表现形式意义不大, 故本文从略.

根据(19)和(20)式便可理解图 3 和图 4 中 $(\Delta Z/Z)_{\max} - l$ 曲线和 $(\Delta Z/Z)_F - l$ 曲线的特征. 对于 $(\Delta Z/Z)_T - l$ 曲线的理解, 由于 $(\Delta Z/Z)_T$ 对弱磁场十分敏感, 需要考虑磁芯的退磁场.

图 5 示出了 $H_w - l$ 的关系曲线. H_w 综合体现了磁芯材料的磁各向异性场, 主要由两部分组成, 即

$$H_w = H_k + H_d. \quad (21)$$

这里 H_k 是与材料内部结构有关的磁各向异性场. H_k 由材料内部结构所决定, 此处只是材料的长度变化, 材料内部结构并不变化, 因此由磁各向异性结构所决定的 H_k 可视为常数. 对比(3)式可知,

$$H_d = A \exp(-l/t). \quad (22)$$

根据退磁场理论, 磁性材料被磁化时, 存在如下关系式:

$$H_d = -\gamma M, \quad (23)$$

式中 H_d 为退磁场, γ 为退磁因子, M 为磁化强度. 对比(22)和(23)两式, 可得

$$\gamma = A' \exp(-l/t), \quad (24)$$

式中

$$A' = -\frac{A}{M}.$$

由(22)式可知, FeCo 基磁芯的退磁场与磁芯长度 l 为负指数关系, 综合(19)和(22)式便可以理解图 4 所示的 $(\Delta Z/Z)_T - l$ 曲线.

4. 结 论

本文系统研究了 FeCo 基磁芯螺线管的 LDGMI 效应与磁芯长度 l 的关系. 研究结果表明: 磁芯长度 l 的变化会灵敏地影响磁芯螺线管的 LDGMI 效应. 在 $l < l_o$ 的范围内增加 l , 磁芯螺线管的 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 与 l 之间呈线性关系, 其线性相关系数可以根据电

磁学理论推导得到;当磁芯长度大于螺线管长度时,需要考虑漏磁因素, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 与 l 之间的关系偏离了线性关系. 当 $l = 1.36l_0$ 时, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 获得

最大值,而当 $l = 1.27l_0$ 时, $(\Delta Z/Z)_T$ 获得最大值. $(\Delta Z/Z)_T$ 对弱磁场敏感,受磁芯退磁场的影响,而磁芯的退磁场与磁芯长度 l 为负指数关系.

- [1] Mohri K, Kohzawa T, Kawashima K, Yoshida Y, Panina L V 1992 *IEEE Trans. Magn.* **28** 3150
- [2] Mohri K, Kawashima K, Kohzawa T, Yoshida Y 1993 *IEEE Trans. Magn.* **29** 1245
- [3] Mohri K, Bushida K, Noda M, Yoshida H, Panina L V, Vchiyama T 1995 *IEEE Trans. Magn.* **31** 2455
- [4] Vazquez M, Hernando A 1996 *J. Phys. D* **29** 939
- [5] Vazquez M 2001 *J. Magn. Magn. Mater.* **226—230** 693
- [6] Knobel M, Pirota K R 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **242—245** 33
- [7] Kraus L 2003 *Sens. Acta A* **106** 187
- [8] Liu L P, Zhao Z J, Huang C X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2014 (in Chinese) [刘龙平、赵振杰、黄灿星 2006 物理学报 **55** 2014]
- [9] Zhong Z Y, Lan Z W, Zhang H W, Liu Y L, Wang H C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1610 (in Chinese) [钟智勇、兰中文、张怀武、刘颖力、王豪才 2001 物理学报 **50** 1610]
- [10] Pan H L, Cheng J K, Zhao Z J, He J K, Ruan J Z, Yang X L, Yuan W Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3230 (in Chinese) [潘海林、程金科、赵振杰、何家康、阮建中、杨燮龙、袁望治 2008 物理学报 **57** 3230]
- [11] Yang Q M, Xu Q M, Yang Y, Fang Y Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1008 (in Chinese) [杨全民、许启明、杨 燮、方允樟 2008 物理学报 **57** 1008]
- [12] Yang Q M, Xu Q M, Fang Y Z, Mo C J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4072 (in Chinese) [杨全民、许启明、方允樟、莫婵娟 2009 物理学报 **58** 4072]
- [13] Phan M H, Peng H X 2008 *Prog. Mater. Sci.* **53** 323
- [14] Yang J X, Yang X L, Chen G, Jiang K Y, Shen G T, Hu B Y, Jin R P 1998 *Chin. Sci. Bull.* **43** 1050 (in Chinese) [杨介信、杨燮龙、陈 国、蒋可玉、沈国土、胡炳元、金若鹏 1998 科学通报 **43** 1050]

Investigation on the relation between the length of magnetic core and the giant magnetoimpedance effect of solenoid with FeCo-based magnetic core*

Fang Yun-Zhang¹⁾²⁾ Xu Qi-Ming^{1)†} Zheng Jin-Ju²⁾ Lü Bao-Hua³⁾ Pan Ri-Min²⁾ Ye Hui-Qun²⁾
Zheng Jian-Long²⁾ Fan Xiao-Zhen²⁾

1) (College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

2) (College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

3) (Institute of Science and Technology Information of Jinhua, Jinhua 321000, China)

(Received 3 September 2010; revised manuscript received 15 August 2011)

Abstract

The relation between the length of the magnetic core (l) and the giant magnetoimpedance (GMI) effect of solenoid with magnetic core of $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{Nb}_4\text{Si}_{4.8}\text{B}_{19.2}$ ribbon which annealed with current 32 A/mm^2 for 10 min, has been investigated. The result shows that there is a sensitive relation between l and GMI. There is a linear relation between the l and the maximum of the GMI $(\Delta Z/Z)_{\max}$ when l is smaller than the length of the solenoid l_0 . The linear correlation coefficient can be deduced from the electromagnetism theory. It should deviate from the linear relation when l is greater than l_0 . There is a maximum value of the $(\Delta Z/Z)_{\max}$ when the l reaches the best value. There is a similar relation between the height of the tip like part of the GMI profile $(\Delta Z/Z)_T$ and l . There is a maximum value of the $(\Delta Z/Z)_T$ when the l is the best value. The tip like part of the GMI profile, which responds to the weak magnetic field sensitively, is influenced by the demagnetizing field. There is a negative exponential relation between the demagnetizing field and the length of the magnetic core l .

Keywords: solenoid with magnetic core, FeCo-based ribbon, giant magnetoimpedance effect, length of magnetic core

PACS: 75.50.Bb, 75.20.En, 75.50.Gg

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50871104, 11079029), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. Y4080324), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. SJ08E101).

† Corresponding author. E-mail: xuqiming723@163.com