

高温超导技术在微磁传感器中的应用与发展*

王三胜^{1,†} 郭强^{2,††}

(1 北京航空航天大学 微纳测控与低维物理教育部重点实验室 北京 100191)

(2 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

2015-03-18 收到

† email: wangssh@tsinghua.edu.cn

†† email: guoqiangbuaa@163.com

DOI: 10.7693/wl20160306

The development and application of high temperature superconductor technology for weak magnetic sensors

WANG San-Sheng^{1,†} Guo Qiang^{2,††}

(1 Key Laboratory of Micro-nano Measurement, Manipulation and Physics, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2 School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要 磁传感器在诸多领域有着广泛的应用, 而随着高温超导技术的快速发展, 将高温超导材料应用于磁信号测量成为超导材料应用的一个重要领域。文章探讨了高温超导材料在微弱磁场测量方面的主要应用, 介绍了三种在微弱磁场测量方面能达到或有希望达到 fT 量级的传感器。其中包括: 基于约瑟夫森效应的超导量子干涉器(SQUID), 基于超导零电阻效应的巨磁电阻(GMR)磁传感器和由文章作者所在的实验室提出的巨磁阻抗(GMI)/超导复合磁传感器。文章重点介绍了 GMI/超导复合磁传感器, 并对此传感器在结构和应用方面的最新进展进行了说明。

关键词 微磁传感器, 超导量子干涉器, 巨磁阻抗磁传感器, 巨磁电阻磁传感器

Abstract Magnetic sensors are widely used in many fields. With the rapid development of technology, high temperature superconducting materials have been applied in the important domain of weak magnetic field measurement. To exploit these applications, we have investigated three kinds of magnetic sensors that have already or promise to meet the requirements of femtotesla (fT, 10^{-15} T) range accuracy, i.e., high-temperature superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometers, and superconducting flux-to-field transformers based on giant magneto-resistance (GMR) and giant magneto impedance(GMI) sensors. Their structure, principle of operation, and signal processing circuits are analyzed and compared.

Keywords micro-magnetic sensor, SQUID, GMI sensor, GMR sensor

* 国家自然科学基金(批准号: 61171003; 61473023), 北京市自然科学基金(批准号: 1102024), 北京市科技新星(批准号: 2008A020), 可靠性与环境工程技术重点实验室开放基金资助项目

1 引言

超高精度磁传感器在生物磁测量、地磁导航、天文观测、基础物理特性分析等科研领域具有广泛的应用前景和迫切需求。比如,在生物磁信号探测领域,典型的心脏磁场为 10^{-9} — 10^{-10} T,脑磁场为 10^{-11} — 10^{-12} T,目前能够满足检测 pT (10^{-12} T)量级测量精度的磁传感器有光泵磁传感器、探测线圈磁传感器、磁通门传感器、超导量子干涉器件(superconducting quantum interference device, SQUID)传感器等。其中 SQUID 传感器是目前探测精度最高的磁传感器,可以达到 10^{-14} T (高温超导 SQUID)和 10^{-15} T (低温超导 SQUID)^[1],但是由于设计制作和使用的复杂性,限制了其大规模应用。而探测线圈磁传感器、磁通门传感器和光泵传感器难于小型化,因此也不适用于微电子的集成系统。只有巨磁阻传感器和巨磁阻抗传感器既可以满足高灵敏探测的要求,又可以兼顾高性能和微型化,并且与微机电系统(micro electro-mechanical systems, MEMS)技术兼容,近年来受到更多关注。

而在近十几年间,随着薄膜技术的发展,高温超导技术得到了极大的提高,将巨磁阻技术或巨磁阻抗技术结合高温超导薄膜结构,构成了一种新的磁传感器,这种磁传感器具有可以媲美 SQUID 的测量精度^[2],并且在微型化方面具有 SQUID 无法具备的优越性,可以预见,这种技术的发展将会促进磁传感器领域的发展。但是由于巨磁电阻(giant magnetoresistance, GMR)元件本身的复杂性,其高达 10 余层的膜结构实现起来需要非常精确的参数控制和结构设计,难度较大^[3]。复合结构中超导环部分的尺寸直径达到 2.5 cm 以上,这样会增大系统体积和耦合面积,从而增加引入的磁通。理论分析方面, GMR 元件忽略了材料的电感变化,因此探测精度也没有巨磁阻抗(giant magneto impedance, GMI)器件高,综合上述因素, GMI/超导复合结构可以兼顾小型化和制作上的方便性,并且可以达到更高的精度。

本文下面分三部分对高温超导技术在微磁传

感器方面的应用与发展进行阐述。

2 高温超导量子干涉器件传感器的原理、应用与发展

超导量子干涉仪是基于超导约瑟夫森(Josephson)结效应制作的磁传感器,因为其极高的探测精度,广泛用于生物磁测量、无损探伤、军事探潜等领域,是高温超导最早走向实用化的领域之一。而高温超导技术的发展提高了 SQUID 的工作温度,另一方面,高温超导薄膜技术的发展也提高了 SQUID 的灵敏度^[4]。本节将主要说明 SQUID 的测量原理及高温 SQUID 近几年的发展,简单阐述近期高温超导 SQUID 的应用。

SQUID 实质是基于约瑟夫森结效应的一种将磁通转化为电压的磁通传感器,利用了超导约瑟夫森结效应和磁通量子化现象。如图 1 所示,被一薄势垒层分开的两块超导体构成一个约瑟夫森隧道结。当含有约瑟夫森隧道结的超导体闭合环路被适当大小的电流 I 偏置后,会呈现一种宏观量子干涉现象,即隧道结两端的电压是随闭合环路环孔中的磁通量 Φ 变化的周期性函数,其周期为磁通量变化的最小单位(磁通量量子 Φ_0)。这种现象称为超导量子干涉现象。

从发现约瑟夫森结效应以来,人们很快就利用这种效应制成了利用直流电流进行偏置的超导量子干涉器件(DC-SQUID),这种器件实质上就

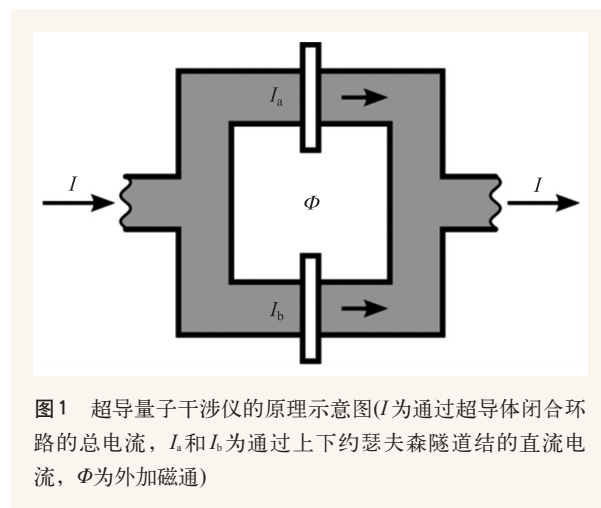


图1 超导量子干涉仪的原理示意图(I 为通过超导体闭合环路的总电流, I_a 和 I_b 为通过上下约瑟夫森隧道结的直流电流, Φ 为外加磁通)

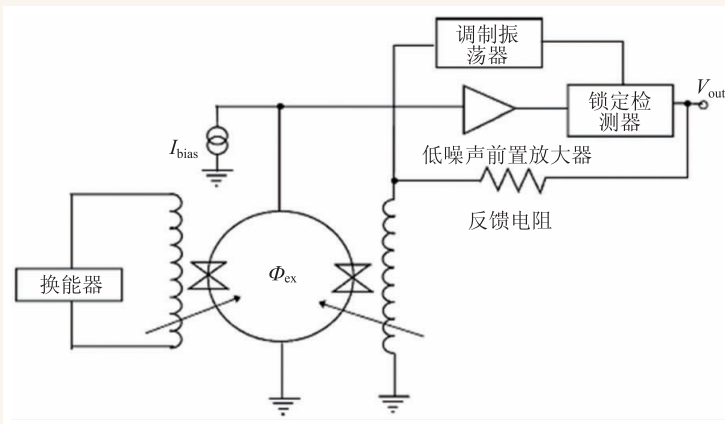


图2 DC-SQUID的电路测量示意图(Φ_{ex} 为环内总磁通, I_{bias} 为偏置电流, V_{out} 为输出电压)

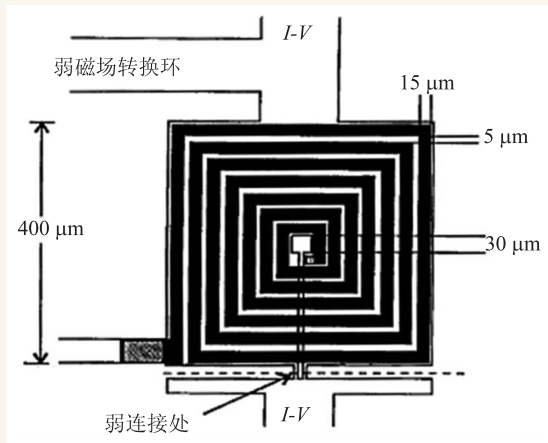


图3 高温超导DC-SQUID的原理示意图^[5]

是一种磁通检测器。随后,又发明了利用约瑟夫森结和超导体连成闭合回路,再用射频电流进行偏置的超导量子干涉器件(RF-SQUID),这种结构更容易制备,并且与室温电路的耦合问题更易于解决,其灵敏度也比当时的DC-SQUID高。1976年, J. Clarke 等人研制成功薄膜隧道结 DC-SQUID, 其测量原理如图 2 所示, 利用线圈之间的互感谐振, 解决了与室温电路的耦合问题, 其灵敏度比 RF-SQUID 要高一个数量级。

低温超导量子干涉器大多数是直流 SQUID, 而高温超导薄膜可以制成直流 SQUID 或者射频 SQUID, 现在一般为 YBCO 薄膜材料制成。这种传感器设计的难点在于没有成熟的高温约瑟夫森结工艺, 并且在 77 K 温度下, 热噪声对传感器的测量干扰很大。目前比较成熟的制作高温 SQUID

的方式是使用 SrTiO_3 或者 LaAlO_3 晶体作为衬底, 在它们的双晶或者含有台阶的单晶片上外延生长 YBCO 薄膜, 再用半导体光刻技术将 SQUID 的图形刻在 YBCO 薄膜上(图 3), 制成 SQUID 器件^[5]。

目前, 对高温 SQUID 的研究主要集中在两个方面: 一是高温超导 SQUID 基本理论的研究, 主要指高温超导 SQUID 电压与电流特性, 电压与磁通之间的变换系数等数值仿真; 二是各种高温超导 SQUID 器件的研制以及在相关领域实现对微弱磁场信

号的检测。

近几年, 超导薄膜技术的提高使得薄膜质量有显著提高, 将超导薄膜的磁通噪声减小了近 8 个数量级。通过使用超导环的焊接技术、YBCO 的微桥技术以及多层膜的复合技术, 使得高温超导的噪声系数提高到 1 kHz 时的 $9.7 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 而在 1 Hz 时能达到 $53 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[4]。

Yang 等人采用谐振型耦合电路结合常规铜拾取线圈, 将 SQUID 的磁场噪声降低到 $26 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[6]。Kang 等人将两个 SQUID 串联, 其中一个作为信号检测系统, 另外一个作为参考信号端, 构成多通道双弛豫振荡的 SQUID 磁传感器和平面梯度计, 在 100 Hz 下, 其噪声分别达到 $3 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $4 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[7, 8]。而 Kawai 集成了 9 通道的平面式梯度计, 噪声水平达到 $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[9], 梯度计结构可以避免使用昂贵的磁屏蔽室, 对 SQUID 的广泛应用十分有利。

3 GMR/超导复合磁传感器的原理、应用与发展

GMR 传感器是一种通过金属薄层将软磁层和硬磁层分离开的结构, 其发展是随着各向异性磁阻(MR)传感器的发展一起发展的。要了解 GMR 传感器与超导复合传感器的发展, 首先要分析 GMR 传感器的机理与现状, 然后在此基础上阐述超导

复合结构。

3.1 GMR磁传感器的原理

由磁性材料制作的导体的电阻在磁场作用下发生变化的现象叫做磁阻现象，这种现象被发现已经100多年了。R.P. Hunt发现，对坡莫合金薄膜施加的磁场方向改变 90° 时，薄膜的电阻有2%的变化，可以作为磁传感器的制作材料^[10]。更重要的是，这种薄膜可以制成微型化传感器，当磁化方向设置成单一方向时，传感器的噪声会非常小，只受到热噪声的影响，其信噪比可以达到97 dB。在磁记录方面的应用中，大约有20 dB的磁记录噪声，因此，MR技术远远优于其他方式，MR技术随之被广泛应用于硬盘驱动数据存储，并在微型化方面也有了应用。

巨磁阻抗效应最先是由Baibich等人提出的^[11]。他发现在低温条件下(4 K)，如果将铁、铬多层膜放置在上千高斯磁场中，其阻抗会发生50%以上的变化。由于在磁记录重放时磁头和小磁场检测方面的需要，使得利用巨磁阻抗效应的设备飞速发展^[12]。如今GMR传感器的尺寸能够达到微米级别，并能在室温环境下产生大于10%/Oe的电阻变化。

不同GMR系统的自旋轴其特征是不一样的，例如Baibich等人的GMR系统是Fe/Cr交替的多层膜，当所有这些层的磁化方向相同时，一半传导电流的自旋极化电子可以通过夹层移动而没有明显的磁性材料散射现象(低电阻)，而交替层的磁化方向反转时，所有的电子都会发生散射，不管这些电子是提速还是降速。四层薄膜的磁化轴方向要简单得多，反铁磁性的交替膜(例如Mn, Fe)复合到Co膜上，表明磁化方向在横轴方向，第二层磁化膜与软磁层NiFe层通过一个很薄的导电层(Cu层)分离开，这样的磁性薄膜具有可变的磁化方向，其两层膜之间的磁化角的改变引起了散射电子通过组合结构方式的多样性，这就使得这种结构的电阻变化比简单的MR电阻变化要大得多。

在灵敏度方面，GMR传感器在100 Hz磁场中的噪声大约为 $20 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，大于1 kHz时的约瑟夫森噪声极限(小于 $6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$)^[13]。

3.2 GMR/超导复合磁传感器的发展现状

2004年法国科学家Myrian等在*Science*上发表文章，报道了一种GMR/超导复合高精度磁传感器，它可以测量30 fT量级的微弱磁场，这已经达到高温超导SQUID的测量精度^[14]。其原理如图4所示，其结构包含一个GMR磁传感器和一个特制的超导环，超导环含有微桥结构，具有微桥结构的超导环具备放大磁场的作用。

超导环磁场放大是通过一个具有微米级微桥结构的大面积(几毫米宽)超导环实现的。当被测磁场垂直施加在此环时，在超导体中产生的超导电流会阻止磁通的进入，当超导电流通过微桥结构时，局部电流密度升高，该电流产生一定强度远高于被测磁场的磁场强度。此时，将一个磁敏元件如GMR磁传感器，放置于此环微桥结构的上部或者下部，就可以检测被放大的磁场。图5为理论计算得到的超导环周围磁场分布图^[15]。这幅图中利用GMR磁传感器测量微桥周围较强的磁场，推算出相对微弱的外界磁场，从而提高传感器的探测灵敏度。图中环的直径约为3 mm，微桥结构处的超导环宽度约为 $25 \mu\text{m}$ ，根据理论计算，其磁场大概被放大120倍，经过磁光设备实际检测，其磁场被放大100倍，用超导环复合了具有3.11%/mT灵敏度的GMR磁传感器之后，传

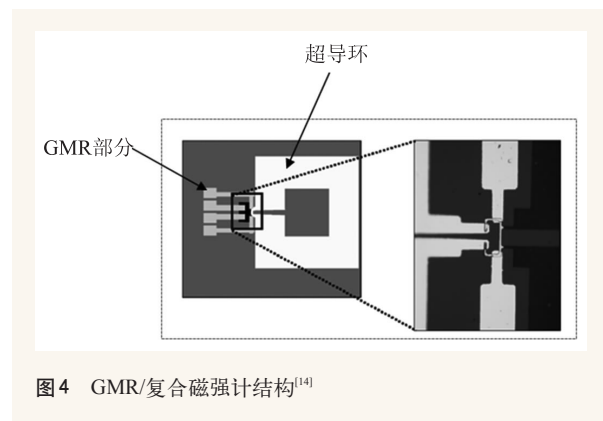


图4 GMR/复合磁强计结构^[14]

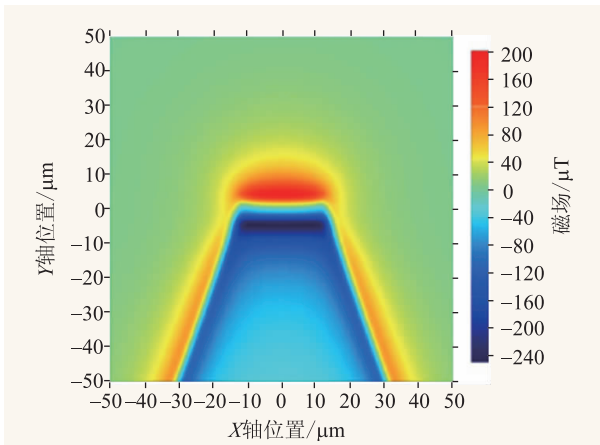


图5 超导环周围磁场分布

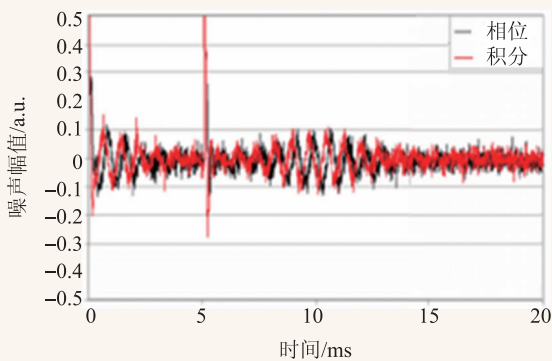


图6 核磁共振的信号在 320 kHz 的幅值响应^[17]

传感器的灵敏度大概为 311%/mT。

在这个结构中，GMR 传感器是 NiFe 层耦合 CoFe 层，硬磁层由反铁磁性层(如 IrMn, MnPt)耦合铁磁性层(CoFe)。整个层结构的电阻随两个层的磁化轴之间的角度变化，工业条件下制作的 150 mm 的晶片上可以得到 6%/mT—8%/mT 的电阻变化，微米尺寸的 MR 传感器可以得到 5%/mT 的电阻变化。在原型机里，得到电阻的变化为 2.13%/mT。

这个结构中的主要噪声包括热噪声和 1/f 噪

声^[16]。室温下的热噪声 N_T 可以由下式给出：

$$N_T = 2 \left[(k_B TR)^{1/2} \right], \quad (1)$$

式中 k_B 是玻尔兹曼常数，值为 $1.3806505 \times 10^{-23}$ ， T 是温度， R 是电阻值，当噪声为 $350 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 时，这个微桥结构的电流为 1 mA。在 4.2 K 时，这个微桥的灵敏度为 $40 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。测量电阻时，信号正比于感应电流，因此，该结构的灵敏度可以通过通入大电流的方式相应提高，但是要注意大电流所带来的热效应。

在低频时，噪声主要由 1/f 噪声决定，它使这一传感器的探测能力降低到几百 $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

表 1 给出了在 4 K 和 77 K 温度环境中的热噪声值^[16]。

和 SQUID 一样，复合传感器对较大范围的频率信号都具有平坦的频率响应，因此有希望应用于共振信号的探测。在低磁场中，相应的低共振频率下，标准调谐线圈有很低的灵敏度，因而平坦的频率响应变得更敏感。该课题组还制作了一套核磁共振装置，其偏振磁场只有几 mT，信号检测使用了在液氮中冷却的复合传感器^[17]。图 6 展示了水样品在一个自旋回波序列期间的相位和核磁共振信号积分的检测结果(频率 320 kHz, 8 mT)。

此外，该课题组还于 2012 年提出利用 GMR/超导复合结构阵列实现多通道脑磁成像(图 7)^[18]，并进行了平面梯度配置和测试，这种模式可以有效地降低环境中 50 Hz 的噪声信号，并用心磁信号模拟脑磁信号进行了测试。实验证实，该传感器在测量的实时性方面有显著的优势，但将其真正用于脑磁测量，还需进一步提高传感器的灵敏度。

表 1 复合磁强计的低温噪声

样品名称	测量放大倍数	表面面积/mm ²	最大感应电流/mA	77 K 时的灵敏度/(fT/√Hz)	4 K 时的灵敏度/(fT/√Hz)
Nb A	108	7×7	1	未至超导状态	600
Nb B	500	15×15	1	未至超导状态	140
YBCO A	160	9×9	15	150	32
YBCO B	600	17×17	10	25	5
YBCO C	1300	25×25	10	8	1.5

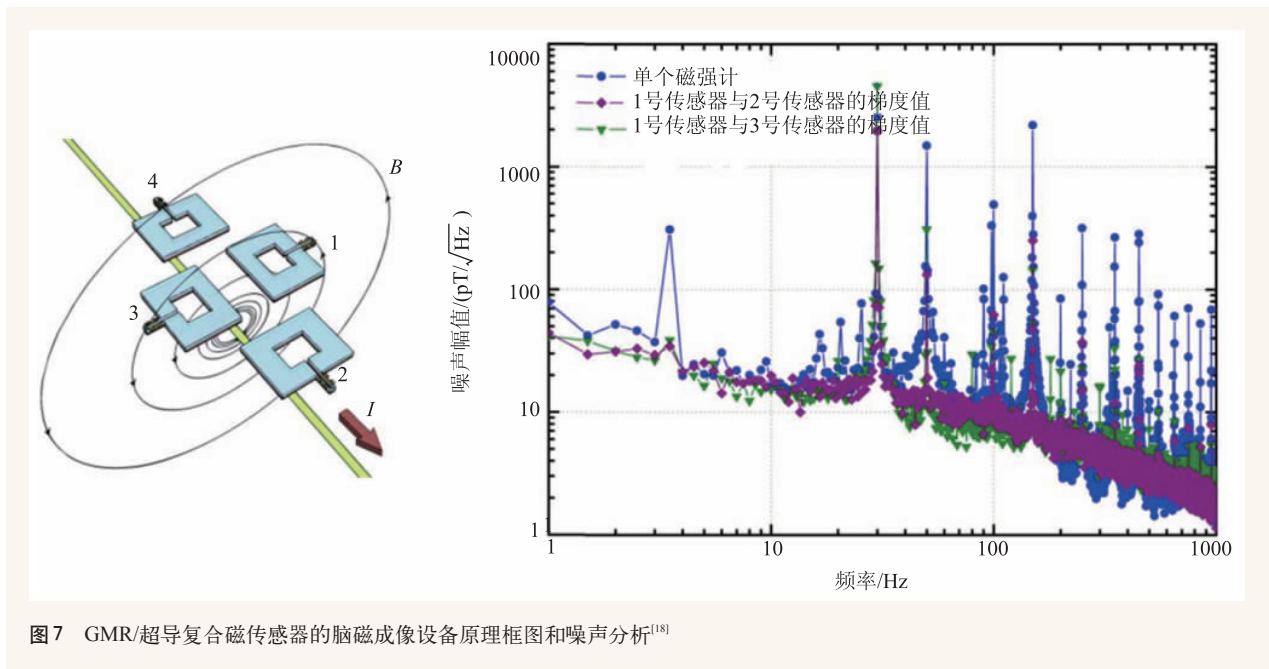


图7 GMR/超导复合磁传感器的脑磁成像设备原理框图和噪声分析^[18]

4 GMI/超导复合磁传感器的原理、应用与发展

自从1992年日本名古屋大学的 K.Mohri 等人首次在 CoFeSiB 软磁非晶丝中发现巨磁阻抗效应，人们在非晶带、纳晶带、薄膜、三明治/多层膜中相继发现 GMI 效应，这为 GMI 效应在传感器中的实际应用提供了更多的材料选择。

4.1 GMI/超导复合磁传感器的原理

GMI 即巨磁阻抗效应，是1992年日本科学家 K. Mohri 在 CoFeSiB 软磁非晶丝中通入交变激励电流，其阻抗值随沿着纵向施加的外磁场变化而发生显著变化的现象^[19]。GMI 传感器的发现为研制一种新型高灵敏度传感器提供了可能。在巨磁阻抗效应发现之初，其研究主要集中于非晶丝，但是非晶丝相对较脆，容易断裂，这就给丝传感器的制备和使用带来难度^[20]。而非晶带和薄膜在制备和使用上相对简单，并且薄

膜结构更易于实现小型化。对于薄膜来说，单层膜的 GMI 效应比较小，主要是因为单层膜的趋肤效应比较小。为了提高 GMI 效应，Panina 又提出一种三明治结构(F/M/F)，F 为铁磁材料层(通常为 CoSiB, CoFeSiB, FeSiCuNb 等)，M 表示导体材料层(通常为 Cu, Ag, Au)^[21]。由于中间导体层 M 的存在，三明治结构的电阻率比较低，只要铁磁层 F 的电感发生较大的变化，即可获得较大的巨磁阻抗效应。MoriKawa^[22]等人制作的三明治膜 CoSiB/Ag/CoSiB 的阻抗变化率可以达到 440%，灵敏度达到 49%/Oe，偏置磁场强度为 9 Oe，激励频率为 10 MHz，其三明治结构如图 8(a)所示。为了进一步增强 GMI 效应，Morikawa^[23]等人又做了带有绝缘层的多层膜结构(CoSiB/SiO₂/Ag/SiO₂/CoSiB)，其结构示意图如图 8(b)所示。其阻抗变化率可以达到 700%，灵敏度达到 300%/Oe，这种增

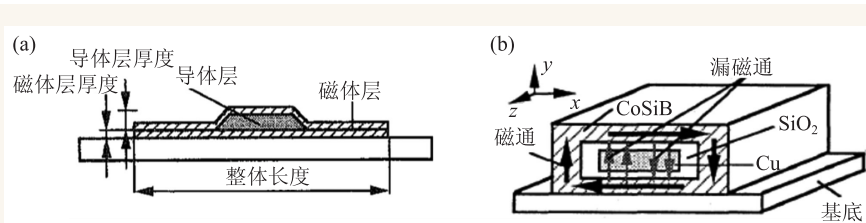


图8 (a)三明治结构示意图；(b)带有绝缘层的多层膜结构

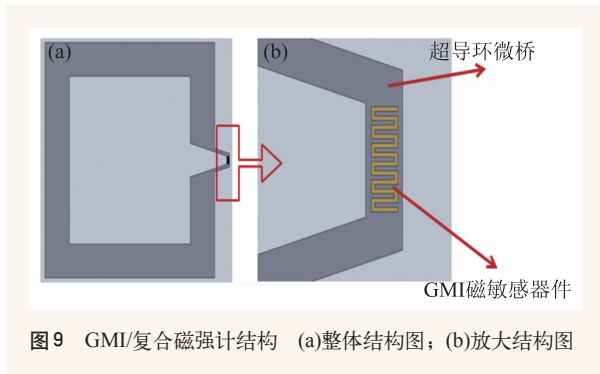


图9 GMI/复合磁强计结构 (a)整体结构图; (b)放大结构图

强效应的原理被解释为绝缘层 SiO_2 的存在导致激励电流从导体层 M 流过而不从铁磁层 F 流过导致。

通常 GMI 磁传感器是基于测量阻抗幅值的变化制作的, 而近期巴西科学家 Silva 等人利用测量 GMI 器件的相位随磁场的变化也可以制作更高精度的磁传感器^[24]。这种磁传感器测量的是阻抗相位随弱磁场变化的特性, 有望将 GMI 磁传感器的灵敏度提高 10 倍, 并且非常适合于制作小型化传感器。经过理论仿真, 这种传感器的灵敏度可以达到 887.91 V/Oe。本课题组对 GMI 磁传感器也做了相关研究^[25-27], 并研究了激励源频率、激励电流幅值、直流偏置等对磁传感器灵敏度的影响, 结果表明, 基于相位的 GMI 磁传感器减小了激励电流频率到 120 kHz 左右, 增加了传感器的灵敏度, 在微弱磁场测量方面具有显著优势。

4.2 GMI/超导复合磁传感器的原理

GMR/超导复合磁传感器的精度已经到达 30 fT 量级, 但是进一步提高精度就需要将外磁场进一步放大, 理论计算需放大到 4000 倍以上, 需要的超导样品直径需达到 2.5 cm。这样增大了系统体积和耦合难度, 而理论分析表明, GMI 元件的探测精度比 GMR 传感器高几个数量级, 并且 GMI 元件的多层膜制作也比 GMR 膜简单, 一般是 3 层, 最多 5 层。而 GMR 元件的多层膜结构则多达 10 余层, 制作要求也较高。基于上述情况, 采用高灵敏 GMI 多层膜元件代替 GMR 元件的传感器, 既可以兼顾小型化和制作上的可行性, 又可以达到超高精度。这种思路由本课题组首先提出并获得国家自然科学基金资助。

本课题组提出了一种 GMI/超导复合高精度磁传感器, 理论上可以测量 fT 量级以上的微弱磁场, 这已经达到了高温超导 SQUID 的测量精度。其原理如图 9 所示, 该结构包含一个 GMI 薄膜磁传感器和一个含有微桥结构的超导环。

超导环具有磁场放大作用, 当施加外磁场时, 微桥附近磁场直接数倍于外界探测磁场, 而 GMI 敏感器件的阻抗会随外界磁场的变化而变化, 将磁信号转化成电信号, 从而利用磁敏感器件探测出微桥磁场, 就可以推算出外界磁场实现磁场的测量。

在前期工作中, 本课题组利用双离子束沉积薄膜技术(dual-ion beam sputtering deposition films technology, DIBSD)制备 CoSiB 薄膜, 探究不同参数下 GMI 薄膜的阻抗变化比, 单层膜的最大变化可以达到 15.8 %/Oe^[28]。同时尝试利用化学溶液腐蚀法和离子束刻蚀法, 加工具备微桥结构的高温超导超导环, 并取得一定的成果^[29]。利用交流磁化率方法和电输运方法, 搭建了两种高温超导转变温度测量装置, 对超导环是否进入超导态进行了测试^[30-32]。搭建高温超导临界电流密度三次谐波无损测量装置, 对超导环的性能进行测试。并初步搭建出 GMI 传感器的原理样机, 通过电路设计提高传感器的灵敏度, 目前可以达到 219 mV/Oe。

5 结束语

目前, SQUID 磁传感器仍然是所有磁传感器技术中灵敏度最高的设备。然而, 尽管在技术上仍然有所进步, 在过去的几十年中, 基于 SQUID 技术的商业应用仍然有限。SQUID 系统的高价格是首要的限制因素。随着高温超导薄膜技术的发展, 为 SQUID 技术的广泛应用提供了条件。GMR 磁传感器和 GMI 磁传感器的发展, 特别是多层膜结构薄膜技术的发展, 为磁传感器的微型化提供了可能, 而 GMR/超导复合结构和 GMI/超导复合结构的提出, 则提供了一种超越或替代 SQUID 测量精度的方法, 并且在微型化方面具备 SQUID 无法比拟的优势, 预期可以获得较大的发展和应用。

参考文献

- [1] Mahdi A E, Panina L, Mapps D. *Sensors and Actuators A*, 2003, 105:271
- [2] Pannetier M, Fermona C, Goffa G L *et al.* *Science*, 2004, 304: 1648
- [3] Snoeck E, Gatel C, Serra R *et al.* *Physical Review B*, 2006, 73 (10):104434(6)
- [4] Koch H. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1997, 7(2):3738
- [5] Wikswo J P. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1995, 5(2):74
- [6] Yang T Q, Enpuku K. *Physica C*, 2003, 392(Part 2):1396
- [7] Kang C S, Lee Y H, Kwon H *et al.* *Physica Status Solidi A*, 2004, 201(8):1956
- [8] Lee Y H, Kwon H, Kim J M *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13(2):755
- [9] Kawai J, Adachi Y, Tsuyuguchi N *et al.* *Supercond. Sci. Techno.*, 2001, 14(12):1081
- [10] Hunt R P. *Proc. IEEE Transaction on Mafnetics*, 1971, 7 (1): 150
- [11] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* *Phys. Rev.Lett.*, 1988, 61: 2472
- [12] Kools J C S. *IEEE Transaction on Mafnetics*, 1996, 32(4):3165
- [13] Robbes D, Dolabdjian C, Saez S *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11(1):629
- [14] Pannetier M, Fermona C, Goffa G L *et al.* *Science*, 2004, 304: 1648
- [15] Pannetier M, Fermona C, Goff G L *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, 15(2):892
- [16] Pannetier M, Fermona C, Goffa G L *et al.* *Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, 290-291: 1158
- [17] Pannetier-Lecoeur M, Fermon C, Polovy H *et al.* GMR-based sensors for ultra-sensitive magnetometry. *Sensors*(见:2009 IEEE 数据库, 2009, 1856—1859)
- [18] Campiglio P, Caruso L, Paul E *et al.* *IEEE Transaction on Mafnetics*, 2012, 48(11):3501
- [19] Mohri K, Kawashima K, Kohzawa T. *IEEE Transaction on Magnetism*, 1992, 28(5):3150
- [20] Larin V S, Torcunov A V, Zhukov A *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, 249:39
- [21] Panina L V, Mohri K, Uchiyama T *et al.* *IEEE Transaction on Magnetism*, 1995, 31(12):49
- [22] Morikawa T, Nishibe Y, Yamadera H. *IEEE Trans.Magn.*, 1997, 33:4367
- [23] Morikawa T, Nishibe Y, Yamadera H *et al.* *IEEE Transaction on Magnetism*, 1996, 32:4965
- [24] Silva E C, Gusmão L A P, Barbosa C R H *et al.* *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(3):035204
- [25] 蒋颜玮, 房建成, 王三胜. *测试技术学报*, 2011, 25(2):183
- [26] 贺同福, 王三胜, 张一茗. *低温与超导*, 2014, 42(3): 1
- [27] 杨慧, 王三胜, 郭恺 等. *微纳电子技术*, 2011, 48(8):507
- [28] Silva E C, Gusmão L A P, Barbosa C R H *et al.* *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(3):035204
- [29] Wang S S, Chu X H. The Effect of Varying Current on the Impedance Phase Characteristics of CoFeSiB Amorphous Ribbon. Submitted
- [30] 郭恺, 王三胜, 程远超. *微纳电子技术*, 2011, 48(2):103
- [32] 程远超, 王三胜, 褚向华 等. *低温物理学报*, 2012, 34(2):105

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用,均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029

《物理》编辑部