

国外巨磁阻抗传感器检测电路技术的发展动态*

潘仲明, 周 晗, 张大厦, 张文娜

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院 长沙 410073)

摘要:基于非晶态合金材料巨磁阻抗(GMI)效应和非对称巨磁阻抗(AGMI)效应磁传感器是近20年来磁传感器技术领域的研究热点之一。一些国外学者认为非晶态合金材料适合于制作能同时满足分辨力高、响应速度快、功耗低等要求的微磁传感器。然而,迄今为止,国外研发的绝大多数高分辨力GMI磁传感器仍停留在原理样机阶段,其主要技术指标甚至低于商品化各向异性磁阻(AMR)和巨磁电阻(GMR)磁传感器。简要叙述了非晶态合金材料的GMI效应和退火处理对GMI效应的影响,重点介绍了国外研发的各种不同类型的基于非晶丝(带)的GMI磁探头、模拟信号检测电路及其参考性能指标,并探讨了研发高灵敏度GMI磁传感器的关键技术。

关键词:磁传感器;GMI/AGMI效应;非晶丝(带);模拟电路

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Advances in detection circuit of magnetic sensors based on giant magneto-impedance at abroad

Pan Zhongming, Zhou Han, Zhang Dasha, Zhang Wenna

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The magnetic sensors based on giant magneto-impedance (GMI) and asymmetrical giant magneto-impedance (AGMI) effects of amorphous alloy materials are one of the research hot spots in the magnetic sensor technology field over the past two decades. Amorphous alloy material has been believed to be the material suitable for developing the micro magnetic sensors with high resolution, low power consumption and fast response speed. However, up to now most of the GMI sensors with high resolution developed at abroad are at the pre-industrial prototype stage, and their basic performance specifications are inferior to the commercial AMR and GMR magnetic sensors. This paper briefly describes the influence of the GMI effect in amorphous alloy material and annealing processing on GMI effect. Then, the paper emphatically introduces various types of amorphous wires and ribbons based GMI magnetic sensors developed abroad, analog signal detection circuits and their reference performance specifications. Finally, the key techniques for developing high sensitivity GMI magnetic sensors are investigated with an outlook of future research in this field.

Keywords: magnetic sensor; giant magneto-impedance (GMI)/asymmetrical giant magneto-impedance (AGMI) effect; amorphous wire/ribbon; analog circuit

1 引 言

在空天、海洋、地质勘探、交通管理、无损检测、目标探测、医疗诊断、计算机、工业自动化、物联网和智能家居等几乎所有的工程技术领域中,磁传感器都得到了广泛和卓有成效的应用。特别是在军事探测技术专题中,用于检测

铁磁体目标的高分辨力磁传感器是不可或缺的^[1-44]。

在当今磁传感器技术领域中,分辨力达到 pT 级的磁力仪主要有:搜索线圈磁力仪、光泵磁力仪、质子(核子)旋进磁力仪、超导量子干涉磁力仪;分辨力达到 10 pT 级的磁力仪主要有:磁通门磁传感器;分辨力可望达到 10 pT 级的磁力仪主要有:巨磁电阻(giant magneto-impedance, GMI)传感器巨磁阻抗磁(asymmetrical giant magneto-impedance,

AGMI)传感器和光纤磁力仪^[1,15-18]。在磁探技术专题中,除了要考虑磁传感器的分辨力和动态范围,还要考虑其功耗、体积、重量、可靠性、可测试性和可维修性。因此,在航天、航空、航海磁力仪和远程目标探测系统中,大多选用磁通门传感器作为其前端功能部件。特别是目前磁通门传感器业已实现了微型化和集成化,不但体积小、重量轻,而且易于批量生产,因而,现代磁通门传感器已经成为微磁探测技术领域一种重要的磁传感器^[19-22]。

本文关注的问题是当下仍在发展之中的 GMI 磁传感器的主要技术指标能否达到或超过微型磁通门传感器,以适用于探测远程目标或者用于探测生物磁场。因此,有必要对国际上业已开发的各种类型 GMI 磁传感器的结构和电路进行分析比较,以期为研发高分辨力、低功耗的微磁传感器提供理论方法与技术手段。

2 巨磁阻抗效应

非晶态合金材料是一种新型软磁材料。GMI 效应是指软磁材料样本在高频电流激励下,样本两端的阻抗 Z (或者电压幅值 V) 随着施加在样本轴向的直流(或缓慢交变)磁场的变化而发生大的变化,如图 1 所示。在外部磁场 H_{ex} 作用下,软磁材料样本(GMI 元件)阻抗 Z 发生巨大变化的前提条件如下^[4]:

- 1) 高频激励源的频率必须使 GMI 元件产生强趋肤效应;
- 2) 样本磁畴结构具有对外部磁场 H_{ex} 敏感的高横向磁导率。

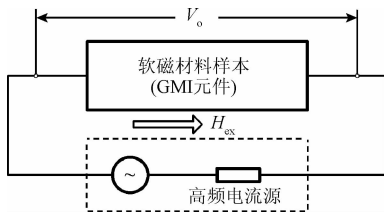


图 1 GMI 效应的简化测试电路

Fig. 1 Simplified test circuit of GMI effect

为了提高非晶态合金材料的 GMI 效应,现阶段的主要研究成果包括:1)采用退火技术(例如常规退火、磁场退火、电流退火、应力退火)和等离子辐射等方法,对软磁材料进行后期处理;2)通过调节化学成分来改善材料的软磁特性;3)采用新工艺制备不同结构的薄膜材料或复合结构材料^[4,23-27]。

图 2 所示为 CoFeSiB 非晶丝(直径 $30\ \mu\text{m}$, 长度 $5\ \text{mm}$;张应力 σ_a 退火处理)在高频正弦波($I_m = 5\ \text{mA}$)激励下的 GMI 特性曲线—归一化电压输出 V_0/V_{dc} 与外加轴向磁场 H_{ex} 的关系曲线^[1],其中 V_{dc} 为激励源的直流电

压。从图 2 可见,当激励源的频率为 $f = 1\ \text{MHz}$ 时,输出电压 V_0 随着轴向磁场 H_{ex} 的增大而单调递减。当激励源的频率为 $f = 10\ \text{MHz}$ 时,如果轴向磁场 $H_{ex} < H_K$ (各向异性磁场), V_0 的幅值随着 H_{ex} 的增大而单调递增;反之,当 $H_{ex} > H_K$ 时,输出 V_0 随着 H_{ex} 的增大而单调递减。显然,GMI 特性曲线不仅是非线性的,而且在零磁场附近是左右对称的。为了研发线性化 GMI 磁传感器,通常需要施加某一直流偏置磁场 H_b ,作为 GMI 元件的静态工作点,这时施加在 GMI 元件上的轴向磁场为 $H_b \pm H_{ex}$ 。从某种意义上说,直流偏置磁场 H_b 的作用,可视为 GMI 元件对被测磁场 H_{ex} 产生了非对称 GMI 效应—AGMI^[28-29]。对于开发线性 GMI 磁传感器而言,AGMI 效应无疑是十分重要的。然而,利用附加螺线管产生直流偏置磁场 H_b ,不仅增加了 GMI 磁传感器的体积和功耗,而且在一些场合下这种方法是不可取的。为此,如何利用张应力或磁场退火处理来获得软磁材料的 AGMI 特性,始终是软磁材料技术领域的研究热点。

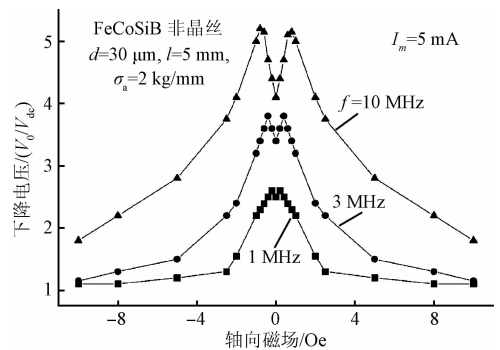


图 2 典型的 GMI 特性曲线

Fig. 2 Typical GMI characteristic curves

自从日本 Mohri K 等人^[30-31]于 1992 年在 CoFeSiB 非晶丝中发现巨磁阻抗效应以来,非晶态合金材料对外部磁场变化的高灵敏度及其他优点,使得利用 GMI 效应开发新型微磁传感器引起了国际上磁传感器技术专家学者广泛关注。国际上研究 GMI 磁传感器的学者大都认为,非晶态合金材料是当今唯一适合于制作高分辨力、低功耗和快速响应的微磁传感器的特种材料,GMI 磁传感器也因此被称为第三代磁传感器,其性能远远优于第一代霍尔传感器和第二代磁电阻(magneto resistive, MR)或巨磁电阻(giant magneto resistive, GMR)传感器^[1-3, 32-35]。然而,迄今为止,国外仅有日本爱知钢铁公司生产商品化 GMI 磁传感器芯片,但其分辨力指标仍然低于美国 Honeywell 公司生产的 AMR 磁传感器芯片^[5, 20];而其他国家研发的高分辨力 GMI 磁传感器,仍停留在原理样机阶段,且绝大多数原理样机的分辨力甚至低于商品化 AMR 和 GMR 磁传感器芯片。因此,国际上也有学者对高分辨力 GMI 磁传感器持保留态度,这些学者认为,GMI

元件温度稳定性差,在工作过程中存在剩磁效应,其分辨力指标能否进一步提高尚存疑问^[4,5]。

3 各类 GMI 磁传感器的结构与电路

根据图3所示的 GMI 元件—非晶丝(带)的激励与信号拾取方式,可将 GMI 磁传感器分为横向激励、纵向激励、非对角激励、线圈激励等4种类型^[36],如表1所示。其中,横向激励(激励电流产生圆周方向磁场)是指 GMI 元件端口①—②既作为高频电流驱动端口又作为信号输出端口,而线圈端口③—④则用于施加直流偏置磁场;纵向激励(激励电流产生轴向磁场)是指线圈端口③—④既作为高频电流驱动端口又作为信号输出端口,而 GMI 元件则作为线圈磁芯(类似于磁通门传感器);非对角激励是指 GMI 元件端口①—②作为高频电流驱动端口,而线圈端口③—④则作为信号输出端口;线圈激励是指线圈端口③—④作为高频电流驱动端口(通常先激励线圈后激励 GMI 元件),而 GMI 元件端口①—②则作为信号输出端口。鉴于国际上大多采用横向激励和非对角激励方式,重点介绍这两种主流激励方式中典型的磁探头结构和电路原理。

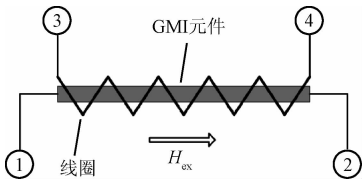


图3 GMI 元件的驱动端口和信号拾取端口
Fig. 3 The driving port and signal pick up port of GMI element

表1 不同类型的 GMI 磁传感器

Table 1 Different types of GMI magnetic sensors

类型	驱动电流端口	输出信号端口
横向激励方式	①—② 端口	①—② 端口
非对角激励方式	①—② 端口	③—④ 端口
纵向激励方式	③—④ 端口	③—④ 端口
线圈激励方式	③—④ 端口	①—② 端口

3.1 横向激励方式

1995年,日本名古屋工业科学研究院 Mohri K 等人^[22]设计了基于 CoFeSiB 非晶丝(长度1 mm,直径30 μm)的 GMI 磁传感器^[37]。其中,GMI 磁探头是由 GMI 元件、科比茨振荡器和肖特基二极管(schottky barrier diode, SBD)检波电路组成的,如图4所示。该电路利用感性 GMI 元件的电感量 L 和外接电容 C_1 、 C_2 在 P 点产生谐振,利用 SBD 检波电路将振荡信号变成直流

输出信号 V_0 。当激励频率为 $f = 200 \sim 300$ MHz 时,GMI 磁传感器的分辨力为 1 nT,频率响应为 20 ~ 30 MHz,最高工作温度为 180℃,功耗不超过 10 mW。

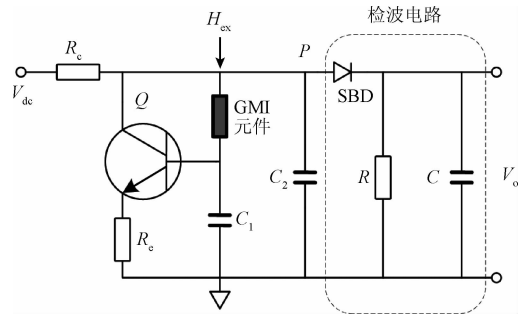


图4 科比茨振荡器及检波电路

Fig. 4 Colpitts oscillator and detection circuit with GMI element

1997年,日本爱知钢铁公司决定研发基于 CMOS 集成电路的 GMI 磁传感器,以促进微型 GMI 磁传感器芯片的大规模生产,迄今为止,该公司已有几十种以上此类商品问世。其中,最有代表性的产品是 Kanno T 等人^[38]设计的带有偏置磁场线圈和反馈线圈的 GMI 磁传感器,如图5所示(注:原文无虚线框电路)。该电路的工作原理是 CMOS 芯片的两个反相器 Q1、Q2 和电阻 R 、电容 C 构成多谐振荡器,振荡周期 T 由时间常数 $\tau = RC$ 确定;电阻 R_d 、电容 C_d 和反相器 Q3 构成微分整形电路,用于调整多谐振荡器输出方波的占空比;Q3 输出周期性窄脉冲序列用于激励 GMI 元件—经退火处理的 CoFeSiB 非晶丝;SBD、电容 C_H 和等效电阻 R_H ($R_1 + R_2$) 构成峰值包络检测电路,用于检测 GMI 元件在外磁场 H_{ex} 作用下的输出量;运算放大器 A1、A2 和电阻 R_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) 分别构成差动放大器和同相放大器;电位器 VR_1 用于调节零位,电位器 VR_2 用于调节反馈线圈的磁场;偏置线圈用于设置 GMI 元件的静态工作点。在此,引入反馈回路是为了抑制 GMI 元件的磁滞现象、改善 GMI 磁传感器的线性度,其代价是降低了 GMI 磁传感器的灵敏度。

2011年西班牙纳瓦拉公立大学 Olivera J 等人^[39]采用 CoFeSiB 玻璃包裹非晶丝(长度15 mm,外径40 μm,内芯直径24 μm)研发了 GMI 磁传感器,参见图5(包含虚线框电路),并详尽分析了该 GMI 磁传感器的工作机理。在 Olive J 设计的电路中,直流电压源为 $V_{dc} = 5$ V;多谐振荡器的周期为 $T = 250$ ns 的方波(频率 $f = 4$ MHz);该方波经过微分整形电路($R_d = 26.5$ k, $C_d = 2.2$ pF)后生成宽度为 $\tau = 60$ ns 的窄脉冲(等效频率为 $f_r = 16$ MHz);虚线框电路($C // VR$)用于调节脉冲电流的峰-峰值 I_{pp} 和直流电平 I_{dc} 。

图6所示为 GMI 元件的激励电压 $V(t)$ 和激励电流

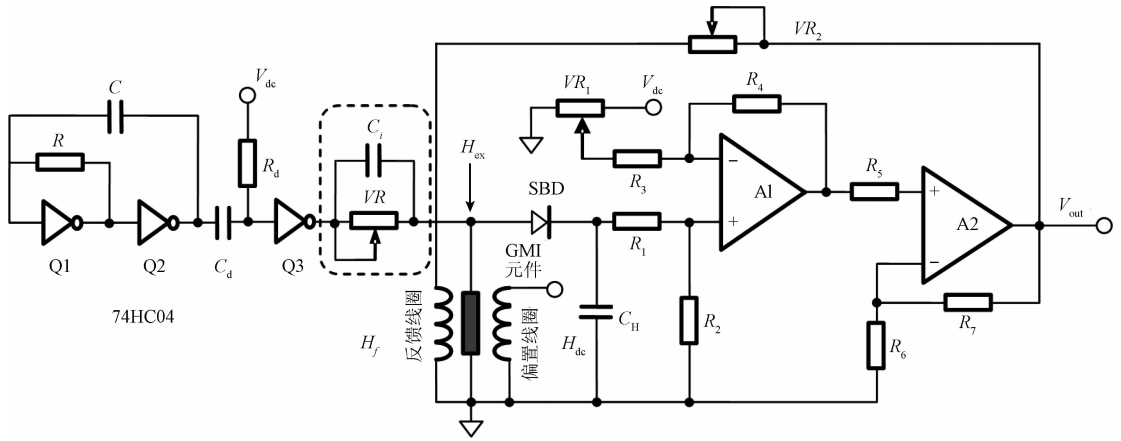


图5 基于 CMOS 多谐振荡器的 GMI 磁传感器^[23]

Fig.5 GMI magnetic sensor based on CMOS multivibrator

$I(t) + I_{dc}$ 的波形, 脉冲电流 $I(t)$ 的峰-峰值为 $I_{pp} = 10 \text{ mA}$ 。通过调节 R_d (或者 C_d) 可使等效频率 f_r 在 $15 \sim 50 \text{ MHz}$ 范围内变化。若要消除偏置电流 I_{dc} 对输出的影响, 可在 SBD 之前串联一个电容。

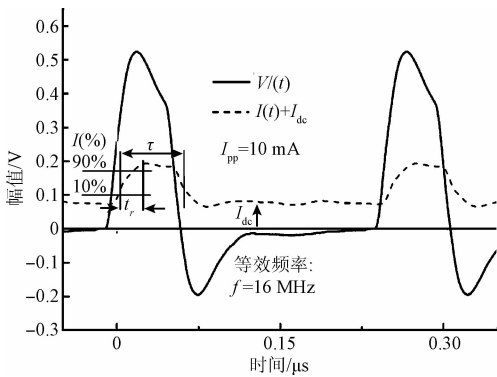


图6 CMOS 多谐振荡器及微分整形电路的输出波形

Fig.6 The output waveforms of the CMOS multivibrator and differential shaping circuit

图7 所示为 GMI 元件在脉冲电流激励下 ($f = 16 \text{ MHz}, I_{pp} = 10 \text{ mA}$), 阻抗变化率 $\Delta Z/Z$ 与外加磁场 H_{dc} (GMI 磁探头朝零地磁场方向, H_{dc} 由偏置线圈产生) 的关系特性曲线。在此, 阻抗变化率 (也即 GMI 效应) 定义为:

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

式中: $H_{dc, \max} = 20 \text{ Oe}$ ($1 \text{ Oe} = 1 \text{ Gauss} = 10^5 \text{ nT}$); 阻抗值 Z 是通过测量施加在 GMI 元件的交流电压 V_{ac} 和交变电流 I_{ac} 而计算出来的。

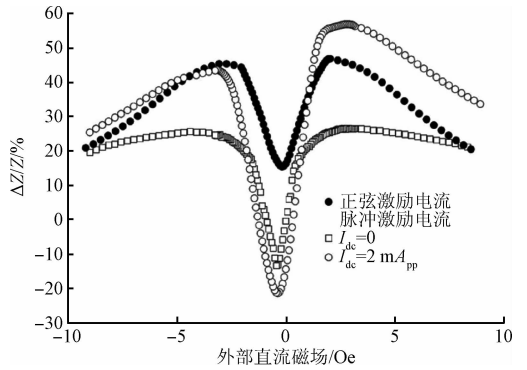


图7 三种不同激励条件下 GMI 元件的阻抗变化曲线
Fig.7 The GMI impedance changing curves under three different excitation conditions

图7 中还展示了 GMI 元件在正弦信号 ($f = 16 \text{ MHz}, I_{pp} = 10 \text{ mA}, I_{dc} = 0$) 激励下的 GMI 特性曲线。当 $0 < H_{dc} < 2 \text{ Oe}$ 时, 不论是脉冲电流还是正弦型电流激励, GMI 特性曲线均具有良好的线性度, 但在脉冲电流激励下 GMI 元件的灵敏度为 $34\% / \text{Oe}$, 而在正弦型电流激励下 GMI 元件的灵敏度仅为 $16\% / \text{Oe}$ 。当偏置电流 $I_{dc} = 2 \text{ mA}$ 时, 在脉冲电流激励下 GMI 元件出现了非对称现象 (AGMI 效应)——负方向磁场的 GMI 效应较小 (左右相差的最大值约为 $Z_{pp} = 14\%$), 其灵敏度达到 $50\% / \text{Oe}$ 。为了改善 GMI 磁传感器的线性度、抑制磁滞现象, 最有效的方法是采用电磁负反馈。反馈磁场 H_f 大小与 GMI 磁传感器的输出 V_{out} (见图7) 成正比, 其方向与外加磁场 H_{dc} 相反 (负反馈); GMI 磁传感器的灵敏度 S 与反馈电阻 R_f 成正比关系。

迄今为止,国外学者已开发出多种不同形式的基于横向驱动的 GMI 磁传感器。例如,2009 年韩国国立安东大学 Yoon S. S. 等人^[40]利用退火处理后、具有 AGMI 效应的 CoFeSiB 非晶带(10 mm × 1 mm × 20 μm)研发了如图 8 所示的 GMI 磁传感器。其中,正弦振荡器的频率为

$f = 100 \text{ kHz}$, V/I 转换器输出电流的幅值为 $I_m = 10 \text{ mA}$;参考电压源用于调节 GMI 磁传感器的零位;引入负反馈回路(开关 K 闭合)后,增大了 GMI 磁传感器的线性度和量程,抑制了 GMI 元件磁滞和温漂现象,但灵敏度由 20 V/Oe 下降到 0.27 V/Oe 。

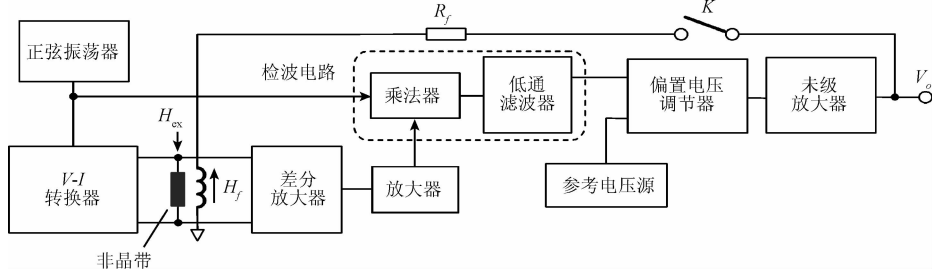


图 8 基于锁相放大器(同步检测)的 GMI 磁传感器

Fig. 8 The GMI magnetic sensor based on lock-in amplifier (synchronous detection)

为了进一步提高 GMI 磁传感器的温度稳定性和抗干扰能力,可采用双 GMI 元件构成差分式 GMI 磁传感器。2007 年西班牙巴伦西亚工业大学 Garcia-Mique H 等人^[41]研发了基于两根玻璃包裹微非晶丝(FeCoSiB, 直径 30 ~ 50 μm)的差分式 GMI 磁传感器,如图 9 所示。为了使 GMI 元件工作在其阻抗特性曲线的线性区间,利用螺线管线圈对两根平行固定的微非晶丝施加

正/负偏置磁场($H_b = \pm 400 \text{ A/m}$),构成差动式 GMI 元件。当正弦信号激励源的频率为 $f = 14 \text{ MHz}$,激励电流的有效值为 $I_{\text{RMS}} = 100 \mu\text{A}$ 时,在 $\pm 130 \text{ A/m}$ 范围内,差动式 GMI 元件的输入-输出曲线是线性的,其电压灵敏度为 10 mV/(A/m) (或者 796.5 mV/Oe),最大非线性度约为 0.98% ($|H_{\text{ex}}| \leq 130 \text{ A/m}$)。

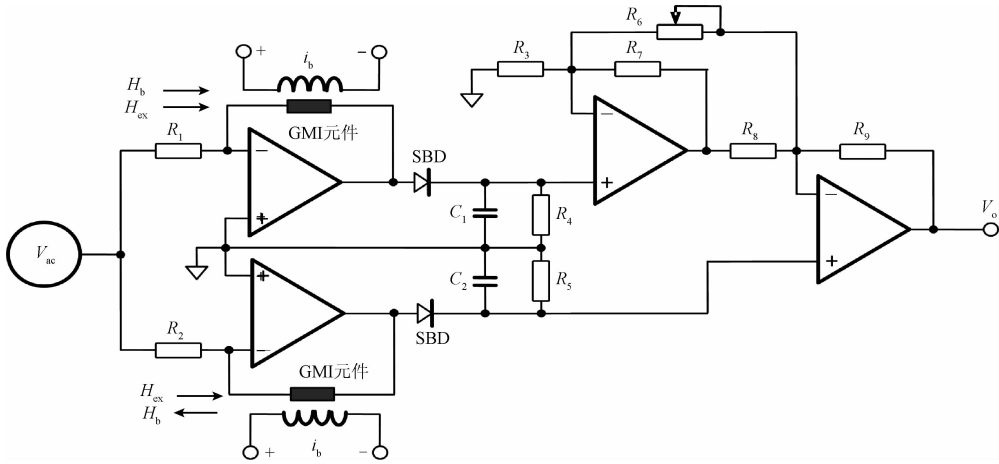
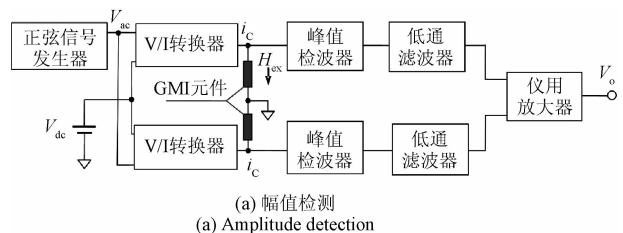


图 9 差分式 GMI 传感器电路原理

Fig. 9 The circuit principle diagram of differential GMI sensor

2011 年巴西 Pontificia 大学 Silva E. C. 等人^[42]比较研究了基于幅值检测和相位检测的两种差分式非晶带 GMI 磁传感器(见图 10)的主要技术指标。其中,GMI 元件采用宽度为 1.5 mm、厚度为 60 μm 的 CoFeSiB 非晶带(其长度分别采用 $L = 1, 3, 5, 15 \text{ cm}$);激励电流为 $i_c = I_{\text{dc}} + I_{\text{ac}} \sin(2\pi ft)$ 。其中, I_{dc} 是 V_{dc} 提供的直流偏置电流,用于使非晶带产生 AGMI 效应; I_{ac} 是正弦信号发生器 V_{ac} 提供的交变电流的幅值($I_{\text{ac}} = V_{\text{ac}}/R = 15 \text{ mA}$); f 是正弦信

号发生器的频率。



(a) 幅值检测
(a) Amplitude detection

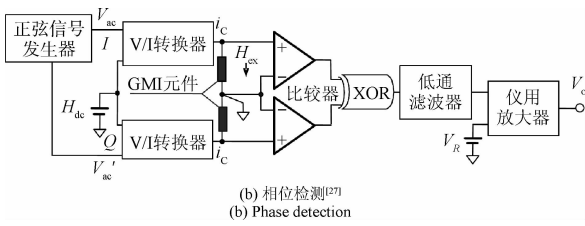


图 10 差动式 GMI 传感器电路原理图
Fig. 10 The circuit principle diagram of differential GMI sensors

比较器输出脉冲的相位差为 $\theta = 90^\circ$ ，故 XOR 门和低通滤波器的输出为 0，选择恰当的参考电压 V_R ，使得仅用放大器的输出为 $V_o = 0$ ；当外部磁场 $H_{ex} \neq 0$ 时，两比较器输出脉冲的相位差是外部磁场 H_{ex} 的函数，即 $\theta = g(H_{ex})$ ，XOR 门输出脉冲的宽度与 H_{ex} 成正比，该脉冲信号经低通滤波后通过仪用放大器，使后者的输出 V_o 与 H_{ex} 成正比。在此，低通滤波器的截止频率 f_c 小于正弦信号源频率 f 的百分之一，即 $f_c \leq f/100$ ；仪器放大器的增益为 $K = 1000$ 。表 2 所示为幅值检测与相位检测 GMI 磁传感器的灵敏度性能指标，其中，括号内参数表示最佳偏置电流和最佳激励频率。

相位检测的工作原理是当外部磁场 $H_{ex} = 0$ 时，两

表 2 幅值检测与相位检测 AGMI 磁传感器的灵敏度

Table 2 Sensitivity of the AGMI magnetic sensors based on amplitude detection and phase detection

非晶带长度/cm	相位检测 GMI 磁传感器灵敏度 (PTS)	幅值检测 GMI 磁传感器灵敏度 (MTS)	PTS/MTS
1	69.36 V/Oe ($I_{dc} = 80 \text{ mA}, f = 100 \text{ kHz}$)	0.84 V/Oe ($I_{dc} = 80 \text{ mA}, f = 10 \text{ MHz}$)	82.75
3	483.48 V/Oe ($I_{dc} = 80 \text{ mA}, f = 125 \text{ kHz}$)	13.64 V/Oe ($I_{dc} = 80 \text{ mA}, f = 10 \text{ MHz}$)	35.45
5	550.80 V/Oe ($I_{dc} = 80 \text{ mA}, f = 100 \text{ kHz}$)	39.48 V/Oe ($I_{dc} = 80 \text{ mA}, f = 10 \text{ MHz}$)	13.95
15	887.91 V/Oe ($I_{dc} = 100 \text{ mA}, f = 10 \text{ MHz}$)	108.95 V/Oe ($I_{dc} = 80 \text{ mA}, f = 10 \text{ MHz}$)	8.15

从表 2 可见，基于相位检测的 GMI 磁传感器的灵敏度 (phase transducer sensitivity, PTS) 优于基于幅值检测的 GMI 磁传感器的灵敏度 (magnitude transducer sensitivity, MTS)。例如，非晶带长度 $L = 3 \text{ cm}$ 时，PTS/MTS = 35.45 倍；前者激励源的最佳频率仅为 $f = 125 \text{ kHz}$ ，而后者激励源的最佳频率则为 $f = 10 \text{ MHz}$ 。因此，对于微弱磁场信号检测技术，譬如生物磁检测技术，研发基于相位检测的 GMI 磁传感器具有重要的实用价值。

3.2 非对角激励方式

1999 年日本名古屋大学 Kawajiri N 等人^[43]利用 Unitika Ltd. 生产的 FeCoSiB (张力退火, 长度 2 mm, 直径 30 μm) 的非晶丝, 研发了如图 11 所示的差动式 GMI 磁传感器。其中, 两个检测线圈 (感应线圈) 的匝数相等、

缠绕方向相反; CMOS 多谐振荡器的周期由 RC 确定 ($f = 1 \text{ MHz}$)，微分电路的上升时间 t_r 由时间常数 $\tau = R_1 C_1$ 确定 (在此, $t_r = 5 \text{ ns}$)；开关 K 式同步检波器对检测线圈输出的第一个脉冲信号进行整形, 其输出波形 V_D 与外加磁场 H_{ex} 的关系如图 12 所示。因 SBD 温度稳定性不好, 故而采用高速电子开关 K 取代 SBD。将两路检波器的差分输出电压 V_D 放大 100 倍, 作为 GMI 传感器的末端输出 V_o ；同时, 引入电流反馈支路 $I_f = V_o/R_f$ 来激励反馈线圈, 以抑制 GMI 元件的磁滞现象, 从而提高 GMI 磁传感器的线性度。实验结果表明, 该 AGMI 磁传感器的线性量程在 $\pm 80 \text{ A/m}$ ($\pm 1 \text{ Oe}$) 范围之内, 灵敏度为 3.3 V/Oe, 带宽为 300 Hz, 温度稳定性为 0.01% FS/ $^\circ\text{C}$ 。

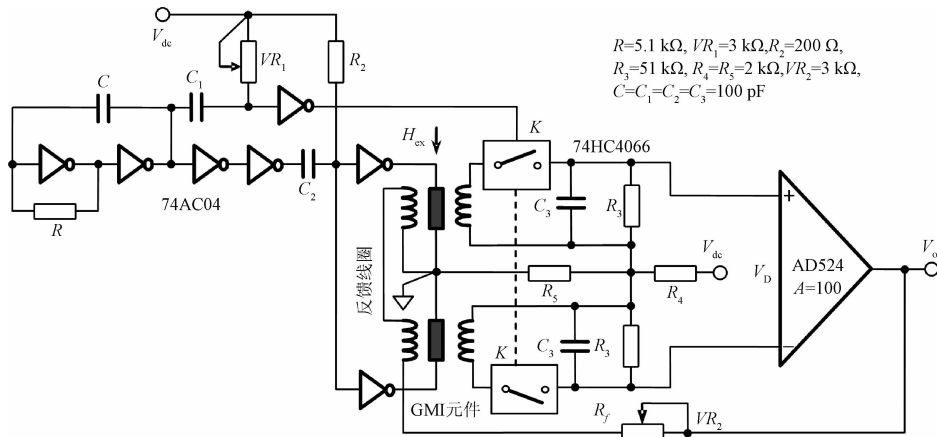


图 11 基于双 FeCoSiB 非晶丝的反馈式 GMI 磁传感器原理

Fig. 11 The principle diagram of the feedback GMI sensor based on two FeCoSiB amorphous wires

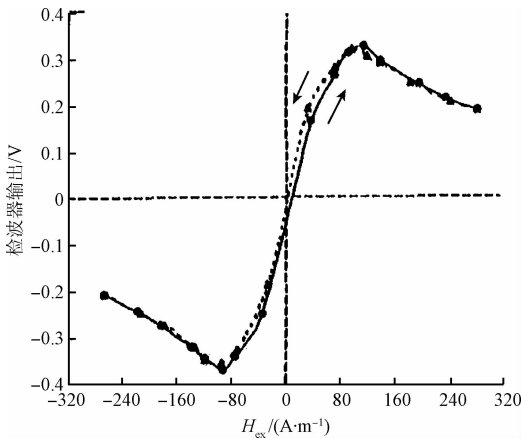


图 12 在 H_{ex} 作用下两个检测线圈的差分输出电压

Fig. 12 The differential output voltage of two detection coils under external field H_{ex}

磁场梯度仪可消除环境均匀磁场的扰动,适用于检测局部的微弱磁场—磁偶极子磁场。为了开发 GMI 磁

场梯度仪,可采用利用同一多谐振荡器驱动两个 GMI 元件。例如,2012 年日本名古屋大学 (Uchiyama T)、名古屋工业科学研究所 (Mohri K)、爱知钢铁公司 (Honkura Y) 和英国普利茅斯大学 (Panina L. V.) 等学者联合研发了基于双 CoFeSiB 非晶丝的 GMI 磁场梯度仪^[44],如图 13 所示。其中,磁场梯度仪探头是两根 CoFeSiB 非晶丝(长度为 1 cm,直径为 30 μm ,张力退火)按轴向排列(间距为 3 cm)、每根非晶丝外部均缠绕一个匝数为 $N = 500$ 的线圈(缠绕方向相同),分别作为检测线圈和参考线圈;555 脉冲发生器产生周期为 $T = 2.5 \mu\text{s}$ 的方波信号,两路微分电路整形电路产生脉冲宽度为 $\tau = 100 \text{ ns}$ 的窄脉冲,窄脉冲通过电阻 R 驱动非晶丝,其交流电流峰值为 $I_p = 100 \text{ mA}$,直流偏置电流为 $I_{dc} = 4 \text{ mA}$ (见图 7);仪用放大器 AD524 和自回零电路构成自回零减法器(检测线圈的整流输出 E 减去参考线圈的整流输出 E_r),AD524 的输出经仪用放大器 INA128 放大 10 000 倍后,再通过 60 Hz 陷波器和通带频率为 0.3 ~ 100 Hz 的带通滤波器,形成 GMI 磁场梯度仪的输出 V_0 。

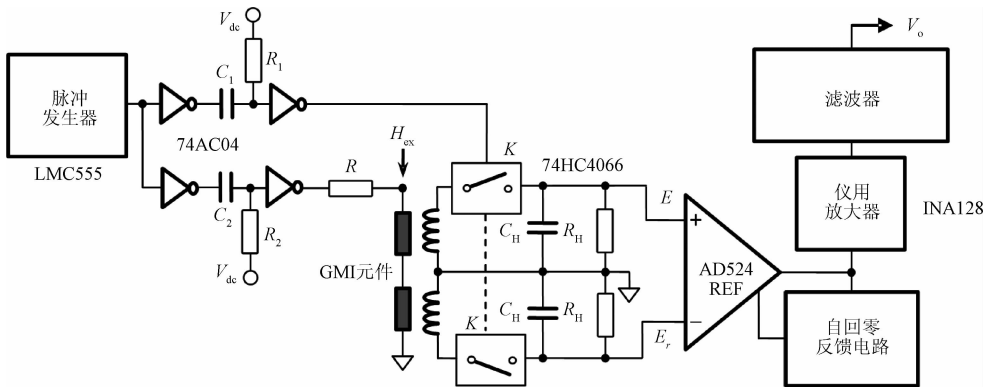


图 13 基于双 CoFeSiB 非晶丝的 GMI 磁场梯度仪原理

Fig. 13 The principle diagram of the GMI magnetic field gradiometer based on two CoFeSiB amorphous wires

实验结果表明,该 GMI 磁场梯度仪的灵敏度为 1.3 V/nT;在 0.3 ~ 100 Hz 的频带内对其噪声水平进行测试,在 2 ~ 20 Hz 频带内的噪声水平约为 10 pT/Hz^{1/2},在 20 ~ 40 Hz 频带内的噪声水平约为 1 pT/Hz^{1/2};在 40 ~ 100 Hz 频带内的噪声水平约为 100 pT/Hz^{1/2}。由此可见,在 2 ~ 40 Hz 频带内,该磁场梯度仪的分辨力达到 10 pT 级,故可用于检测脑磁波(如 $\alpha - \beta$ 波)。这是迄今为止已报导的分辨力最高的 GMI 磁传感器。

2010 年捷克理工大学 Malatek M 等人^[45]采用 CoFeSiBCr 非晶带研制了 GMI 磁传感器,如图 14 所示。在此,先将非晶带(11 cm × 1.25 mm × 16.7 μm)在张应力 50MPa、温度 390°C 条件下进行退火处理,然后将非晶带固定在 PCB 长条板上,套入直径为 9 mm、长度为 8 cm、

匝数 290 圈的螺线管线圈上,以此构成 GMI 磁探头。在频率为 $f = 300 \text{ kHz}$ 、电流有效值为 $I_{\text{RMS}} = 10 \text{ mA}$ 的正弦波(偏置电流为 $I_{\text{DC}} = 20 \text{ mA}$)激励下,非对角激励的 GMI 元件具有显著的 AGMI 效应。

在图 14 所示 GMI 磁传感器电路原理中,采用运算放大器、电阻和电容构成的 Wien 电桥振荡器(正弦信号激励源),振荡频率为 $f = 290 \text{ kHz}$;检测线圈 L_c 与电容 C_1 并联,使之产生谐振以增强 GMI 效应;整流电路采用模拟开关同步检波电路,其输出经积分放大后通过电阻 R_f 反馈至检测线圈; R_f 两端的电压经放大后,通过截止频率为 10 Hz 的二阶低通滤波器形成输出 V_0 。在此,将检测线圈与反馈线圈合并为一,是为了避免两个同轴线圈(检测线圈和反馈线圈)产生互感现象。

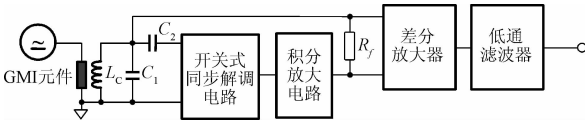


图14 基于Co基非晶带的反馈式AGMI磁传感器原理

Fig. 14 The principle diagram of the feedback AGMI magnetic sensor based on Co-rich amorphous ribbon

实验结果表明,当反馈电阻取 $R_f = 200 \Omega$ 、正弦波激励电流有效值取 $I_{\text{rms}} = 3 \text{ A}$ 、偏置电流取 $I_{\text{DC}} = 5 \text{ mA}$ 时,在线性量程 $\pm 75 \mu\text{T}$ 范围之内,该 GMI 磁传感器的灵敏度为 $38 \text{ mV}/\mu\text{T}$,非线性误差为 $0.2\% \text{ FS}$,温度漂移为 -67 nT/K ,噪声均方根值($0.01 \sim 10 \text{ Hz}$)为 270 pT ,噪声

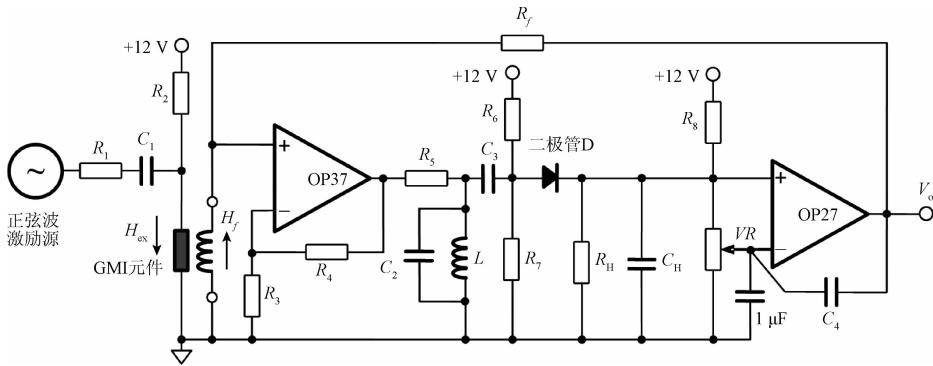


图15 基于Co基非晶丝的GMI磁传感器

Fig. 15 The GMI magnetic sensor based on Co-rich amorphous wire

在图15中,正弦波激励源的峰值输出电压为 $V_p = 10 \text{ V}$,频率为 $f = 1 \text{ MHz}$; R_1 (750Ω)起限流作用,使 GMI 元件的峰值激励电流为 $I_p = 13 \text{ mA}$; C_1 (10 nF)起交流耦合作用; 12 V 直流电源和 R_2 ($2.2 \text{ k}\Omega$)为 GMI 元件提供 $I_{\text{dc}} = 6 \text{ mA}$ 的偏置电流,使之产生 AGMI 效应; OP37 和 R_3 (100Ω)、 R_4 (500Ω)组成增益为 6 倍的同相放大器,对检测线圈的输出进行放大; R_5 (220Ω)起着限流作用; C_2 (2.2 nF)和 L ($10 \mu\text{H}$)组成 LC 谐振电路(谐振频率为 $f_r = 1 \text{ MHz}$),以增强 GMI 效应; C_3 (10 nF)起着隔离直流作用; 12 V 直流电源及其分压器($R_6 = 13.3 \text{ k}\Omega$ 、 $R_7 = 1 \text{ k}\Omega$)为硅二极管 D 提供 0.8 V 的正向偏置电压,以确保 D 始终处于导通状态; D 和 R_H ($10 \text{ k}\Omega$)、 C_H (100 nF)

水平为 $70 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}@1\text{Hz}$,磁探头功耗为 75 mW 。由此可知,该 GMI 磁传感器的分辨力指标超过了商品化 AMR 磁传感器芯片 HMC1001^[5]。通过改进材料特性和优化电路设计,其噪声均方根值($0.01 \sim 10 \text{ Hz}$)可望降至 210 pT ,噪声水平可望降至 $17 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}@1\text{Hz}$ 。

2013 年法国卡昂大学 Dufay B 等人^[46]研发了基于 CoFeSiB 非晶丝的 GMI 磁传感器,如图 15 所示。其中,非晶丝长度为 $L = 2.5 \text{ cm}$,直径为 $\Phi = 100 \mu\text{m}$;检测线圈直接缠绕在非晶丝上,其长度 L_c 与非晶丝等长,线圈匝数约为 $N = 1000$ 。一般而言,检测线圈的匝数 N 越大,磁探头的灵敏度 S 也就越大;但是 N 越大,线圈的寄生电容 C 也越大,这将降低磁探头的灵敏度 S 。因此,应当根据具体情况优化设计检测线圈的匝数 N 。

组成检波电路; 12 V 直流电源和分压器($R_8 = 2.2 \text{ k}\Omega$, $V_R = 1 \text{ k}\Omega$)用于调节积分器(OP27 和 C_4 , $C_4 = 10 \text{ nF}$)的静态工作点;积分器输出 V_o 通过反馈电阻 R_f 直接接入检测线圈,调整 R_f ($3.6 \text{ k}\Omega$)使 GMI 磁传感器前向增益 G_F (V_o/H_{ex})远大于反向增益 $F_f = H_f/V_o$ 。

实验结果表明,在线性量程 $\pm 100 \mu\text{T}$ 范围之内,GMI 磁传感器的灵敏度为 $0.1 \text{ V}/\mu\text{T}$,带宽为 $\text{DC} - 70 \text{ kHz}$;在磁屏蔽环境下,在频率为 20 Hz 、强度为 3 nT 的磁场作用下,GMI 磁传感器的噪声水平为 $30 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}@1\text{Hz}$,白噪声水平为 $1.7 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ 。从噪声水平来看,该 GMI 磁传感器的分辨力指标可能超过了商品化 AMR 磁传感器芯片 HMC1001^[5]。

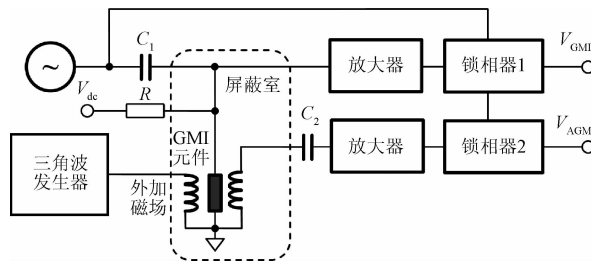


图16 Co基非晶丝的GMI和AGMI特性测试原理

Fig. 16 Characteristic test principle diagram of the GMI and AGMI magnetic sensors based on Co-rich amorphous wire

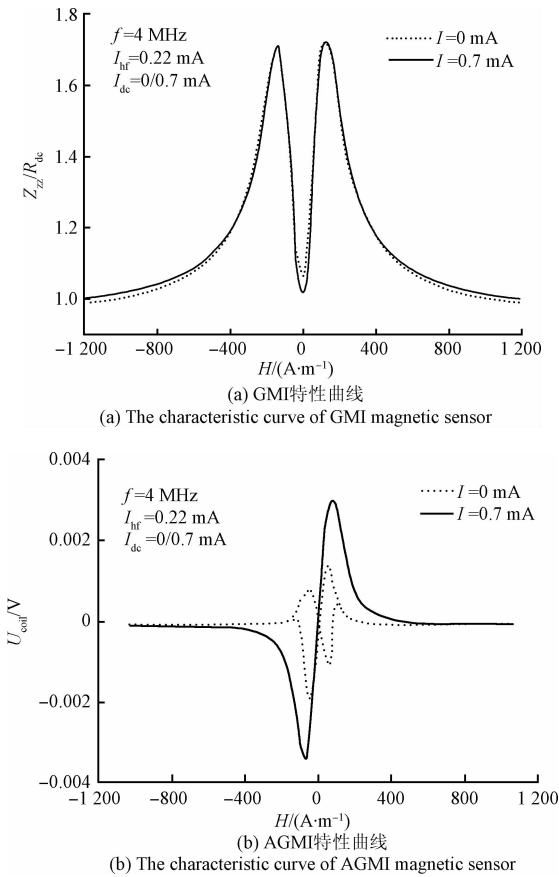


图17 Co基非晶丝GMI和AGMI特性曲线

Fig. 17 The characteristic curves of GMI and AGMI magnetic sensors based on CoFeNiBSiMo amorphous wire

2014年俄罗斯科学院 Gudoshnikov S 等人^[47]采用 CoFeSiBMo 玻璃包裹非晶丝(长度 $l = 10$ mm, 内径 $r_1 = 10.7 \mu\text{m}$, 外径 $r_2 = 13.1 \mu\text{m}$)制作了基于非对角激励方式的 GMI 磁传感器。将非晶丝置于直径为 $d = 0.5$ mm、匝数 $N = 85$ 的螺线管线圈之中(漆包线半径为 $50 \mu\text{m}$), 从而构成非晶丝磁探头。在磁屏蔽环境下, 按图 16 给出的电路原理框图分别对磁探头的 GMI 特性(非晶丝输出)和 AGMI 特性(检测线圈输出)进行测试, 其结果如图 17 所示。

在图 17 中, I_{hf} 表示高频激励电流, I_{dc} 表示直流激励电流; 图 17(a) 的纵坐标表示非晶丝轴向阻抗 Z 与非晶丝静态电阻值 R_{dc} ($36 \Omega/\text{cm}$) 的比值(将锁相器 1 输出 V_{GMI} 折算成 Z/R_{dc}); 图 17(b) 的纵坐标表示检测线圈的高频信号经锁相器 2 解调后的输出电压 V_{AGMI} 。对于横向驱动方式, 在高频正弦波激励下, 施加直流偏置电流 $I_{\text{dc}} = 0.7$ mA 对非晶丝输出的 GMI 特性影响不大(见图 17(a)); 对于非对角驱动方式, 当 $I_{\text{dc}} = 0.7$ mA 时, 施加直流偏置电流 I_{dc} 对非对角激励的 GMI 元件的 AGMI 特性影响很大; 而当 $I_{\text{dc}} = 0$ 时, AGMI 特性曲线不稳定

(见图 17(b))。此外, 从图 17(a) 还可看出, 在外部磁场 $H_{\text{ex}} = 0 \sim \pm 150$ A/m 范围内, 横向激励的 GMI 磁探头的灵敏度为 $0.037 \text{ mV}/\text{Am}^{-1}$ ($I_{\text{hf}} = 0.22$ mA); 在外部磁场 $H_{\text{ex}} = \pm 50$ A/m 范围内, 非对角激励的 GMI 磁探头的灵敏度为 $0.070 \text{ mV}/\text{Am}^{-1}$ 。

图 18 所示为基于玻璃包裹非晶丝的 GMI 磁传感器的电路原理。其中, 高频正弦激励源峰值电流为 $I_p = 2$ mA, 频率为 $f = 4$ MHz, 偏置电流 $I_{\text{dc}} = 0.7$ mA。当反馈回路开关 K 断开时, GMI 磁传感器的线性量程在 $\pm 3 \mu\text{T}$, 灵敏度为 $1500 \text{ mV}/\mu\text{T}$; 当反馈回路开关 K 闭合, 且取反馈电阻 $R_f = 750 \Omega$ 时, GMI 磁传感器的线性量程在 $\pm 60 \mu\text{T}$, 灵敏度为 $75 \text{ mV}/\mu\text{T}$; 当 $R_f = 200 \Omega$ 时, GMI 磁传感器的线性量程在 $\pm 225 \mu\text{T}$, 灵敏度为 $20 \text{ mV}/\mu\text{T}$, 温度稳定性为 $5 \text{ nT}/\text{h}$, 功耗约为 0.5 W , 满量程输出电压为 $\pm 4.5 \text{ V}$, 动态范围为 120 dB 。

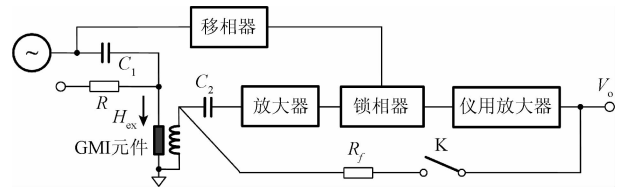


图18 基于玻璃包裹非晶丝的GMI磁传感器原理
Fig. 18 The principle block diagram of the GMI magnetic sensor based on glass-coated amorphous wire

在坡莫合金制作的磁场屏蔽室内, Gudoshnikov S 等人利用频谱分析仪($2 \sim 1000$ Hz)对 GMI 磁传感器的噪声水平进行测试。用螺线管线圈产生频率为 120 Hz、幅值为 0.5 nT 的激励信号, 测得该传感器的噪声水平为 $1 \text{ nT}/\text{Hz}^{1/2}@1 \text{ Hz}$; 当激励信号的幅值为 70 nT 时, 其噪声水平为 $80 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}@3 \text{ Hz}$ 左右。在 $3 \sim 80$ Hz 频段内, 电子电路的等效磁场噪声幅值谱密度不超过 $3 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

在上述文献中, GMI 元件的激励频率范围为 $100 \text{ kHz} \sim 14 \text{ MHz}$, 激励电流范围为 $100 \mu\text{A} \sim 100 \text{ mA}$, 直流偏置范围为 $0 \sim 20$ mA。在实际研究中, 一般通过实验测量不同材料和规格的 GMI 元件—非晶丝(带)在不同激励条件下的特性曲线, 从而选取最佳激励频率、激励电流和偏置磁场^[48-49]。在此, 附上本实验室测量的某非晶丝特性曲线以及所选择的最佳激励条件, 以供读者参考。所选用的非晶丝长度为 10 mm, 直径为 $30 \mu\text{m}$; 激励方式为横向激励。

所选择的非晶丝最佳激励条件如下: 为了降低电路噪声, 选择采用正弦波进行激励; 激励频率根据图 19(a) 选择 11 MHz ; 激励电流结合图 19(b) 以及功耗考虑选择 15 mA ; 偏置电流根据图 19(c) 选择 5 mA , 从而最大化 GMI 传感器的线性范围。

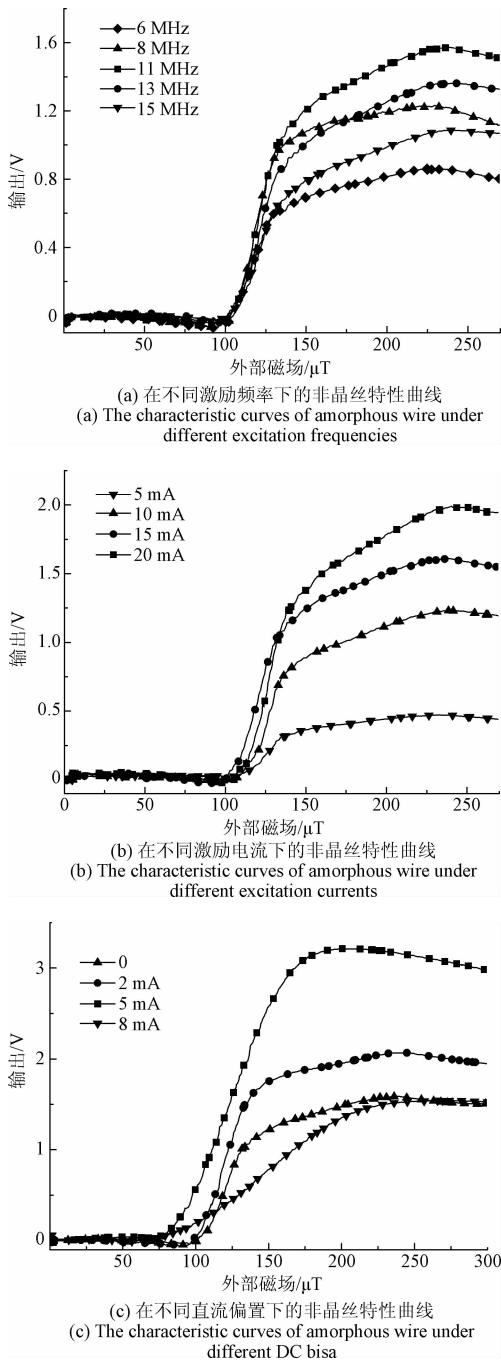


图19 非晶丝在不同激励条件下的特性曲线
Fig. 19 The characteristic curves of amorphous wire under different excitation conditions

4 结 论

迄今为止,GMI 磁传感器的研发仍处于探索阶段,除了日本名古屋大学和爱知钢铁公司声称已经研发出分辨率高达 10 pT 级 GMI 磁场梯度仪外,业已研发的各种类型 GMI 磁探头的噪声水平指标大多低于 AMR 磁传感器芯片(HMC1001)。

从电路设计上提高 GMI 磁传感器灵敏度的主要途径如下:

1) 对非晶丝(带)施加最佳偏置直流电流,使其产生大的 AGMI 效应;

2) 利用电容 C 与感性 GMI 元件并联,或者在信号调理电路的适当位置增设 LC 谐振电路,以增强 GMI 磁探头的 GMI 效应;

3) 选择合适的 GMI 磁探头结构,如差动式结构或梯度式结构,以抑制 GMI 磁探头参数的温度漂移和内部噪声;优化设计 GMI 磁探头的结构参数—非晶丝(带)、偏置线圈、反馈线圈和检测线圈的尺寸;

4) 优化设计 GMI 磁探头的激励源(激励电流、激励频率),以增强 GMI 元件的 GMI/AGMI 效应,优化设计 GMI 磁传感器的信号调理电路,以降低电子电路的噪声水平;

5) 采用相位检测来取代传统的幅值检测,可以有效提高 GMI 传感器的灵敏度。

采用窄脉冲周期信号激励源可显著提高非晶丝(带)的 AGMI 效应,但等效频率高于 10 MHz 级的窄脉冲周期信号会对信号调理电路产生干扰或交流耦合;采用正弦型激励源的优缺点则与之相反。

高速检波电路主要有 3 种形式:高速模拟开关检波电路、SBD 检波电路和乘法器检波电路;此外,还有带有限幅控制的运算放大器(如 AD699)检波电路^[50]。当选用窄脉冲周期信号激励源时,通常采用高速模拟开关检波电路;当选用高频正弦型激励源(10 MHz 以上)时,通常采用带有正电压偏置的 SBD 检波电路;当选用低频正弦型激励源时,一般可采用乘法器检波电路或者二级管检波电路。

鉴于地球磁场是强度为 40 μT 左右的矢量场,且实验室噪声磁场的幅值达到几十 nT 级以上,因此,如果不消除环境均匀磁场的影响,则 GMI 磁探头指向不同,施加在 GMI 元件的偏置磁场也不同;如果不消除环境噪声磁场的影响,就无法研制出可在非磁场屏蔽条件下使用的、分辨率高于 10 pT 级的 GMI 磁传感器。换言之,只有采用梯度式磁探头结构,或者采用环境噪声抑制技术,才有可能研发出可在实验室环境下使用的、小量程(± 100 nT)、高分辨力(10 pT)的 GMI 磁传感器。

参考文献

- [1] MAHDI A E, PANINA P, MAPPS D. Some new horizons in magnetic sensing: High- T_c SQUIDs, GMR and GMI materials [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 105(3): 271-285.
- [2] LENZ J, EDELSTEIN A S. Magnetic sensors and their applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(3): 631-649.

- [3] RIPKA P. Sensors based bulk soft magnetic materials: Advances and challenges [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320(20): 2466-2473.
- [4] PHAN M H, PENG H X. Giant magneto-impedance materials; Fundamentals and applications [J]. *Progress in Materials Science*, 2008, 53(2): 323-420.
- [5] RIPKA P, JANOSEK M. Advances in magnetic field sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(6): 1108-1116.
- [6] ASFOUR A, ZIDI M, YONNET J P. High frequency amplitude detector for GMI sensors [J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 24502-24522.
- [7] 姜智鹏, 赵伟, 屈凯峰. 磁场测量技术的发展及其应用[J]. *电测与仪表*, 2008, 45(4): 1-5.
- JIANG ZH P, ZHAO W, QU K F. Development and application of magnetic field measurement technology [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2008, 45(4): 1-5.
- [8] 闫晓伟. 超导磁传感器在水雷作战中的应用[J]. *水雷战与舰船防护*, 2014, 22(2): 43-46.
- YAN X W. Application study on superconducting magnetic sensor in mine warfare [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2014, 22(2): 43-46.
- [9] 郑阔海, 杨生胜, 赵琳, 等. 微型磁电阻效应传感器的空间应用前景[J]. *真空与低温*, 2012, 18(2): 83-87.
- ZHENG K H, YANG SH SH, ZHAO L, et al. Prospect of micro-magnetoresistance sensors for space application [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2012, 18(2): 83-87.
- [10] 闫辉, 肖昌汉, 张朝阳. 三分量磁通门传感器水平修正方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2006, 20(6): 90-93.
- YAN H, XIAO CH H, ZHANG ZH Y. Horizontal calibration to triaxial fluxgate magnetometer [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2006, 20(6): 90-93.
- [11] TEHRANCHI M M, RANJBARAN M, EFTEKHARI H. Double core giant magneto-impedance sensors for the inspection of magnetic flux leakage from metal surface cracks[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 170(1): 55-61.
- [12] ROWAIS H A, LI B, LIANG C, et al. Development of a passive and remote magnetic microsensor with thin-film giant magnetoimpedance element and surface acoustic wave transponder[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(7): 07E524.
- [13] FISHER B, PANINA L V, FRY N, et al. High performance current sensor utilizing pulse magneto-impedance in Co-based amorphous wire [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(1): 89-92.
- [14] FODIL K, DENOUAL M, DOLABDJIAN C, et al. Dynamic sensing of magnetic nanoparticles in microchannel using GMI technology [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(1): 93-96.
- [15] DING L H, SAEZ S, DOLABDJIAN C, et al. Equivalent magnetic noise limit of low-cost GMI magnetometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(2): 159-168.
- [16] DUFAY B, SAEZ S, DOLABDJIAN C, et al. Impact of electronic conditioning on the noise performance of a two-port network giant magnetoimpedance magnetometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(6): 1317-1323.
- [17] 邵英秋, 宋克非. 宽频带感应式磁传感器线圈电感的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(7): 703-709.
- SHAO Y Q, SONG K F. Research on coil inductance of broad frequency induce type magnetic sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2014, 28(7): 703-709.
- [18] 解伟男, 奚伯奇, 梁慧敏. 非晶材料磁传感器噪声分析[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(11): 2635-2640.
- XIE W N, XI B Q, LIANG H M. Noise analysis of amorphous material magnetic sensor [J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2012, 33(11): 2635-2640.
- [19] 陈正想, 卢俊杰. 弱磁探测技术发展现状[J]. *水雷战与舰船防护*, 2011, 19(4): 1-5.
- CHEN ZH X, LU J J. Current development of weak magnetic detection [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2011, 19(4): 1-5.
- [20] 李文涛, 王世伟, 孙广杰, 等. 基于磁通门效应的非晶丝弱磁传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2014(2): 1-3.
- LI W T, WANG SH W, SUN G J, et al. Research of weak magnetic sensor made by amorphous wire based on fluxgate effect [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(2): 1-3.
- [21] 周斌, 程炳钧, 王劲东, 等. 电磁监测试验卫星矢量磁场探测方法[J]. *空间科学学报*, 2011, 34(6): 843-846.
- ZHOU B, CHEN B J, WANG J D, et al. Magnetic field detection method of China seismoelectromagnetic satellite [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, 34(6): 843-846.
- [22] 陈宇沁, 周宏威, 袁建生. 基于磁异常检测的潜艇探测探头类型分析[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(11): 20-24.

- CHEN Y Q, ZHOU H W, YUAN J SH. Analysis of different types of magnetic probes for submarine detection based on magnetic anomaly [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(11):20-24.
- [23] 柴秀丽, 甘志华, 闫萍. 带材非对角非对称巨磁阻抗效应传感机理建模 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10): 2222-2227.
- CHAI X L, GAN ZH H, YAN P. Sensing mechanism modeling of off-diagonal asymmetric giant magnetoimpedance effect in ribbons [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(10): 2222-2227.
- [24] AUSANIO G, IANNOTTI V, LANOTTE L. Giant magnetic induction in magneto-elastic resonators and its application for magnetic field sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 153(2): 162-165.
- [25] IPATOV M, GONZALEZ-LEGARRETA L, GARCIA J, et al. Induced giant magnetoimpedance effect by current annealing in ultra thin Co-based amorphous ribbons [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49 (3): 1009-1012.
- [26] ZHAO W, BU X Z, YU G L, et al. Feedback type giant magneto-impedance sensor based on longitudinal excitation [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324(19): 3073-3077.
- [27] DWEVEDI S, MARKANDEYULU G. Giant magnetoimpedance effect in nanocrystalline ribbons for sensitive magnetic sensors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(9): 09A328.
- [28] KUZMINSKI M, NESTERUK K, LACHOWICZ H K. Magnetic field meter based on giant magnetoimpedance effect [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 141(1): 68-75.
- [29] KRAUS L, MALATEK M, DVORAK M. Magnetic field sensor meter based on asymmetric inverse Wiedemann effect [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 142(2): 468-473.
- [30] MOHRI K, KAWASHIMA T, KAWASHIMA K, et al. Magneto-Inductive effect (MI effect) in amorphous wire [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, 28(5): 3150-3152.
- [31] MOHRI K, HUMPHREY F B, PANINA L V, et al. Advances of amorphous wire magnetics over 27 years [J]. *Physica Status Solidi*, 2009, 206(4): 601-607.
- [32] 武剑, 粟畅, 周勇. 巨磁阻抗(GMI)传感器的研究与发展 [J]. *磁性元件与电源*, 2014(2): 125-132.
- WU J, SU CH, ZHOU Y. Research and development of giant magneto-impedance (GMI) sensors [J]. *Magnetic Element and Power Supply*, 2014(2): 125-132.
- [33] 蒋颜玮, 房建成, 盛蔚, 等. 巨磁阻抗磁传感器的研究进展 [J]. *仪表技术与传感器*, 2008(5): 1-6.
- JIANG Y W, FANG J CH, SHENG W, et al. Progress in study of magnetic sensors utilizing giant magneto-impedance effect [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008(5): 1-6.
- [34] 杜广涛, 陈向东, 林其斌, 等. MEMS 铁磁磁场传感器的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(7): 1534-1540.
- DU G T, CHEN X D, LIN Q B, et al. Study on MEMS ferromagnetic magnetic field sensors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(7): 1534-1540.
- [35] 鲍丙豪. 磁芯气隙中串联层叠非晶带 GMI 效应电流传感器 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(9): 1861-1865.
- BAO B H. Novel current sensor based on GMI effect in serial laminated amorphous ribbons embedded in the air gap of a toroidal core [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(9): 1861-1865.
- [36] 李欣, 张清, 阮建中, 等. 不同长度敏感元件的两种巨磁阻抗传感器感性性能研究 [J]. *传感技术学报*, 2008, 21(7): 1147-1150.
- LI X, ZHANG Q, RUAN J ZH, et al. Study of the sensing performance of two kinds of giant magnetoimpedance sensors with different elements lengths [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(7): 1147-1150.
- [37] MOHRI K, PANINA L V, UCHIYAMA T, et al. Sensitive and quick response micro magnetic sensor utilizing magneto-impedance Co-rich amorphous wire [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, 31(2): 1266-1275.
- [38] KANNO T, MOHRI K, YAGI T, et al. Amorphous wire MI micro sensor using C-MOS IC multivibrator [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, 33(5): 3658-3661.
- [39] OLIVERA J, CRUZ-BLAS C A, GOMEZ-POLO C. Comprehensive analysis of a micro magnetic sensor performance using amorphous microwire MI element with pulsed excitation current [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 168(1): 90-94.
- [40] YOON S S, KOLLU P, KIM D Y, et al. Magnetic sensor system using asymmetric giant magneto-impedance head [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(6): 2727-2729.
- [41] GARCIA-MIQUE H, GARCIA V M. Magnetic sensor

- based on giant magneto impedance [C]. International Conference on Sensor Technologies & Applications, 2007: 24-29.
- [42] SILVA E C, GUSMAO L A, BARBOSA C R, et al. High sensitivity giant magneto impedance (GMI) magnetic transducer: Magnitude versus phase sensing [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(3): 035204-35212.
- [43] KAWAJIRI N, NAKABAYASHI M, CAI C M, et al. Highly stable MI micro sensor using CMOS IC multivibrator with synchronous rectification [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(5): 3667-3669.
- [44] UCHIYAMA T, MOHRI K, HONKURA Y, et al. Recent advances of pico-Tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI sensor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 3833-3839.
- [45] MALATEK M, KRAUS L. Off-diagonal GMI sensor with stress-annealed amorphous ribbon [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 164(1-2): 41-45.
- [46] DUFAY B, SAEZ S, DOLABDJIAN C, et al. Characterization of an optimized off-diagonal GMI-based magnetometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(1): 379-388.
- [47] GUDOSHNIKOV S, USOV N, NOZDRIN A, et al. Highly sensitive magnetometer based on off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire [J]. Physica Status Solidi A, 2014, 211(5): 980-985.
- [48] PAL S K, MANIK N B, MITRA A. Dependence of the driving current on the harmonic behavior of giant magneto-impedance voltage of Co - based amorphous wires [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 305(1): 240-246.
- [49] DAS T K, MITRA A, MANDAL S K, et al. Parametric controls on giant magnetoimpedance (GMI) behavior of CoFeSiBCr amorphous wires for prospective sensor applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 220(12): 382-387.
- [50] ASFOUR A, YONNET J P, ZIDI M. Toward a novel digital electronic conditioning for the GMI magnetic sensors: the software defined radio [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(1): 1-4.

作者简介



潘仲明, 分别在 1982 年、1985 年和 2006 年于国防科学技术大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为国防科学技术大学教授, 主要研究方向为传感器与战场环境监测。

E-mail: chungmingpan@163.com

Pan Zhongming received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from National University of Defense Technology (NUDT) in 1982, 1985 and 2006, respectively. Now, he is a professor in NUDT. His main research interest includes sensors and battlefield condition monitoring.



周晗, 2010 年于厦门大学获得学士学位, 2013 年于国防科学技术大学获得硕士学位, 现为国防科学技术大学博士研究生, 主要研究方向为传感器与战场环境监测。

E-mail: zhouhng2@163.com

Zhou Han received his B. Sc. degree from Xiamen University in 2010 and M. Sc. degree from NUDT in 2013. Now, he is a Ph. D. candidate in NUDT. His main research interest includes sensors and battlefield condition monitoring.