

GMI 电流传感器的研究进展

何俊彦, 陶龙旭, 张怀武, 钟智勇

摘要: 本文介绍了 GMI (巨磁阻抗) 效应的起源、理论方法以及基于 GMI 效应电流传感器原理。讨论了 GMI 电流传感器敏感材料选择标准, 列出了能够产生 GMI 效应的各种材料以及这些材料的软磁特性。叙述了国内外典型的 GMI 电流传感器设计方案和它们的优缺点。最后展望了 GMI 电流传感器发展趋势, 指出薄膜探头是传感器微型化发展的一个方向。

关键词: GMI 效应, 电流传感器, Co 基非晶薄带, 非接触式测量

Progress of the research of Giant Magnetoimpedance effect current sensor

Abstract: This paper describes the origin of giant magnetoimpedance (GMI) effect, the theoretical approaches and the principles of GMI current sensor. The selection criterion of GMI materials of GMI current sensor materials is discussed, various materials of producing GMI effect, and the soft magnetic properties of GMI materials are given. The typical GMI current sensor designs at home and abroad, and their advantages and disadvantages are viewed. Finally, the development trend of GMI current sensor in future are proposed, and the paper points out that the film probes is a development for the miniaturized sensor.

Key words: GMI effect, current sensor, Co-based amorphous ribbon, non-contact measurement

中图分类号: TN6 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2011)12-7-136

1 引言

现代电子电力系统中经常需要电流传感器探测和保护电流。对于电流测量, 按测量方式可分为接触式和非接触式两类。接触式测量原理为欧姆定律, 根据欧姆定律电流大小和电压成正比, 通常采用采样电阻的方法将一个阻值较小电阻串联在电路中用于把电流转换为电压信号进行测量。采样电阻一般使用精密电阻, 阻值低, 精密度高 (精密度一般在 $\pm 1\%$ 以内, 更高要求用途时采用 0.01% 精度电阻)。接触式测量由于采样电阻不可能做到很小, 更不可能接近于零, 因此采样电阻本身会对电流值产生影响, 且接触式测量必须将待测电路断开, 给测量带来麻烦; 非接触式测量为磁效应, 通过监控电流产生的磁场得到。由于电流周围本身会产生磁场, 电流大小和磁场成正比, 可通过测量磁场的大小得到通过的电流大小。常见的非接触式

电流传感器有霍尔 (Hall) 效应电流传感器、罗氏 (Rogowski) 线圈电流传感器及磁通门 (Fluxgate) 电流传感器等^[1,2]。霍尔效应电流传感器是目前应用最广泛的非接触式传感器, 具有结构简单、体积小、动态特性好和寿命长等特点, 但由于霍尔器件采用半导体材料制成, 受温度影响较大, 当温度变化时霍尔元件的载流子浓度、迁移率、电阻率及霍尔系数都将发生变化, 从而使霍尔元件产生温度误差, 需要补加温度补偿电路来作为措施, 这就增加了传感器的制作成本; 罗氏线圈电流传感器对线圈绕制要求精确, 信号处理要求较高, 而且只能用于交流电流测量; 而磁通门电流传感器体积较大, 功耗高, 响应速度低。巨磁阻抗效应作为一种新发现的磁效应, 由于其灵敏度高、响应速度快、热稳定性好、使用频率范围广、体积小等特点, 为开发新型电流传感器提供可能。

2 原理及优点

2.1 GMI 电流传感器原理

巨磁阻抗 (Giant Magnetoimpedance, GMI) 效应, 利用磁性材料阻抗随外加磁场变化的现象。1992 年 Mohri 等^[3] 在三类非晶磁性材料 (FeSiB, CoSiB 和 FeCoSiB) 中发现: 在交变磁场下, 非晶细丝 (直径 50~100 μm) 两端呈现极灵敏的磁电感应效应, 这种效应称之为巨磁阻抗效应。

GMI 效应与材料磁导率有关, 以非晶薄带为例: 当非晶带通以轴向交变电流 $I = I_0 e^{i\omega t}$ 时, 利用 Maxwell 方程组可以推导出薄带阻抗表达式为:

$$Z = kdR_{dc} \coth(kd) \quad (1)$$

(1) 式中: 薄带厚度为 $2d$; R_{dc} 为直流电阻; $k = (1+i)/\delta_m$; $\delta_m = \sqrt{2\rho/\omega\mu_0\mu_1}$ 为趋肤深度; ρ 为材料电阻率; ω 为激励电流角频率; μ_0 为真空磁导率; μ_1 为横向磁导率。由于 μ_1 随外加磁场 H_{ex} 而变化, 所以 Z 是 H_{ex} 函数。

阻抗变化率 (简称 GMI 比值) 定义为:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(H_{ex}) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \times 100\% \quad (2)$$

(2) 式中, $Z(H_{ex})$ 为 H_{ex} 所测阻抗值, $Z(H_{max})$ 为外磁场饱和时所测得阻抗值。通常 H_{max} 为实验设备所能产生的最大磁场。磁场灵敏度定义为: $\frac{\Delta Z}{Z} / \frac{H_{ex}}{H_{cs}}$ 。这两个指标反映了材料对外磁场的灵敏程度。

基于 GMI 效应, 电路中 GMI 敏感元件上加载交流信号 I_{ac} , 敏感元件阻抗 Z 随作用其上外加磁场 H_{ex} 变化而变化, 相应敏感元件两端电压 U_{ac} 也会变化。 H_{ex} 为待测电流产生的磁场, 因此可用电压信号 U_{ac} 变化反应磁场 H_{ex} 变化从而测量待测电流, 这就是 GMI 电流传感器测量原理。原理图见图 1。

2.2 GMI 电流传感器优点

与传统的磁效应电流传感器相比, GMI 电流传感器具

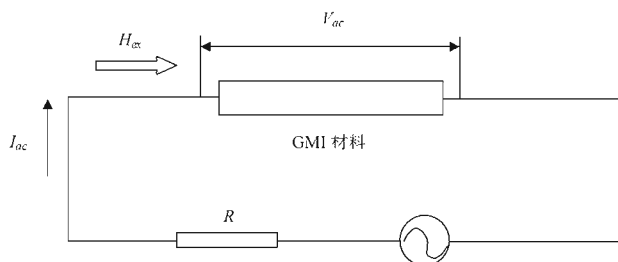


图 1 GMI 电流传感器原理图

Fig 1 Schematic diagram of a GMI current sensor

有如下一些优点:

(1) 灵敏度高, 响应速度快

GMI 材料灵敏度数量级能达到 10^{-6} Gauss, 而灵敏度较高的 GMR 材料只能达到 10^{-2} Gauss。GMI 传感器响应时间通常在 0.2 μs , Hall 传感器和 GMR 传感器为 1 μs , 磁通门传感器相对较慢 200 μs 。

(2) 敏感元件选材广泛

研究发现在非晶丝 (带)、纳米晶丝 (带)、薄膜以及各种复合结构材料中均发现了 GMI 效应, 这为开发符合需求的电流传感器提供更多材料选择。

(3) 测量响应范围广, 测量精度高

GMI 电流传感器测量范围可至几百安培大电流。由于敏感元件一定范围内线性度较好, 测量精度高。

(4) 体积小, 功耗低

传感器电路易与探头集成, 制作的器件体积小。GMI 效应对激励电流要求小, 功耗需求低。

(5) 价格低廉

由于敏感元件取材广泛, 驱动电路设计简单, 易实现工业化大规模应用。

3 GMI 传感器敏感材料要求

敏感材料对于传感器研制是其最核心部分, 决定了传感器的灵敏度水平。因此 GMI 敏感材料必须具备高 GMI 比值和对磁场响应的高灵敏度。较大 GMI 效应的磁性材料通常具有:

低电阻率 ρ ;

高磁导率 μ ;

高饱和磁化强度 M_s ;

较小的铁磁弛豫系数 α 。

许多磁性材料通过一定的热处理都具有较好的 GMI 效应, 实际应用中按照材料形态可分为丝材、带材、薄膜等。

3.1 丝材

Co 基非晶丝具有负磁致伸缩系数, 使得材料外层磁畴饱和磁化强度 M_s 沿非晶丝周向, 这就能产生更大的 GMI 效应, 因此 Co 基非晶丝是一种理想的传感器敏感元件材料。典型的 Co-Fe-Si-B 非晶丝, 如成分为 $\text{Co}_{68}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ 最大 GMI 比值为 600%, 磁场灵敏度为 500%/Oe^[4]。

Fe 基非晶丝由于其外壳为径向磁畴结构, 故有效磁导率较低, 因而 GMI 效应相对较小甚至为零。但通

过晶化处理得到的纳米晶丝 GMI 效应得到明显增强。 $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{NbCu}_1$ 纳米晶丝(非晶丝在 500–600℃退火制得)具有较大的 GMI 效应,最大 GMI 比值达到 200%^[5]。Fe 基非晶丝虽然 GMI 效应不及 Co 基非晶丝,但是 Fe 基非晶合金价格便宜,晶化后 GMI 效应得到提高,故 Fe 基非晶合金具有较好的应用前景。

3.2 带材

Co 基非晶薄带因其横向磁畴结构具有较大的横向磁导率,因此具有显著的 GMI 效应。对于 Co–Fe–Si–B 非晶薄带, $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$ ($x=0.057$) 最大 GMI 比值为 160%^[6]。据报道,添加 Cu、Nb 元素后, Co–Fe–Si–B–Cu–Nb 经过适当退火,最大 GMI 比值达到 513%,灵敏度为 144%/Oe^[7]。Fe 基非晶薄带跟 Fe 基非晶丝类似,通常 GMI 效应很小,经过晶化处理后 GMI 效应能得到显著提高。与 Co 基非晶薄带相比,Fe 基薄带价格上具有很大优势。带材的 GMI 效应通常比丝材较低,但带材制备工艺简单,制作成本相对较低。

3.3 薄膜

为了提高薄膜的 GMI 效应,目前研究主要集中在多层膜结构。典型的 F/M/F 三明治结构中, F 为磁性层(如 CoSiB、CoFeSiB、FeSiBCuNb 等), M 为导电层(如 Cu、Ag、Au 等)。F/M/F 结构 M 层为电流主要通路减少了对交流电流阻力,外部 F 层形成闭合磁回路为磁通量主要通路,减少了退磁场的影响,因此提高了磁导率。研究发现不同的 M 层 GMI 效应不同,如 CoSiB/Ag/CoSiB, GMI 比值为 440%,灵敏度为 49%/Oe^[8]。当在 F 与 M 层加入绝缘层时

GMI 效应显著提高,如在上述结构薄膜中加入 SiO_2 绝缘层,形成 CoSiB/ SiO_2 /Ag/ SiO_2 /CoSiB 五层结构,最大 GMI 比值达到 700%,灵敏度达到 300%/Oe^[9]。由于薄膜与 MEMS 技术结合易于电路的集成,实现器件的微型化,在传感器应用中具有很大的潜力。

对于 GMI 传感器应用,根据实际需要(如磁场灵敏度,工作频率,尺寸和热稳定性等)来选择不同材料。表 1 列出适合于制作传感器敏感元件材料。

4 GMI 电流传感器研究进展

自从 1992 年 GMI 效应发现后,由于其灵敏度高、响应速度快及稳定性好等特点,国内外对 GMI 效应传感器研制工作成为一个热点。目前,基于 GMI 效应的磁场传感器^[15–19]、生物传感器^[20, 21]、应力传感器^[22, 23]已经有了广泛的研究,并且应用于空间探测、交通控制、无损探伤、地磁检测以及生物检测等领域。日本 AICHI STEEL 公司已经率先开发出商用 CMOS 型 GMI 传感器集成芯片 G2^[24],用于电子罗盘及运动控制。对于 GMI 电流传感器的研究,目前大部分还处于实验室研究阶段,由于丝材结构常采用直接在丝两端施加激励信号探测电流,在这里就不累赘。根据探头结构的不同,比较典型的有如下几类:

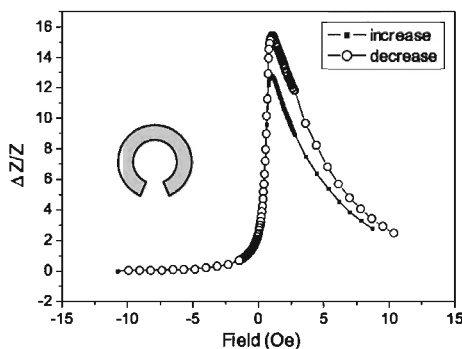
4.1 环状薄带结构探头

这种结构制作工艺相对简单,薄带绕成环状,将待测电流导线放在薄带环中心轴上,由于待测电流导线产生环形磁场,磁场作用于环形薄带周向上,通过测量薄带电压值来测量导线电流值。

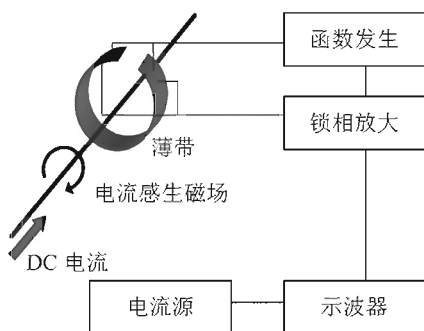
如图 2 所示传感器,探头敏感元件为空气中 653K 退

表 1 用于 GMI 传感器材料
Tab1 Candiate materials for GMI sensors

材料	组分	GMI比值(%)	灵敏度(%/Oe)	频率(MHz)	参考文献
非晶丝	$\text{Co}_{68}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$	1200	/	14.2	[4]
	$(\text{Co}_{94}\text{Fe}_6)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	125	50	3.22	[10]
纳米晶丝	$\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$	200	/	0.5	[11]
非晶薄带	$\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{Nb}_{2.2}\text{Cu}_{0.8}\text{B}_7$	513	144	4	[7]
	$\text{Co}_{68.25}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15}$	400	/	1	[12]
纳米晶薄带	$\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$	400	37	4.5	[13]
	$\text{Fe}_{71}\text{Al}_2\text{Si}_{14}\text{B}_{8.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3.5}$	640	40	5	[7]
多层薄膜	CoSiB/Cu/CoSiB	440	49	10	[8]
	CoSiB/ SiO_2 /Cu/ SiO_2 /CoSiB	700	304	20	[9]
	NiFe/Au/NiFe	150	30	300	[14]



(a)



(b)

图 2 (a) 退火后环状薄带 GMI 曲线 (b) 基于 GMI 效应的环状非晶薄带结构电流传感器

Fig2 (a)GMI profile for annealed toroidal ribbon (b)The current sensor set-up based on GMI effect of toroidal amorphous ribbon

火 8 小时 $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{15}$ 非晶环状薄带^[25]。再用 HF 表面蚀蚀 $1.5\mu\text{m}$ ，由于表面晶化层与内部非晶相磁耦合作用，在弱磁场作用下将会在表面产生有效的单方向表面各向异性，使 GMI 曲线呈非对称性（图 2(a)），非对称性提高了传感器在零场附近的灵敏度和线性度。100kHz 频率激励下，GMI 比值最大为 16%，相应的磁场灵敏度为 $35\%/Oe$ 。将待测电流导线放在薄带环中心轴上，待测电流导线产生环形磁场作用于环形薄带周向上，通过锁相放大器测薄带电压值来测量导线电流值（图 4(b)）。传感器在测量电流 1A 内线性度较好，激励频率为 1MHz 时最大灵敏度为 940mV/A 。

采用环状结构传感器可实现非接触式测量。处理后的非晶薄带具有 AGMI 效应，在零场附近灵敏度高，线性好。可实现不加偏置线圈来调整其工作点，降低了功耗。但单环结构温度相关性大，稳定性较差。

在此单环基础上，Michal Mal á tek 等^[26]研制了双环差动式结构 GMI 电流传感器（图 3）。探头由 2 个平行排列圆环支架组成，将薄带绕在圆环支架上制成直径为 31mm 环带，双环上分别缠绕方向相反的 260 匝偏置线圈。

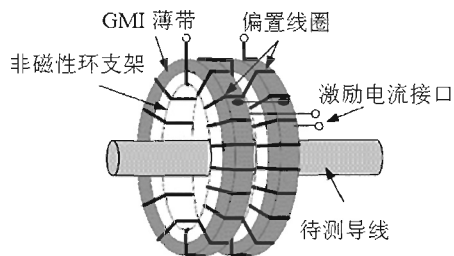


图 3 双环 GMI 电流传感器探头结构

Fig 3 Design of double-core sensor.

敏感元件为 390°C 下 2400kA/m 轴向磁场 10min 退火的 Co 基 ($\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$) 非晶薄带。由于偏置线圈在双环上分别反向缠绕，使得待测电流产生的圆周磁场和线圈产生的偏置磁场相加减，总磁场在一环内增大，另一环内减小，再将双环间电压降经过放大、差分运算处理后输出。因为双环所受温度影响相同，故其电压降可部分弥补温漂影响，使得传感器线性度得到提高。测量电流范围为 $-2\sim 2\text{A}$ ，零点温漂系数为 0.6mA/K ，开环线性误差为 $0.5\%\text{FS}$ 。

双环差动式结构减小了温漂影响，降低了温度相关性，提高了传感器线性度。但偏置线圈的存在却会增加额外功耗。

4.2 薄膜结构探头

由于薄膜易与 MEMS 工艺结合实现传感器的微型化，因此在传感器应用上具有很大的优势。图 4 为 $\text{FeCoSiB/Cu/FeCoSiB}$ 三明治结构薄膜^[27]，中间为导电层 $\text{Cu}(3\mu\text{m})$ 上下为铁磁层 $\text{FeCoSiB}(2\mu\text{m})$ 。薄膜采用射频磁控溅射，用掩膜的方法形成图案。永磁材料 FeCoCr 层提供偏置磁场。在空气中 280°C 经过 1KOe 磁场退火。待测电流产生的磁场为纵向方向（以薄膜横向各向异性方向垂直）。1MHz 时最大 GMI 比值为 100%，分辨率为 10^{-3}Oe 。

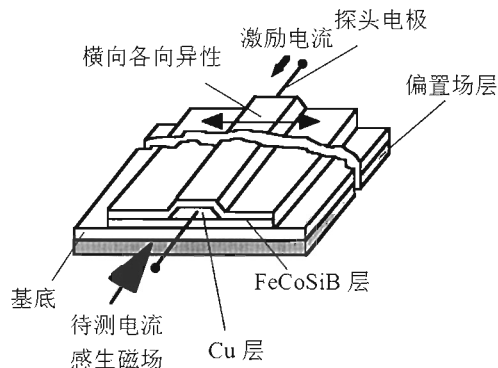


图 4 薄膜 GMI 传感器探头结构

Fig4 Schematic darwing of thin film GMI sensor

T.Kudo 报道了^[28, 29]基于薄膜 GMI 效应的三相电流传感器, 测量 0.1~60A rms 交流电流。传感器探头敏感元件为 Fe-Ta-C 薄膜, 薄膜放置在绝缘骨架中轴位置通过引脚连接, 并在绝缘骨架上缠绕偏置线圈(图 5)。电流传感器结构为三个并排放置的传感器探头, 每个探头外均包裹磁屏蔽层避免电流其他相产生的干扰(图 6(a)、(b))。传感器外壳由两层磁屏蔽层组成, 以防止外部磁场干扰传感器。利用两组交流偏置线圈, 量程扩大 600 倍。传感器电路采用离散采样和 3ms 间歇式驱动激励, 因此功耗较低为 20mW。温度误差在 -25℃~60℃ 内小于 $\pm 5\%$, 最大线性误差为 3.3%。

这是一款具有商业应用前景的 GMI 电流传感器, 敏感元件采用薄膜并且把激励电路集成在器件里, 因此传感器尺寸做的很小。通过三层磁屏蔽结构, 减少了外部磁场干扰。电路采用间歇式驱动和离散采样方式降低了功耗。

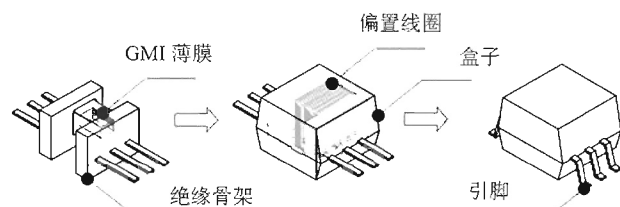
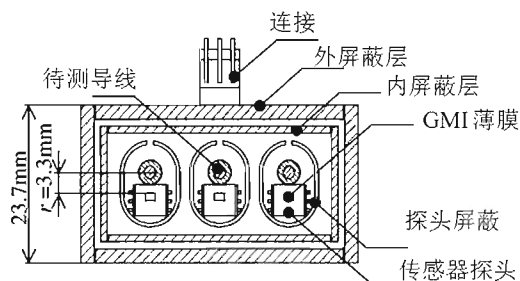
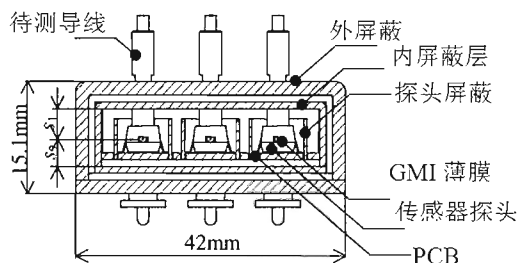


图 5 薄膜探头结构
Fig5 Structure of the film probe



(a)



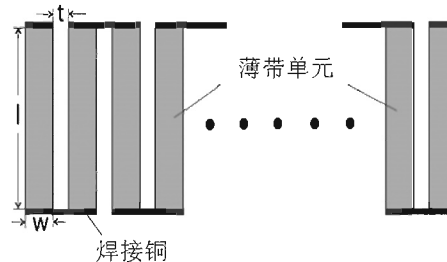
(b)

图 6 电流传感器结构。(a) 俯视图。(b) 侧视图。

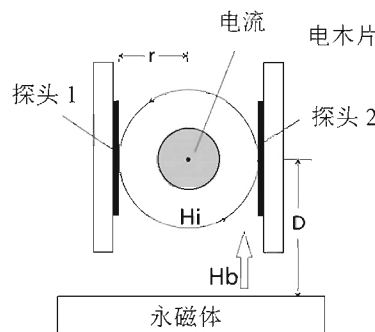
Fig6 Structure of the current sensor.(a)Top view.(b)Side view.

4.3 其他

另一种新颖的探头结构也值得关注, Bing Han 等^[30]设计了一种阵列式探头 GMI 电流传感器。探头敏感元件采用 AT&M 公司的 2714 Co 基非晶薄带, 如图 7(a) 所示, 探头为多个用铜片串联焊接的非晶薄带单元阵列, 用胶固定在电木片上。探头采用差动式结构, 两个阵列式探头 1、2 对称的放在通电导线两侧, 永磁体提供偏置磁场(图 7(b))通过差动结构, 减少了传感器对温度的相关性, 并且不但能测量电流大小, 还可以探测电流方向。传感器量程为 -3A~3A, 灵敏度 1V/A, 测量精度小于 0.15%。在温度范围为 -20~30℃ 时, 温度误差为 0.0033% FS。



(a)



(b)

图 7 (a) 阵列式 GMI 探头结构图 (b) GMI 电流传感器工作原理图
Fig7 (a) Structure of array-structure probe (b) Schematic work of GMI current sensor

5 GMI 电流传感器发展趋势

GMI 电流传感器由于其灵敏度高、分辨率高、响应速度快、尺寸小好等特点其应用前景良好, 但以下几方面需要展开更加深入、全面的研究。

(1) 敏感材料的选择

研制性能优越的 GMI 电流传感器, 离不开 GMI 效应显著的磁性材料。敏感元件材料的热处理, 几何尺寸都会对传感器的性能造成影响, GMI 电流传感器的开发选择什么材料, 采用何种热处理方法效果最好, 需要根据具体

情况(测量范围、工作频率、应用领域等)通过反复实验验证。

(2) 探头结构合理的设计

目前 GMI 电流传感器探头敏感元件大多直接采用丝或带材,这两类材料制作工艺相对简单,丝材大多采用外缠绕偏置线圈而薄带采用环状结构,但由于受到材料几何形状限制,探头结构改进空间不大。而薄膜容易实现器件的微型化,通过 MEMS 工艺与驱动电路集成,因此基于薄膜技术和 MEMS 技术的 GMI 电流传感器是未来发展的一个重要方向。

(3) 传感器电路的优化

电路是传感器设计重要组成部分,传感器性能好坏很大程度取决于它。如何设计性能稳定、集成度高、功耗低、价格低廉的传感器电路需要进一步的研究。

此外,非对称性巨磁阻抗 (AGMI) 效应^[31]由于能显著提高 GMI 传感器在零场附近的线性度和灵敏度而引起了广泛关注。AGMI 效应可以在敏感元件施加直流偏流或在其上缠绕线圈施加交流偏置场^[32]产生,也可以通过材料的交换耦合作用处理获得^[25]。因此 AGMI 效应已经成为目前研究热点,利用 GMI 效应的非对称性可以实现传感器在零场附近具有高的线性度和灵敏度,满足弱电流传感器需求。

6 结束语

基于 GMI 效应传感器具有结构简单、响应速度快、热稳定性好、微型化、功耗低等特点,因此可被广泛应用于探测电流或磁场相关物理量。电流传感器作为电子电力系统中电流检测和保护单元,在电力系统、自动控制、精密仪器等设备均有普遍应用,因此它在电流测量领域具有十分诱人的应用前景。与微电子工艺相结合,基于薄膜技术与 MEMS 技术,研制高集成度微型 GMI 电流传感器是未来发展的一个方向。

致谢: 本文受高等学校博士学科点专项科研基金资助(资助号: 20100185110024)。

参考文献

- [1] Pavel Ripka. Electric current sensors: a review[J]. Measurement Science and Technology[J]. 21(2010) 112001 (23pp)1-23.
- [2] K. Mohri, T. Uchiyama, L. V. Panina, Recent advances of micro-magnetic sensors and sensing application[J]. Sens. Actuators A, 59 (1997)1-8.
- [3] Mohri K, Kawashima K, et al. Magneto-inductive effect (MI effect) in Amorphous Wires[J]. IEEE Trans. Magn., 1992, 28(5):3150-3152.
- [4] Garcia D, Raposo V, Montero O, Iniguez JI. Influence of magnetostriction constant on magnetoimpedance-frequency dependence[J]. Sens. Acta. A., 2006;129:227-230.
- [5] Li YF, Vaquez M, Chen DX. GMI effect of $Fe_{73.5}Cr_5Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ amorphous and nanocrystalline soft wires[J]. J. Magn. Magn. Mater., 2002;249:342-345.
- [6] Goncalves LAP, Soares JM, Machado FLA, de Azevedo WM. GMI effect in the low magnetostrictive $Co_{70}Fe_5Si_{15}B_{10}$ alloys[J]. Physica B, 2006;384:152-154.
- [7] Phan MH, Peng HX, Yu SC, Vazquez M. Optimized giant magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline materials[J]. J. Appl. Phys., 2006;99:08C505:1-5:3.
- [8] Morikawa T, Nishibe Y, Yamadera H. Giant magnetoimpedance effect in layered thin films[J]. IEEE trans. Magn., 1997;33:4367-4372.
- [9] Morikawa T, Nishibe Y, Yamadera H, Nonomura Y, et al. Enhancement of giant magneto-impedance in layered film by insulator separation[J]. IEEE Trans Magn 1996;32:4965-4967.
- [10] Vazquez M, Garcia-Beneytez JM, Garcia JM, et al. Giant magneto-impedance in heterogeneous microwires[J]. J. Appl. Phys., 2000;88:6501-6505.
- [11] Knobel M, Sanchez ML, Gomez-Polo C, et al. Giant magneto-impedance effect in nanostructured magnetic wires[J]. J. Appl. Phys., 1996;79:1646-1648.
- [12] S. E. Roostmeh, M. M. Tehrani, M. Ghanaashoor, et al. Magnetoimpedance effect in laser annealed $Co_{68.25}Fe_{4.5}Si_{12.25}B_{15.15}$ amorphous ribbons[J]. Journal Magnetism and Magnetic Materials, 2006;304:633-635.
- [13] Viegas ADC, de Andrade AMH, Sommer RL, et al. Magnetoimpedance in $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ amorphous films at microwave frequencies[J]. J. Magn. Magn. Mater. 2001;226-230.
- [14] de Cos D, Fry N, Orue I, et al. Very large magnetoimpedance (MI) in FeNi/Au multilayer film systems[J]. Sens. Acta. A, 2006;129:256-259.
- [15] Mohri K, Panina I V, et al. Sensitive and quick response micro magnetic sensor utilizing magneto-impedance in Co-rich amorphous wires[J]. IEEE Trans. Magn., 1995, 31(2):1266-1275.
- [16] Mohri K, Bushida K, Noda M, et al. Magneto-Impedance Element[J]. IEEE Trans. Magn., 1995, 31(4):2455-2460.
- [17] G. V. Kurlyandskaya, A. Garcia-Arribas, et al. Giant magnetoimpedance strip and coil sensors[J]. Sens. Actuators A, 2001, 91:116-119.
- [18] Nguyen Hoang Nghi, Nguyen Minh Hong, et al. GMI effect in amorphous and nanocrystalline magnetic materials[J]. Physica B, 2003, 327:253-256.
- [19] Galina Kurlyandskaya, Vladimir Levit. Magnetic Dynabeads* detection by sensitive element based on giant magnetoimpedance[J]. Sens. Actuators A, 2004, 110:229-231.
- [20] Cai, C. M, Mohri, K. Improved pulse carrier MI effect by flash anneal of amorphous wires and FM wireless CMOS IC torque sensor[J]. IEEE Trans. Magn., 2001, 37(4):2038-2041.
- [21] Adrian Bowles, Jon Gore, George Tomka. An Amorphous Alloy Stress Sensor for Wireless, Battery-free Applications[C].

- Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, edited by Masayoshi Tomizuka, Proc. of SPIE, 2005, 5765:1104-1111.
- [22] Uchiyama T, Mohri K, Shinkai M, et al. Position sensing of magnetite gel using MI sensor for brain tumor detection[J]. IEEE Trans. Magn., 1997 (33):4266-4268.
- [23] A. E. Mahdi, L. Panina, D. Mapps. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials[J]. Sens. Actuators A, 2003, 105:271-285.
- [24] <http://www.aichi-mi.com/>.
- [25] Rheem YW, Kim CG, Kim CO, Yoon SS. Current sensor application of asymmetric giant magnetoimpedance in amorphous materials[J]. Sens. Acta A 2003;106:19-21.
- [26] Michal Malótek, Pavel Ripka, and Ludek Kraus. Double-Core GMI Current Sensor. IEEE Trans. on Magn. [J]. 2005(41):3703-3705.
- [27] Y. Nishibe, N. Ohta, et al. Thin film Magnetic Field Sensor Utilizing Magneto Impedance Effect[J]. Sensor and Actuators, 2000;82:155-160.
- [28] T. Kudo, N. Tsuji, T. Asada, et al. A small, wide range three phase current sensor using an MI element[J]. J. Magn. Soc. Jpan., 2005, 29(11):649-652.
- [29] T. Kudo, N. Tsuji, T. Asada, et al. Development of a small and wide-range three-phase current using an MI element[J]. IEEE Trans. On Magn. 2006, 42(10):3362-3364.
- [30] Bing Han, Tao Zhang, Ke Zhang, Bin Yao, et al. Giant Magnetoimpedance Current Sensor With Array-Structure Double Probes[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2008, 44(5):605-608.
- [31] 钟智勇, 石玉, 刘颖力, 等. 巨磁阻抗效应的非对称性. 功能材料 [J], 2004 (增刊), 513-516.
- [32] Cheol Gi Kim, K. J. Jang. Analysis of asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon[J]. Applied Physics Letters. 1999, 75:2114-2116.