

# Fe基合金薄带GMI效应与驱动线圈直径关系的研究

王丽梅, 王卓, 陆轩昂, 范晓珍, 叶慧群, 郑金菊, 方允樟\*

浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华  
Email: 7781777317@qq.com, \*fyz@zjnu.cn

收稿日期: 2021年1月23日; 录用日期: 2021年2月23日; 发布日期: 2021年3月2日

## 摘要

本文研究了Fe基( $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ )合金薄带为磁芯的驱动线圈的巨磁阻抗效应与驱动线圈直径之间的关系。结果表明, 驱动线圈的直径是影响Fe基磁芯驱动线圈巨磁阻抗效应的重要因素。驱动线圈直径越小, 巨磁阻抗效应越明显, 且随着驱动线圈直径的增大, 磁芯驱动线圈的最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 呈现指数性降低; 磁芯驱动线圈在低频时, 对频率的变化响应非常灵敏; 磁芯与驱动线圈的占空比与磁芯驱动线圈最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 之间存在指数增大关系。

## 关键词

磁性材料, 驱动线圈, 驱动频率, 巨磁阻抗效应, 占空比

## Study on the Relationship between the Giant Magneto-Impedance Effect of Fe-Based Alloy Strips and the Diameter of Drive Coil

Limei Wang, Zhuo Wang, Xuan'ang Lu, Xiaozhen Fan, Huiqun Ye, Jinju Zheng, Yunzhang Fang\*

College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang  
Email: 7781777317@qq.com, \*fyz@zjnu.cn

Received: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 王丽梅, 王卓, 陆轩昂, 范晓珍, 叶慧群, 郑金菊, 方允樟. Fe基合金薄带GMI效应与驱动线圈直径关系的研究[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(2): 35-40. DOI: 10.12677/jsta.2021.92005

## Abstract

The relationship between the giant magnetic-impedance effect and the diameter of drive coil with the Fe based ( $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ) alloy strips as the magnetic core is studied in this paper. The results show that the diameter of drive coil is an important factor affecting the giant magneto-impedance effect of Fe-based alloy strips. The smaller the diameter of drive coil is, the more obvious the giant magneto-impedance effect is. And the maximum impedance ratio  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  of the magnetic core drive coil decreases exponentially with the increase of the diameter of the magnetic core drive coil. When the magnetic core drive coil is at low frequency, the response to the change of the frequency is very sensitive. There is an exponential increase relationship between the cross-sectional area ratio of magnetic core to the drive coil and the maximum impedance ratio  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  of the magnetic core drive coil.

## Keywords

Magnetic Materials, Drive Coil, Driving Frequency, Giant Magneto-Impedance, Duty Cycle

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

Fe 基软磁合金是一种重要的磁性材料[1] [2] [3] [4]。早在 1992 年, Mohri 和 Panina [5]第一次在 Co 基非晶丝中发现了巨磁阻抗效应(指磁性材料的交流磁阻随着外加直流磁场的改变而发生变化的现象[6], 简称: GMI 效应)。由于 GMI 效应在室温和弱磁场可以实现明显的磁阻抗效应, 因此受到各国学者的广泛研究[7] [8] [9] [10]。众多的研究表明, 基于 GMI 效应的磁敏传感器相比于传统的磁敏传感器具有灵敏度高、响应速度快、易于微型化等优势[11]。Mohri 等人获得的巨磁阻抗效应指的是横向驱动巨磁阻抗效应, 后来杨介信、杨燮龙[12]等人则是根据 Fe 基纳米晶材料的易磁化方向(丝或薄带的轴向)测量磁性材料的 GMI 效应, 称作纵向驱动的巨磁阻抗效应(LDGMI 效应), 此种模式下测得的 GMI 效应具有较高的外场灵敏度。方允樟[13]等人研究了磁芯长度与 LDGMI 效应之间的关系, 本文则重点研究 Fe 基 ( $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ )合金薄带为磁芯的驱动线圈的 LDGMI 效应与驱动线圈直径之间的关系, 研究结果对 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 0.72 mm, 厚度为 30  $\mu\text{m}$  的 Fe 基( $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ )非晶薄带, 截取 150 mm 的非晶薄带, 在自由伸长状态下以 34 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的升温速率由室温升温至 540 $^{\circ}\text{C}$ , 保温 30 min, 再自然冷却至室温, 在整个退火过程中薄带始终处于自由伸长的状态, 最后退火得到 Fe 基纳米晶薄带。然后制备直径 D 分别为 0.9 mm、1.1 mm、1.9 mm、2.5 mm、3.0 mm、3.6 mm、4.5 mm、5.0 mm、7.4 mm 和 10.2 mm, 长度为 90 mm (100 匝)的驱动线圈, 测量过程中将退火得到的 Fe 基纳米晶薄带插入具有不同直径的驱动线圈内构成磁芯驱动线圈。将含有磁芯的驱动线圈置于直径为 200 mm 的 Helmholtz 线圈中, 保证 Helmholtz 线圈的轴向与地磁场垂直。在 Helmholtz 线圈产生的直流磁场作用下, 用 HP4294A 型阻抗分析仪测量具有不同直径的磁芯驱动线圈的阻抗。测量过程中, 阻抗分析仪为自制的驱动线圈提供 10 mA 的

交流电。

在此测量模式下得到磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗(LDGMI)效应, 图 1 为纵向巨磁阻抗测量的原理示意图, 其定义如下:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(H_{ex}) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \times 100\% \quad (1)$$

其中  $Z(H_{ex})$  和  $Z(H_{max})$  分别是外加磁场为任意值和最大值时的阻抗值。

占空比为磁芯横截面积与驱动线圈横截面积的比值:

$$\Psi = \frac{S_{mc}}{S_{dc}} \times 100\% \quad (2)$$

其中  $S_{mc}$  为磁芯的横截面积,  $S_{dc}$  为驱动线圈的横截面积。

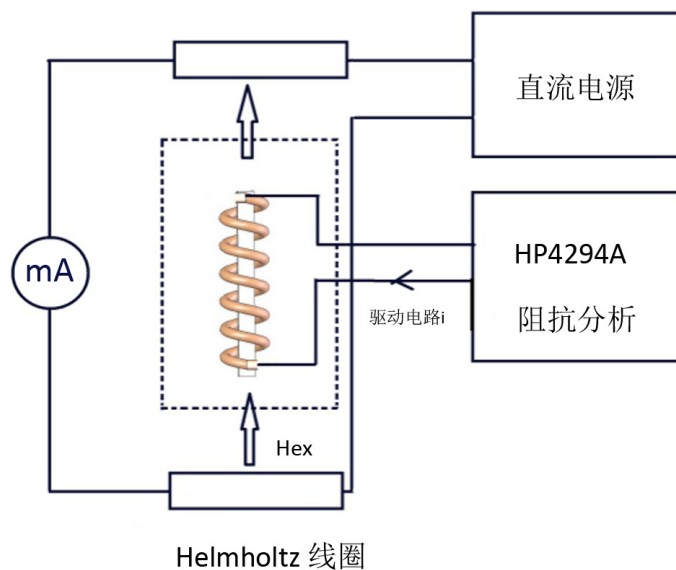


Figure 1. Schematic diagram of longitudinal giant magnetoimpedance measurement

图 1. 纵向巨磁阻抗测量原理图

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 不同直径磁芯驱动线圈的巨磁阻抗

图 2 为磁芯驱动线圈的直径分别取 0.9 mm、1.1 mm、1.9 mm、2.5 mm、3 mm、3.6 mm、4.5 mm、5.0 mm、7.4 mm 和 10.2 mm 时测得 Fe 基磁芯驱动线圈 LDGMI 的最大值  $(\Delta Z/Z)_{max}$  与驱动频率  $f$  之间的关系曲线。磁芯驱动线圈最大阻抗比  $(\Delta Z/Z)_{max}$  随着驱动频率的增大首先急剧上升达到一个峰值, 而后快速下降, 最后缓慢减小逐渐趋于稳定。随着驱动线圈的直径越小, 能够达到的峰值越大, 随着频率变化的趋势越明显。

Fe 基磁芯驱动线圈 LDGMI 效应曲线的最大阻抗比  $(\Delta Z/Z)_{max}$  与驱动线圈直径  $D$  的关系如图 3 所示, 驱动频率  $f$  分别为: 0.1 Mhz、0.4 Mhz、1.0 Mhz、1.5 Mhz 和 2.0 Mhz。由图可见, 驱动频率  $f=0.1$  Mhz, 当  $D$  从 0.9 mm 增加到 4.5 mm 时,  $(\Delta Z/Z)_{max}$  从 2272.67% 快速下降至 311.46%; 随后当  $D$  从 4.5 mm 继续增加到 7.4 mm,  $(\Delta Z/Z)_{max}$  缓慢从 311.46% 下降至 155.07%; 在  $D$  大于 7.4 mm 后,  $(\Delta Z/Z)_{max}$  不再有明显

的变化。对数据进行最小二乘法拟合，发现最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 都是随着直径  $D$  的增大呈指数下降，遵循下式(3)，驱动频率对磁芯驱动线圈的最大阻抗比的变化趋势没有明显的影响。在驱动频率为 0.1 Mhz 时，最大阻抗比可以达到 2272.67%，有较宽的变化范围。

$$(\Delta Z/Z)_{\max} = A \exp(-D/t) + (\Delta Z/Z)_{\max 0} \tag{3}$$

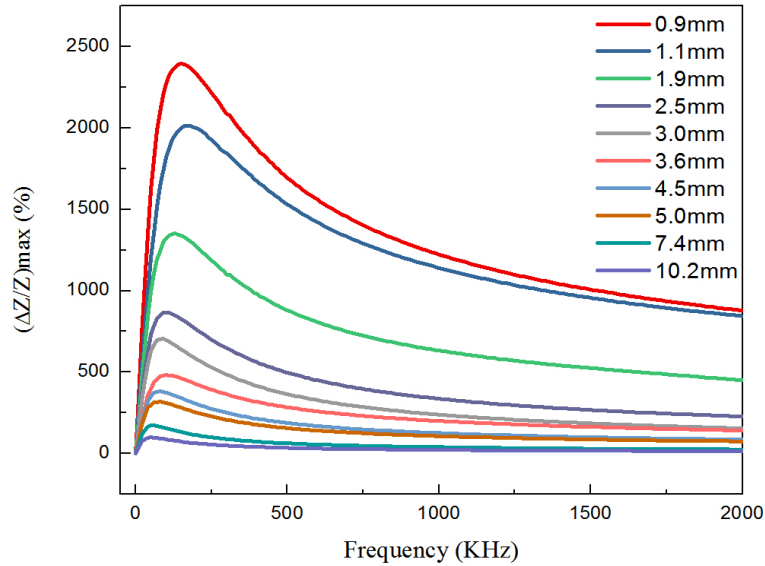


Figure 2. LDGMI the relationship between the maximum magnum impedance ratio and the driving frequency

图 2. LDGMI 的最大巨磁阻抗比与驱动频率的关系

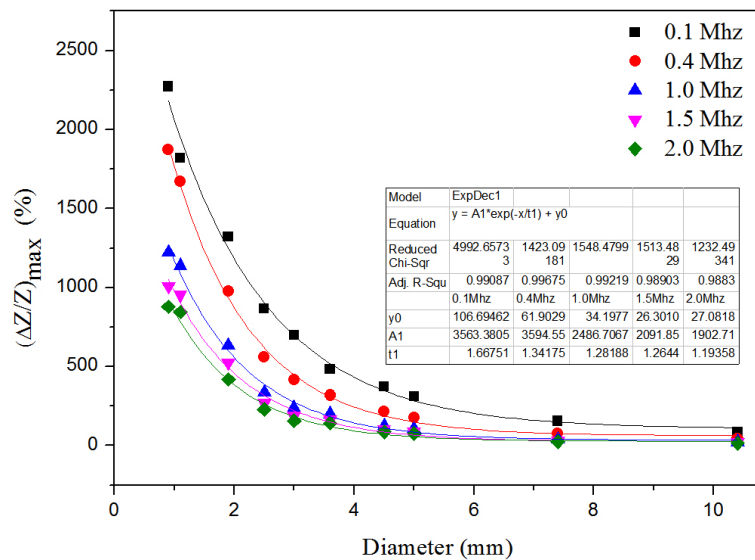


Figure 3. Relationship between the maximum magnum impedance ratio of the LDGMI and the diameter of the drive coil

图 3. LDGMI 最大巨磁阻抗比与驱动线圈直径的关系

### 3.2. 占空比对最大阻抗比的影响

图 4 为不同直径 Fe 基磁芯驱动线圈的 LDGMI 曲线，驱动频率  $f = 0.4$  Mhz (右上角的小图为直径为

5.0 mm, 7.4 mm, 10.2 mm 的 GMI 放大图)。由图 4 可见, 磁芯驱动线圈的 LDGMI 曲在弱磁场区域(0 A/m 磁场附近)呈现“针尖”状, 说明外加磁场发生微弱的改变时, 磁芯驱动线圈可以敏锐的感知, 驱动线圈的直径  $D = 0.9\text{ mm}$  时的 GMI 曲线的最大阻抗比达到最大, 对外磁场的响应灵敏度最高, 随着直径  $D$  的增大最大阻抗比  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  逐渐减小, 从而 Fe 基磁芯驱动线圈对外磁场的响应灵敏度减小。

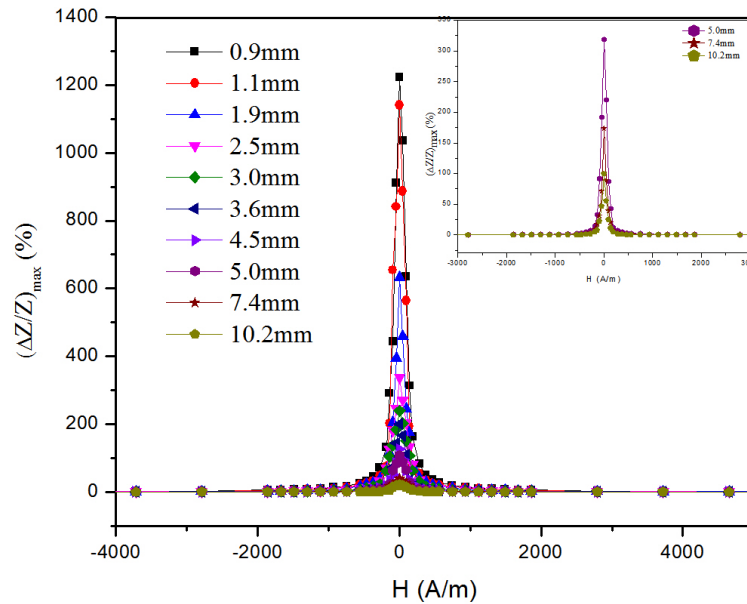


Figure 4. LDGMI curves of drive coils with different diameters

图 4. 不同直径磁芯驱动线圈的 LDGMI 曲线

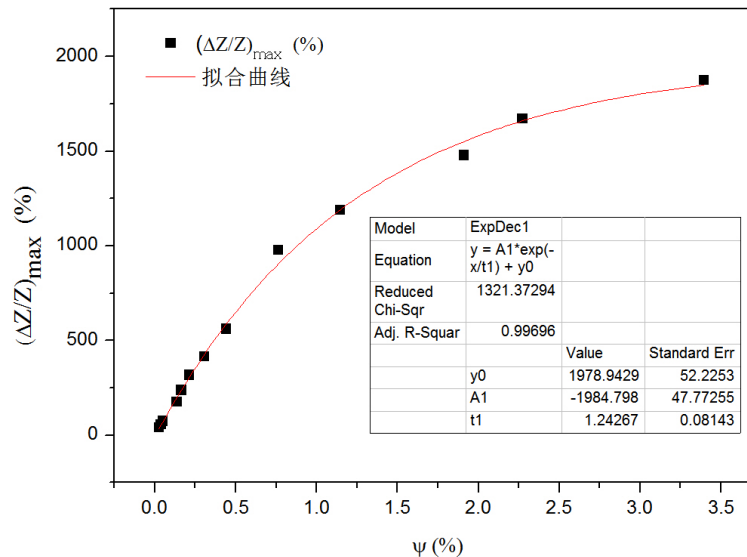


Figure 5. The relationship between the maximum giant magneto-impedance ratio of LDGMI and duty cycle

图 5. LDGMI 的最大巨磁阻抗比与占空比的关系

图 5 为 Fe 基磁芯驱动线圈 LDGMI 最大阻抗比  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  与占空比  $\Psi$  的关系, 驱动频率  $f = 0.4\text{ Mhz}$ 。占空比  $\Psi$  分别为 3.395%、2.273%、1.145%、0.762%、0.440%、0.306%、0.212%、0.164%、0.136%、0.050%、0.038% 和 0.026% 时的最大阻抗比为 1874%、1673%、1479%、1189%、979%、561%、416%、318%、238%、

177%、74%、56%和 41%。对数据进行最小二乘法拟合,发现 Fe 基磁芯驱动线圈 LDGMI 最大阻抗比  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  随着占空比  $\Psi$  的增大呈指数上升,磁芯的横截面积与驱动线圈的横截面积越接近时,  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  也就越高,关系式如(4):

$$(\Delta Z/Z)_{\max} = -1948.8 \times e^{-\Psi/1.24} + 1978.9 \quad (4)$$

其中  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  为 Fe 基磁芯驱动线圈 LDGMI 最大阻抗比,  $\Psi$  为占空比。

#### 4. 结论

本文通过改变驱动线圈的直径,研究 Fe 基磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗效应。结果表明: 1) 驱动线圈直径与 Fe 基磁芯驱动线圈 LDGMI 最大阻抗比关系式为:  $(\Delta Z/Z)_{\max} = A \exp(-D/t) + (\Delta Z/Z)_{\max 0}$ ; 2) 当驱动频率为  $f = 0.4$  Mhz, Fe 基磁芯驱动线圈 LDGMI 最大阻抗比与驱动线圈的占空比的关系为:  $(\Delta Z/Z)_{\max} = -1987.8 \times e^{-\Psi/1.24} + 1978.9$ 。

#### 基金项目

浙江省重点研发项目 2018C01G2031345; 国家自然科学基金项目 51771083。

#### 参考文献

- [1] Yoshizawa, Y., Oguma, S. and Yamauchi, K. (1988) New Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *Journal of Applied Physics*, **64**, 6044-6046. <https://doi.org/10.1063/1.342149>
- [2] Yoshizawa, Y. and Yamauchi, K. (1990) Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *Materials Transactions-Japan Institute of Metals*, **31**, 307-314. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.31.307>
- [3] Yoshizawa, Y. and Yamauchi, K. (1991) Magnetic Properties of Fe-Cu-M-Si-B (M = Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) Alloys. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, **133**, 176-179. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90043-M](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90043-M)
- [4] Tejedor, M., Hemando, B. and Sánchez, M.L. (1998) Magneto Impedance Effect in Zero Magnetostriction Nanocrystalline Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>16.5</sub>B<sub>6</sub> Ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **185**, 61-65. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00005-5)
- [5] Duwez, P., Willens, R.H. and Klement, W. (1960) Continuous Series of Metastable Solid Solutions in Silver-Copper Alloys. *Journal of Applied Physics*, **31**, 1136-1137. <https://doi.org/10.1063/1.1735777>
- [6] Pipka, P. (2008) Sensors Based on Bulk Soft Magnetic Materials: Advances and Challenges. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **320**, 2466-2473. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.079>
- [7] Vázquez, M. and Hernando, A. (1996) A Soft Magnetic Wire for Sensor Applications. *Journal of Physics D*, **29**, 939-949. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/4/001>
- [8] Vázquez, M. (2001) Giant Magneto-Impedance in Soft Magnetic "Wires". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **226**, 693-699. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00013-0)
- [9] Knobel, M. and Pirota, K.R. (2002) Giant Magnetoimpedance: Concepts and Recent Progress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **242**, 33-40. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)01180-5](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)01180-5)
- [10] Kraus, L. (2003) GMI Modeling and Material Optimization. *Sensors and Actuators A: Physical*, **106**, 187-194. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(03\)00164-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(03)00164-X)
- [11] Panina, L., Mohri, K., Bushida, K., et al. (1994) Giant-Magneto-Impedance and Magneto Inductive Effects in Amorphous Alloys. *Journal of Applied Physics*, **76**, 6198-6203. <https://doi.org/10.1063/1.358310>
- [12] 杨介信, 杨燮龙, 陈国, 等. 一种新型的纵向驱动巨磁阻抗效应[J]. 科学通报, 1998, 43(10): 1051-1053.
- [13] 方允樟, 许启明, 郑金菊, 等. FeCo 基磁芯螺线管巨磁阻抗效应与磁芯长度关系的研究[J]. 物理学报, 2011, 60(12): 539-544.