

铁磁/非铁磁/铁磁层状薄膜的 巨磁阻抗效应的计算^{*}

钟智勇 兰中文 张怀武 刘颖力 王豪才

(电子科技大学信息材料工程学院, 成都 610054)

(2000 年 12 月 25 日收到, 2001 年 3 月 23 日收到修改稿)

基于文献 [17] 和 [18] 提出的铁磁/非铁磁/铁磁层状薄膜的电磁模型, 详细研究了层状薄膜的巨磁阻抗增强效应, 以及磁性层和非磁性层厚度与层状薄膜的巨磁阻抗效应的关系. 分析表明, 铁磁层和非铁磁层薄膜的电阻率相差越大, 越有利于获得显著的巨磁阻抗效应. 对于总厚度要求一定的层状薄膜, 铁磁层和非铁磁层薄膜存在一最佳厚度.

关键词: 巨磁阻抗效应, 磁性薄膜, 趋肤效应

PACC: 7550K, 7570, 7540G

1 引 言

巨磁阻抗效应 (giant magneto-impedance effects, 缩写为 GMI) 是指铁磁材料的交流阻抗随外加直流场的改变而快速响应、高灵敏度的变化特性. GMI 效应在信息记录和高灵敏度微型磁传感器等领域具有极大的应用前景, 是当今磁电子学领域的研究热点之一.

最早报道发现 GMI 效应的是日本名古屋大学的 Mohri 等^[1], 由于其巨大的应用前景, 很快引起了世界各国学者的广泛关注. 随后, 对非晶 Co 基和纳米晶 Fe 基丝带的巨磁阻抗效应进行了广泛而深入的理论和实验研究. 随着器件向小型化、集成化方向的发展, 越来越多的器件需要薄膜化, 铁磁薄膜中的 GMI 效应的研究也引起了广泛注意^[2-15]. 研究表明, 在几 μm 的铁磁薄膜中要出现显著的 GMI 效应都需在近百 MHz, 甚至更高的频率的交流激励电流. 这是由于在频率较低时, 其趋肤效应很弱的缘故. 而最近在铁磁/非铁磁/铁磁多层薄膜或铁磁/绝缘/非铁磁/绝缘/铁磁结构薄膜中却发现出现显著 GMI 效应的频率下降到了十来 MHz, GMI 效应得到了极大的增强^[6-8, 13], 这极有利于应用. 本文基于铁磁薄膜和非铁磁薄膜的直接接触和高频电流在层状薄膜中的重

新分布, 建立铁磁/非铁磁/铁磁层状薄膜的电磁模型, 从 Maxwell 磁矢量势方程出发, 导出层状薄膜的阻抗表达式. 最后, 解析分析层状薄膜的结构参量与其巨磁阻抗效应的关系.

2 计算模型

2.1 单层铁磁薄膜和铁磁/非铁磁/铁磁层状薄膜的阻抗计算

对于单层铁磁薄膜而言, 其阻抗为^[16]

$$Z = R_{dc} \cdot jka \cot(k a), \quad (1)$$

其中

$$k = (1 + j)\delta, \quad \delta = \sqrt{2/\omega\sigma\mu_t}, \quad (2)$$

式中 R_{dc} 是铁磁薄膜的直流电阻, σ 是电导率, μ_t 是切向磁导率 (以外加激励交流电流于薄膜难磁化轴为参考方向, 垂直于交流电流的方向, 称为切向, 以下同此含义), ω 是激励电流的角频率, δ 是趋肤效应深度.

对于铁磁/非铁磁/铁磁层状薄膜, 基于铁磁薄膜和非铁磁薄膜的直接接触和高频电流在层状薄膜中的重新分布, 采用文献 [17, 18] 的电磁模型, 计算其阻抗. 图 1 示出了其截面图. 条带导体膜用“0”表

^{*} 信息产业部电子科学研究院预研基金 (批准号: DJ7.1.6.2) 资助的课题.

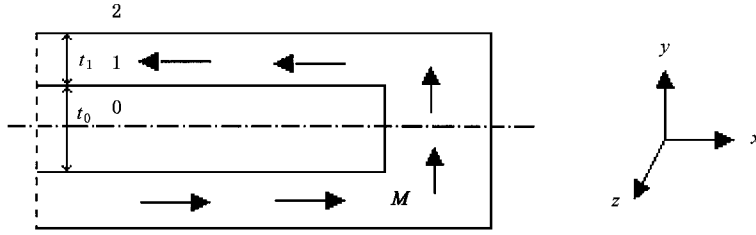


图1 层状薄膜的截面图

示, 磁性薄膜用“1”表示, 导体长度为 L , 宽度为 w . 导体的厚度、电导率、磁导率分别为 t_0, σ_0, μ_0 , 铁磁薄膜层的厚度、电导率、磁导率分别为 $t_1, \sigma_1, \mu_1 = \mu_r \mu_0$, 其中 μ_0 是自由空间的磁导率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$), μ_r 是磁性薄膜的相对磁导率. 层状外的空间用“2”表示, 其磁导率 $\mu_2 = \mu_0$.

在导体层和磁性层中, 库仑规范下的矢量势和标量势的 Maxwell 方程为^[17]

$$\nabla^2 A_k(\mathbf{r}, t) = \mu_k \sigma_k [\nabla \varphi_k(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t} A_k(\mathbf{r}, t)],$$

$$\nabla^2 \varphi_k(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (3)$$

式中 $k=0, 1$ 分别对应于“0”和“1”区域. 在(3)式中, 假设了导体中的位移电流可以忽略. 由于在磁性层/空气界面的垂直方向电流为零, 所以 $d\phi/dz = V/L = -E_z$, $d\phi/dx = d\phi/dy = 0$. 激励电流产生的电场产生 $E_z(t)$ 分量, 使得矢量磁势也有 $A_z(t)$ 分量. 对于我们研究的层状, 存在 $L \gg w$, 所以在 z 轴方向的平移对称性使得求解的问题成为在 (x, y) 平面的二维问题. 在磁性层中, 其 $\mu_r \gg 1$, 其 y 方向的磁感应强度

很小, 即 $B_y = -\partial A / \partial x \ll B_x$, 所以可以进一步将所讨论的问题简化为一维问题. 假设激励电场与时间呈简谐关系, 即 $E_z(t) = E e^{i\omega t}$, 其中 E 为电场的幅度. 那么矢量磁势的稳态解的形式为 $A_z(t) = A(y) e^{i\omega t}$, 其中 $A(y)$ 为待求幅度. 为了清楚起见, 在下面将用 A 表示矢量磁势的 z 方向分量, 下标 k 表示所求解的区域. 根据讨论, 存在

$$\frac{d^2}{dy^2} A_k = \alpha_k^2 A_k - \mu_k \sigma_k E, \quad (4)$$

其中

$$\alpha_k = (1 + i) \delta_k, \quad \delta_k = \sqrt{2 / \omega \mu_k \sigma_k}, \quad (5)$$

$\delta_{k=0,1}$ 分别是导体膜和磁性膜的趋肤深度, $\mu_1 = \mu'_1$, 即薄膜的切向磁导率^[16]. 通过求解(5)式, 并利用层状薄膜的阻抗等于电压和总电流之比, 即

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{LE}{\int_s J dy} = \frac{LE}{2w} \left(\int_0^{t_0/2} J_0(y) dy + \int_{t_0/2}^{t_1} J_1(y) dy \right)^{-1}, \quad (6)$$

进而得层状薄膜的阻抗为

$$Z = \frac{l}{2w} \left\{ \frac{1 + \beta \tanh(\alpha_0 t_0/2) \tanh(\alpha_1 t_1) + \frac{w \mu_0 \alpha_1}{\pi \mu_1} \left[1 + \ln \frac{2l}{w} \right] [\beta \tanh(\alpha_0 t_0/2) + \tanh(\alpha_1 t_1)]}{\frac{\sigma_0}{\alpha_0} \tanh(\alpha_0 t_0/2) + \frac{\sigma_1}{\alpha_1} \tanh(\alpha_1 t_1)} \right\}, \quad (7)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu_1 \sigma_0}{\mu_0 \sigma_1}}. \quad (8)$$

2.2 薄膜的切向磁导率计算

上面的推导及大量的实验和理论证明, 磁性薄膜的阻抗的变化与其切向磁导率有着密切的联系. 考虑单轴各向异性位于易轴方向的铁磁薄膜, 当外加直流场 H_{ext} 沿难磁化轴方向上时, 假设此时的磁化机理以畴转磁化过程为主, 可以利用 Landau-Lifshitz 方程求得其切向磁导率 μ_t 与 H_{ext} 的关系^[19]

$$\mu_t \approx \frac{4\pi M_s \omega_k^2}{H_k} \left\{ \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) - j4\pi\lambda\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (4\pi\lambda\omega)^2} \right\} \cos^2 \phi_0, \quad (9)$$

式中

$$\omega_0^2 = \omega_k^2 \left\{ \cos 2\phi_0 + \frac{H_{\text{ext}}}{H_k} \sin 2\phi_0 \right\},$$

$$\omega_k^2 = 4\pi |\gamma|^2 M_s H_k. \quad (10)$$

(9) 和 (10) 式中, 各符号的含义是: H_k 是单轴各向异性场, M_s 是饱和磁化强度, ϕ_0 是平衡态时磁化强度偏离易轴的角度, λ 是阻尼系数, γ 是旋磁化, ω 是

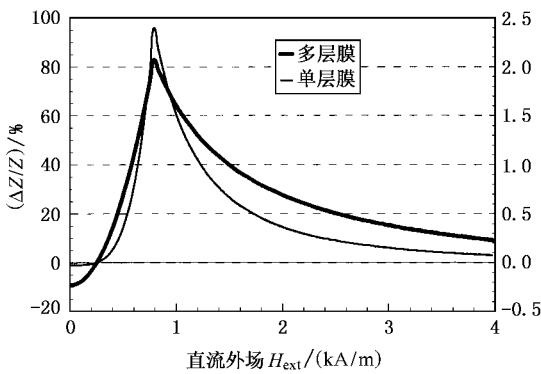
激励电流角频率.

3 计算结果与分析

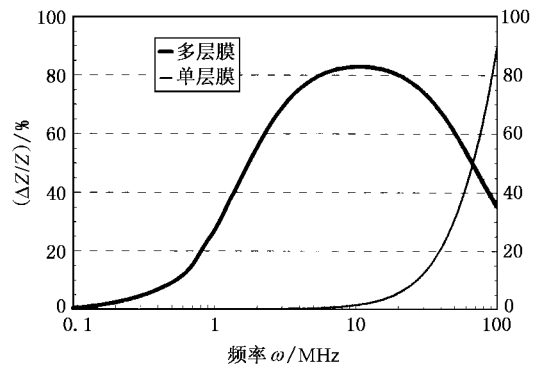
3.1 层状薄膜的巨磁阻抗增强效应

利用(8)式,我们计算层状薄膜的阻抗效应的场频特性,为了便于比较,同时用(1)式计算了单层薄膜阻抗效应的场频特性.计算采用的参量如下:饱和磁化强度为 $M_s = 6.3 \times 10^5 \text{ A/m}$,切向各向异性场为

$H_k = 796 \text{ A/m}$,激励电流频率为 $f = 10 \text{ MHz}$,铁磁层薄膜的电阻率为 $\rho_{\text{Fe}} = 130 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,厚度为 $d_{\text{Fe}} = 2 \mu\text{m}$,非铁磁(Cu)的电阻率为 $\rho_{\text{Cu}} = 130 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,厚度为 $d_{\text{Cu}} = 3 \mu\text{m}$.在计算单层薄膜的阻抗效应时,铁磁薄膜的厚度为 $4 \mu\text{m}$.计算结果如图2所示,图2(b)的阻抗变化值 $(\Delta Z/Z)(\%)$ 取量大值,而 $(\Delta Z/Z)(\%) = (Z(H_{\text{ext}}) - Z(H_{\text{max}}))/Z(H_{\text{max}}) \times 100\%$, $H_{\text{max}} = 8000 \text{ A/m}$, H_{ext} 是直流外场.



(a)为场特性



(b)为频率特性

图2 层状薄膜与单层薄膜的 GMI 效应比较

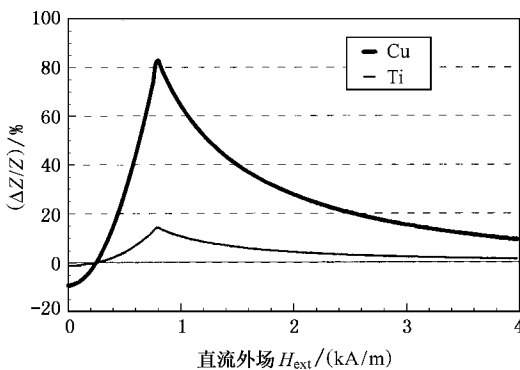
从图2可以看出,在同样频率下,与具有同样铁磁薄膜厚度的单层薄膜比较,层状薄膜的阻抗效应得到极大的提高,其阻抗的最大变化值,单层薄膜 $(\Delta Z/Z) = 2.4\%$,层状薄膜 $(\Delta Z/Z) = 82.9\%$,阻抗效应增加约40倍,而且在这两种情形,在阻抗最大变化值附近,GMI效应的灵敏度最高.从其频率特性看,对层状薄膜其出现最大值的频率下移至 10 MHz ,这可以在应用 GMI 效应时,简化外围电路,降低高频噪声的影响^[13,14],有利于 GMI 效应的应用.

3.2 非铁磁层对层状薄膜的影响

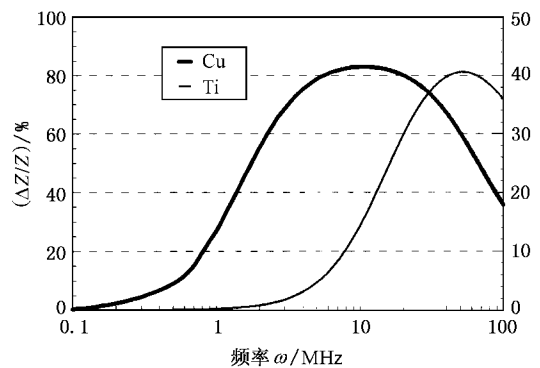
层状薄膜的 GMI 效应较单层薄膜得到极大的增强,重要的原因就在于引入了非铁磁层.所以,显而易见,非铁磁层对层状薄膜的 GMI 效应有重要的影响.本节将就非铁磁层的电阻率和厚度对层状薄膜的 GMI 效应影响进行讨论.

A. 非铁磁层的电阻率与层状薄膜 GMI 效应的关系

非铁磁层选 Cu 和 Ti,其电阻率分别为 $\rho_{\text{Cu}} = 1.72 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, $\rho_{\text{Ti}} = 47.8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.其它计算参量同上.计算结果如图3所示.



(a)为场特性



(b)为频率特性

图3 非铁磁层电阻率与层状薄膜 GMI 效应的关系

计算结果表明,如在同样条件下,用 Cu 作非铁磁层时,其阻抗变化的最大值为 82.9%,而以 Ti 作非铁磁层时,其阻抗变化的最大值只有 14.3%,相差将近 6 倍,可见非铁磁层的电阻率越小,越有利于 GMI 效应的提高.而且从图 3 中还可以看出,用 Cu 作非铁磁层时,其阻抗效应的最大值出现在 10MHz,较用 Ti 作非铁磁层对应的频率(50MHz),往低频段移动了不少.从上面的讨论我们还可以得到这样的启示,在 GMI 效应的实际应用中,可以根据应用频段的要求,合理选择非铁磁层材料,以满足实际需求.

B. 非铁磁层厚度对层状薄膜 GMI 效应的影响
趋肤效应是以厚度为基准来表征的,这里讨论非铁磁层厚度对层状薄膜 GMI 效应的影响.非铁磁层选用 Cu,铁磁层的厚度为 $3\mu\text{m}$,其他参量保持与前面一致,其计算结果如图 4 所示.从图 4 中知道,当非铁磁层 Cu 的厚度小于 $2\mu\text{m}$ 时,阻抗效应是随 Cu 的厚度增加而增加,从 $0.2\mu\text{m}$ 的 52.6% 增加到 $2\mu\text{m}$ 的 86.4%,当 Cu 层厚度大于 $2\mu\text{m}$ 后,层状薄膜的阻抗效应随 Cu 层厚度变化就不显著了.这说明在层状薄膜,对非铁磁层的厚度并不是越大越好.

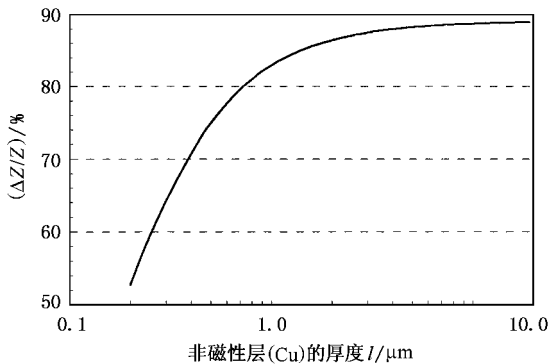


图 4 非铁磁层(Cu)的厚度与层状薄膜 GMI 效应的关系

3.3 磁层厚度对层状薄膜 GMI 效应的影响

在计算中,非铁磁层同样为 Cu,其厚度固定为 $2\mu\text{m}$,其他参量除铁磁层厚度外,均保持与前面一致.计算结果如图 5 所示.从图 5 中可以看出,与非铁磁层相比,铁磁层的厚度对层状薄膜的 GMI 效应有显著的影响,且存在一个最佳厚度,在这里大约为 $6\mu\text{m}$.当铁磁层厚度小于这个最佳厚度时,层状薄膜的 GMI 效应随着铁磁层厚度几乎是线性增长,从 $0.2\mu\text{m}$ 的 6.6% 变化到最佳值的 125%,变化率是相

当大的.可见在这个铁磁层厚度范围内,可以通过改变其厚度来控制阻抗效应.当铁磁层厚度大于最佳厚度后,随着厚度的增加,阻抗效应反而减小,当大于某个值后(这里对应的是 $15\mu\text{m}$),铁磁厚度对层状薄膜的 GMI 效应影响就很小了.

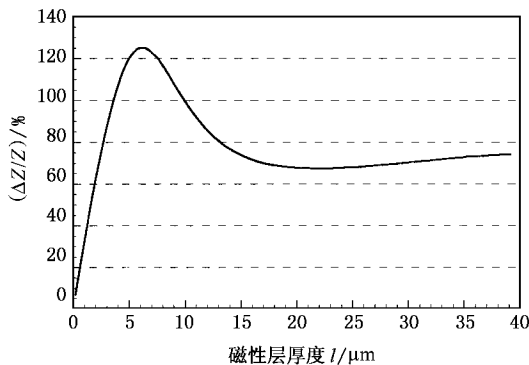


图 5 铁磁层厚度与层状薄膜的 GMI 效应的关系

3.4 铁磁和非铁磁厚度的优化

从上面讨论的知道,在层状薄膜中,铁磁和非铁磁层的厚度均对其 GMI 效应有影响.在实际情况下,制备的层状薄膜的厚度是有一定的限制的,这就造成如果铁磁层厚度增加,非铁磁层厚度就必然减小,由前面的讨论可知,这就存在一个优化厚度,使得其 GMI 效应最佳.特别是当薄膜的总厚度很小的时候,更应注意优化.在这里我们假设层状薄膜的总厚度为 $D = 4\mu\text{m}$,非铁磁导体层的厚度为 d_c ,我们计算了 d_c/D 之比与 GMI 效应的关系,如图 6 所示.图 6 中曲线 a, b, c 分别对应的频率为 1, 10 和 20MHz,其他计算参量与前面一致.从图 6 中可以看出,在不同的频率下, GMI 效应为最佳时对应的铁磁和非铁磁厚度是不相同的.在低频(1MHz), GMI 效应最佳对应的非铁磁厚度约为总厚度的二分之一,即 $2\mu\text{m}$.随着频率的提高,要取得好的 GMI 比值,就必须减小非铁磁层的厚度,增加铁磁层的厚度.总之,在给定频率下,为了得到更好的 GMI 效应,要做的工作至少包括:1) 材料性能的优化,选择软磁性能良好的材料,然后经过适当的处理满足获得显著 GMI 效应的要求;2) 结构的优化,对层状薄膜而言,就是控制铁磁和非铁磁层的厚度,当然还有它们的宽度,以及其他结构参量,通过优化设计,可使 GMI 效应达到最佳.

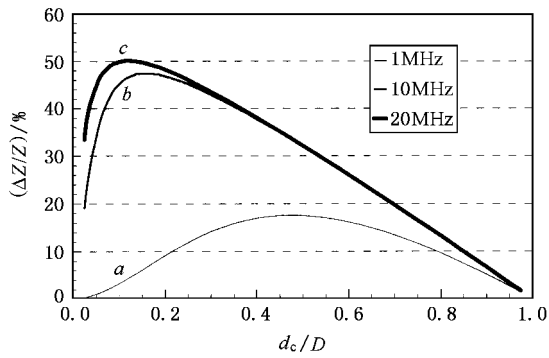


图 6 不同频率下 d_c/D 与层状薄膜的 GMI 效应的关系

4 结 语

本文基于文献 [17] 和 [18] 提出的铁磁/非铁磁/铁磁层状薄膜的电磁模型, 计算分析了单层薄膜和层状薄膜的巨磁阻抗效应, 结果表明由于采用多层结构, 层状薄膜的巨磁阻抗效应得到了极大增强. 深入讨论了磁性层和非磁性层厚度与层状薄膜的巨磁阻抗效应的关系, 分析表明, 铁磁层和非铁磁层薄膜的电阻率相差越大, 越有利于获得显著的巨磁阻抗效应. 对于总厚度要求一定的层状薄膜, 铁磁层和非铁磁层薄膜存在一最佳厚度.

[1] K. Mohri ,T. Kohzawa ,K. Kawashima *et al.* , *IEEE Trans. Magn.* , **28**(1992) , 3150.

[2] T. Uchiyama ,K. Mohir , *IEEE Trans. Magn.* , **31**(1995) , 3182.

[3] Z. Y. Zhong ,H. W. Zhang ,Y. L. Liu *et al.* , *Vac. Sci. Technol.* , **20**(2000) , 200 [in Chinese] 钟智勇、张怀武、刘颖力等 , *真空科学与技术* **20**(2000) , 200].

[4] M. Senda ,O. Ishii ,Y. Koshimoto *et al.* , *IEEE Trans. Magn.* , **30**(1994) , 4611.

[5] K. Hika ,L. V. Panian ,K. Mohri , *IEEE Trans. Magn.* , **32**(1996) , 4594.

[6] T. Morikawa ,Y. Nishibe ,H. Yamadera *et al.* , *IEEE Trans. Magn.* , **32**(1996) , 4965.

[7] T. Morikawa ,Y. Nishibe ,H. Yamadera , *IEEE Trans. Magn.* , **33**(1997) , 4367.

[8] A. Antonov ,S. Gadetsky ,A. Granovsky *et al.* , *Physica* , **A241**(1997) , 414.

[9] L. V. Panina ,K. Mohri ,T. Uchiyama , *Physica* , **A241**(1997) , 429.

[10] S. Q. Xiao ,Y. H. Liu ,L. Zhang *et al.* , *J. Phys. : Condens. Matter.* , **10**(1998) , 3651.

[11] M. Takezawa ,H. Kikuchi ,K. Suezawa *et al.* , *IEEE Trans. Magn.* , **34**(1998) , 1321.

[12] D. Garcia ,J. L. Munoz ,G. Kurlyandskaya *et al.* , *J. Magn. Magn. Mater.* , **191**(1999) , 339.

[13] H. Yamadera ,T. Morikawa ,Y. Nishibe *et al.* , *J. Magn. Soc. Japan* , **23**(1999) , 1445.

[14] K. L. Arai ,H. Ohdaira ,M. Baba *et al.* , *J. Magn. Soc. Japan* , **23**(1999) , 1617.

[15] S. Q. Xiao ,Y. H. Liu ,Y. Y. Dai *et al.* , *Acta Phys. Sin. (Supplement)* , **48S**(1999) 187 [in Chinese] 萧淑琴、刘宜化、代由勇等 , *物理学报(增刊)* **48S**(1999) , 187].

[16] L. V. Panina ,K. Mohri ,T. Uchiyama *et al.* , *IEEE Trans. Mag.* , **31**(1995) , 1249.

[17] A. Gromov ,V. Korenivsk ,K. V. Rao , *IEEE Trans. Magn.* , **34**(1998) , 1246.

[18] A. Gromov ,V. Korenivski ,D. Haviland , *J. Appl. Phys.* , **85**(1999) , 5202.

[19] A. Hosono ,Y. Shimada , *Japan. J. Appl. Magn.* , **12**(1988) , 295.

COMPUTATION ON GIANT MAGNETO-IMPEDANCE EFFECTS IN FERROMAGNETIC/NON-FERROMAGNETIC/ FERROMAGNETIC LAYERED THIN FILMS^{*}

ZHONG ZHI-YONG LAN ZHONG-WEN ZHANG HUAI-WU LIU YING-LI WANG HAO-CAI

(*Institute of Information Materials Engineering ,University of Electronic Science and Technology of China ,Chengdu 610054 ,China*)

(Received 25 December 2000 ,revised manuscript received 23 March 2001)

ABSTRACT

Based on the electromagnetic model of ferromagnetic/non-ferromagnetic/ferromagnetic layered films proposed in references [17] and [18], the enhanced giant magneto-impedance (GMI) effects and the GMI ratio dependence on the thickness of the constituent thin films are analyzed numerically in detail. It is shown that larger difference of resistivity between the ferromagnetic and non-ferromagnetic layers as well as an optimum thickness of the layered thin films are beneficial to the improvement of the GMI effects.

Keywords : giant magneto-impedance effect , magnetic thin films , skin effect

PACC : 7550K , 7570 , 7540G

^{*} Project supported by the Advance Research Foundation of Electronic Science Academy ,Ministry of Information Industry ,China(Grant No. D17.1.6.2).