

# 纳米巨磁阻抗效应与磁敏传感器\*

杨燮龙<sup>1,2</sup> 杨介信<sup>1,2</sup> 戴文恺<sup>1,2</sup> 赵振杰<sup>1</sup> 马学鸣<sup>1</sup> 俞建国<sup>2</sup> 丁永芝<sup>2</sup>

(1 华东师范大学物理系, 上海 200062)

(2 华泰纳米磁敏器件研究所, 上海 200062)

**摘要:** 利用纳米微晶巨磁阻抗效应研制的一种新型磁敏传感器已被开发. 它与传统的磁通门、霍尔和磁电阻传感器相比具有灵敏度高、温度稳定性好、使用寿命长等优点, 已分别应用于汽车测速、电喷发动机点火和其他工业自动化控制等方面.

**关键词:** 巨磁阻抗效应; 磁敏传感器; 纳米微晶

**PACC:** 7550K; 7550B

**中图分类号:** O472 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)S0-0202-03

## 1 引言

巨磁阻抗效应是指磁性材料的交变阻抗随外磁场显著变化的效应. 1992 年日本名古屋大学 Mohri 首先在 Co 基非晶丝中观察到在几个奥斯特磁场下材料的阻抗变化  $\Delta Z/Z_0$  高达 50%, 比金属多层膜 Fe/Cu 或 Co/Ag 在低温、高场下观察到的巨磁阻效应高一个数量级, 因而被称为巨磁阻抗效应<sup>[1,2]</sup> (giant magneto-impedance effect).

近来, 人们还发现如果适当控制铁基纳米微晶材料的磁结构, 同样可观察到显著的巨磁阻抗效应, 并且在热稳定性和性价比上优于 Co 基非晶, 具有很强的竞争力. 由于巨磁阻抗效应组成的器件具有灵敏度高、体积小、响应快以及非接触等特点, 人们普遍认为它在磁传感器和磁记录方面具有十分诱人的应用前景.

## 2 基本原理

巨磁阻抗效应(GMI)与巨磁阻效应(GMR)在实验观察的结果极为相似, 即在外磁场作用下样品两端的电压发生变化. 但它们的物理机制存在着明

显的差别.

图 1 是用四探针法测定材料巨磁阻抗效应的示意图. 设样品长度为  $l$ , 半径为  $a$ , 当样品通频率为  $\omega$  的交变电流  $i = i_0 e^{i\omega t}$  时, 则阻抗表达式写为<sup>[3]</sup>

$$Z = R + jX = \frac{1}{2} R_{dc} \kappa a \frac{J_0(\kappa a)}{J_1(\kappa a)} \quad (1)$$

式中  $\kappa = \frac{1+j}{\delta_m}$ ;  $\delta_m = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\mu\sigma}}$  为趋肤深度;  $R_{dc} = \frac{l}{\pi a^2 \sigma}$  为样品直流电阻;  $J_0$  和  $J_1$  分别为零阶和一阶贝塞尔函数.

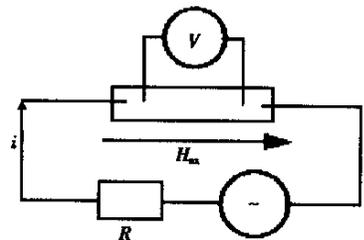


图 1 巨磁阻抗效应测试简图

Fig. 1 Measuring scheme for GMI effect

在高频情况下, 由于趋肤效应显著, 从(1)式可以看出, 样品的阻抗变化通过趋肤深度与材料的磁导率发生联系. 对于合适软磁材料, 当外磁场  $H_{ex}$  产

\* 上海市科委重点基金资助项目 (No. 0159nm058 和 99JC14017)

杨燮龙 男, 1940 年出生, 教授, 主要研究领域为穆斯堡尔谱学和纳米磁性材料及应用.

生一个很小的变动会引起磁导率  $\mu$  几个数量级的变化,从而使材料的交流阻抗发生明显的变化。

图 2 和图 3 分别显示了纳米微晶条带在不同热处理和测量条件下所观察到的磁阻抗  $\Delta Z/Z_0$  随外磁场变化的曲线<sup>[4,5]</sup>。

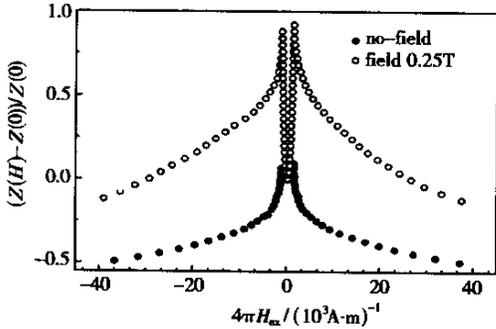


图 2 样品的磁阻抗谱

Fig. 2 Magneto-impedance spectra of samples

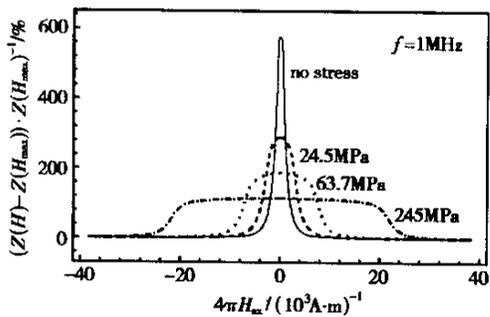


图 3 不同张应力退火纳米微晶样品的磁阻抗曲线

Fig. 3 Magnetic-impedance curves for nanocrystalline samples annealed with different tensions

### 3 巨磁阻抗在传感器方面的应用

我们开发的纳米 GMI 磁敏元件是利用 Fe 基纳米微晶的纵向巨磁阻抗效应研制成的一种传感元件.它基本上是由纳米磁敏材料和集成电路组成.纳米磁敏材料可以取不同形状的膜(带)、丝和粉<sup>[6]</sup>.根据不同的电路和磁路的设计要求,可以给材料形成不同的磁结构,以获得最佳灵敏度和线性的组合.电路包括一个灵敏而稳定的自激振荡器、滤波器、放大器和成形电路<sup>[7]</sup>.在用于磁敏开关时,可无需放大电路,因而具有高稳定性和抗干扰特性.近几年来,我们利用上述 GMI 磁敏元件研制成几种汽车用的传

感器,简单介绍如下.

#### 3.1 纳米磁敏开关

利用纳米磁阻抗效应的高灵敏性能,研制了各种型号的磁敏开关元件,可广泛用于汽车里程表计数、电喷发动机测速、防盗报警等方面.其性能指标为:灵敏度:触发磁场小于 1.0mT;工作温度范围:  $-40 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;工作电压:  $6 \sim 30 \text{ V}$ ;输出电平:低电平小于 0.10V,高电平比工作电压低 0.10V;输出电平跳变时间小于  $10 \mu\text{s}$ ;可靠性:实时测量达  $10^8$  次无差错.

#### 3.2 纳米线性位移传感器

当材料处于某种磁结构时,可以发现外磁场与磁阻抗效应呈现良好的线性关系.利用此原理,我们设计了量程从  $0 \sim 30 \text{ mm}$  的线性传感器.线性相关系数达 0.9999,精度好于 1%,如图 4 所示,它主要用于汽车油量的控制.

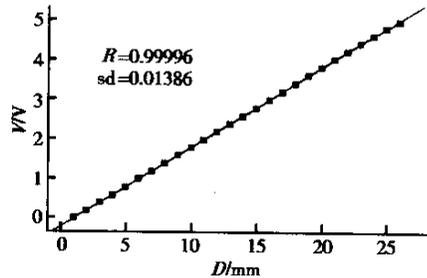


图 4 量程 30mm 磁敏线性元件信号与位移关系曲线

Fig. 4 Output signal of magnetic-linear sensors vs position for the distance range of  $0 \sim 30 \text{ mm}$

#### 3.3 齿轮速度传感器

利用 GMI 探头与齿轮凹凸面距离变化所产生的脉冲信号进行转速测量和控制,可用作汽车防抱死系统(ABS)的速度传感器.由于此类传感器灵敏度高,并采用较封闭的磁路设计,因此具有以下特点:(1)输出信号幅度不随转速变化;(2)灵敏度高(磁场相对灵敏度  $1.0 \text{ V} \cdot \text{kA}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,检测距离达 2mm);(3)频率响应快( $0 \sim 4 \text{ kHz}$ );(4)抗电磁干扰性能强;(5)热稳定性好.

铁基纳米 GMI 器件的实际应用,在国际上尚属首次,作为新产品的竞争对手主要是国内外普遍使用的霍尔、磁电阻等器件.纳米磁敏元件由于灵敏度高、温度稳性好、使用寿命长等优点,有可能以性

能价格比的优势参与国际市场竞争。

图 5 给出了几种 GMI 传感器的实物图。

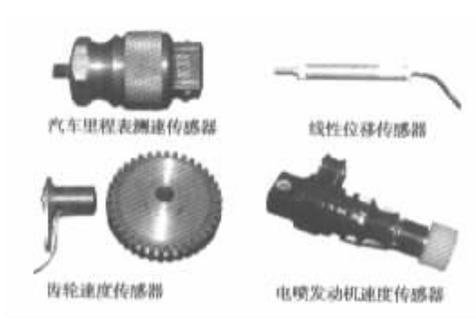


图 5 几种 GMI 传感器的实物图

Fig. 5 Practical examples of GMI sensors

## 参考文献

[ 1 ] Panina L V, Mohri K, Bushida K, et al. Giant magneto-impedance and magneto-inductive effect in amorphous alloys. *J Appl Phys*, 1994, 76(10): 6198

[ 2 ] Noda M, Panina L V, Mohri K. Pulse response bistable magneto-impedance effect in amorphous magnetic wires. *IEEE Trans Magn*, 1995, MAG-31: 3167

[ 3 ] Landau L D, Lifshitz E M. *Electrodynamics of continuous media*, Pergamon, Oxford, 1960

[ 4 ] Yang Jiexin, Yang Xielong, Chen Guo, et al. A new longitudinal, giant magneto-impedance effect. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43: 1051 [杨介信, 杨燮龙, 陈国, 等. 一种新型的纵向巨磁阻抗效应. *科学通报*, 1998, 43: 1051]

[ 5 ] Yang Xielong, Yang Jiexin, Chen Guo, et al. Magneto-impedance effect in field-and stress-annealed Fe-based nanocrystalline alloys. *J Magn Magn Mater*, 1997, 175: 285

[ 6 ] Zhao Z J, Bendjallah F, Yang X L, et al. Longitudinally driven magneto-impedance effect in annealed Fe-based nanocrystalline powder materials. *J Magn Magn Mater*, 2002, 62: 246

[ 7 ] Zhang Chunhui, Li Yongming, Chen Hongyi. Two types of high frequency integrated CMOS multivibrator voltage controlled oscillator. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(14): 495

## Nano Giant Magneto-Impedance Effect and Magnetic Sensors \*

Yang Xielong<sup>1,2</sup>, Yang Jiexin<sup>1,2</sup>, Dai Wenkai<sup>1,2</sup>, Zhao Zhenjie<sup>1</sup>,  
Ma Xueming<sup>1</sup>, Yu Jianguo<sup>2</sup> and Ding Yongzhi<sup>2</sup>

(1 *Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

(2 *Institute of Huatai Nano-Magnetic-Sensitive Devices, Shanghai 200062, China*)

**Abstract:** A new magnetic sensor utilizing the magneto-impedance effect in nanocrystalline materials is developed, which has advantageous features in high sensitivity, temperature stability, and long operation life comparing with conventional magnetic sensors such as Flux-Gate magnetometer, Hall devices, magneto-resistance sensors. They have generated successful applications in car speed measuring, engine's time ignition and other industry control system etal.

**Key words:** giant magneto-impedance effect; magnetic sensors; nanocrystalline

**PACC:** 7550K; 7550B

**Article ID:** 0253-4177(2003)S0-0202-03

\* Project supported by Science and Technology Committee of Shanghai (No. 0159nm058 and 99JC14017)

Yang Xielong male, was born in 1940, professor. His main research field is Mossbauer Spectroscopy, nanomagnetism materials and their applications.