

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311723

超导/磁阻式复合磁传感器高灵敏及三轴化研究*

张琦,潘孟春,雷绍钰,胡佳飞,胡悦国
(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

摘要:超导/磁阻式复合磁传感器利用超导磁放大器上千倍的磁场放大能力,可大幅提升磁阻式传感器灵敏度,有望实现 fT 级的磁场分辨力,满足水下目标探测、生物磁场检测等新型弱磁探测需求。经过几十年的研究,超导/磁阻式复合磁传感器相关工作取得了重要进展和系列成果。首先从复合磁传感器工作原理、高灵敏和三轴化研究现状等方面进行了系统的回顾和总结,其中超导磁放大器的放大倍数在实验上已经超过 1 000,低温下(4.2 K)的热噪声仅为 $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$,然后针对目前存在的问题对下一步研究工作进行了简要展望。论文相关工作对于提升超导/磁阻式复合传感器性能、促进其推广应用具有重要的借鉴和指导意义。

关键词: 超导/磁阻式复合磁传感器;超导磁放大器;高灵敏;三轴化

中图分类号: TH70 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460

Research on the highly sensitive and triaxial superconducting/MR composite sensors

Zhang Qi, Pan Mengchun, Lei Shaoyu, Hu Jiafei, Hu Yueguo

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The superconducting/magneto-resistive (MR) composite magnetic sensor is capable of greatly improving the sensitivity of the MR sensor due to thousands of magnetic field magnifications of the superconducting magnetic amplifier. It is expected to achieve the magnetic field resolution of fT level. Thus, the demands of new weak magnetic detection could be satisfied, such as underwater target detection and biological magnetic field detection. After decades of research, the related works of superconducting/MR composite sensors have made important progress and a series of achievements. In this article, the working principle, highly sensitive, and triaxial research status of the composite magnetic sensors are systematically reviewed and summarized. The magnification of the superconducting magnetic amplifier has exceeded 1 000 experimentally, and the thermal noise at low temperature (4.2 K) is only $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Furthermore, the next research work is also briefly prospected in view of the existing problems. The related works in this article can provide significant guidance for improving the performance of superconducting/MR composite sensors and promoting its popularization and application.

Keywords: superconducting/MR composite sensors; superconducting magnetic amplifier; highly sensitive; triaxial

0 引言

获取磁信息是认识和应用磁的基础,这需要借助磁传感器。自人类步入近代社会以来,磁传感器在地磁导航、无损检测、资源勘探等应用领域与场景中,都扮演着十分重要的角色^[1-2]。然而,随着现代科学技术的发展,

各类新式的磁信息获取需求逐渐涌现,例如水下目标探测、生物磁场检测,对磁传感器性能提出了小型化、高灵敏(fT级)的新要求^[3-5]。

磁传感器种类繁多,性能和应用场合各异。其中,由于高灵敏磁传感器可以实现极高的磁场分辨力,近些年在弱磁探测领域得到了极大的发展与应用。根据原理不同,高灵敏磁传感器主要有原子磁力仪、超导量子干涉仪

(superconducting quantum interference device, SQUID)和磁阻式传感器3大类。原子磁力仪虽然磁分辨率能够达到 fT 量级,但只能在 10 nT 以下工作,且需要复杂的磁屏蔽、磁补偿、光信号发射与检测系统等,使得系统体积难以满足小型化应用需求^[6-7]。SQUID同样可以实现 fT 级磁场的测量,但体积大、功耗高、维护成本高昂,而且磁通锁定容易失败^[8-9]。

磁阻式传感器根据磁阻原理分为巨磁阻抗(giant magneto impedance, GMI)磁传感器、各向异性磁电阻(anisotropic magnetoresistance, AMR)磁传感器、巨磁电阻(giant magnetoresistance, GMR)磁传感器、隧道磁电阻(tunnel magnetoresistance, TMR)磁传感器等,其阻值会随外磁场变化而变化,从而实现磁场测量。其中,TMR磁传感器具有饱和磁场低、成本低、灵敏度高等优点,目前分辨率已达到 pT 级水平^[10-11]。为了进一步提升分辨力,通常采用软磁材料制成的外部磁聚集器对磁场进行聚集放大,但是放大倍数有限(通常 $10\sim 50$ 倍)且容易引入剩磁和磁滞^[11]。近年来,研究人员利用超导薄膜制备出了一种具有特殊环状结构的磁通-磁场转换放大器(下文简称“超导磁放大器”),可以实现上千倍的磁场增益^[12-13],将其与磁阻式传感器(尤其是TMR磁传感器)相结合,有望发展成为一款小型化、 fT 级灵敏的新型复合磁传感器。

1 超导/磁阻式复合传感器工作原理

超导/磁阻式复合传感器的概念最早由Robbes等^[14]提出,其基本结构如图1(a)所示,由超导磁放大器和磁阻传感器组成。其中,超导磁放大器是用超导薄膜制备而成的闭合环路,用于放大磁场,磁阻传感器用于感知磁场变化并将磁场量转换为电学量。受此启发,法国皮埃尔和玛丽·居里大学的Pannetier等^[15]利用先进的磁光技术,研究了外加磁场作用下钇钡铜氧(yttrium barium copper oxide, YBCO)环形超导薄膜中的磁场和电流分布,并通过理论推导得到了超导环中电流密度分布及磁场分布公式。结果表明,通过对超导环进行合理设计,在某个区域设置一段十分狭窄的结构(窄区),可实现磁场的转换放大作用^[16]。

如图1(b)所示,超导/磁阻式复合传感器的基本工作原理为:在超导临界温度以下,当有外部磁场 B_0 垂直穿过超导磁放大器时,由于迈斯纳效应会产生屏蔽电流 I ,以维持超导环内部磁通不变。

$$I = \frac{B_0 \cdot S}{L} \quad (1)$$

其中, S 为超导磁放大器有效面积, L 为超导磁放大器电感。当屏蔽电流通过窄区结构时,电流密度会迅速

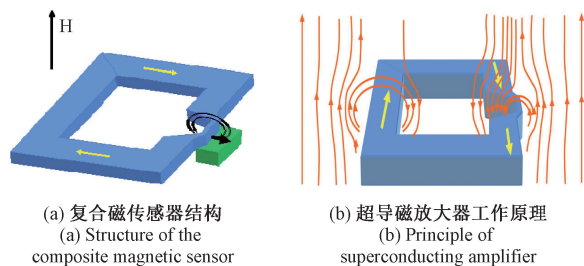


图1 超导/磁阻式复合传感器结构及工作原理
Fig. 1 Structure and principle of the superconducting/MR composite sensor

增大,由此产生一个比外部垂直磁场更强的局部感应磁场。该放大磁场被窄区附近的磁阻传感器所敏感,即可实现灵敏度和分辨力的大幅提升。由于放大磁场随着与超导窄区距离的增大而迅速衰减,因此并不适用于传统的磁通敏感器(诸如线圈、磁通门等),可直接敏感磁场大小的磁阻式传感器无疑是最佳选择。因此,将超导磁放大器和磁阻式传感器组合而成的超导/磁阻式复合传感器得到了研究人员的广泛关注。

2 高灵敏超导/磁阻式复合传感器

由于超导磁放大器能够实现很大的磁场增益,因此,人们的工作重心主要放在提高超导/磁阻式传感器的灵敏度和分辨力上,相关研究团队包括法国Pannetier团队、日本Tsukada团队、国内的中科院电工所和国防科技大学等,经过多年发展,取得了系列成果。

2.1 超导/GMR复合传感器

2004年,Pannetier等^[12]率先进行了复合磁传感器的实验研究,他们在同一衬底上采用薄膜直接生长的方式将GMR器件与Nb基超导磁放大器相结合,成功制备出超导/GMR复合磁传感器,如图2所示。具体制备过程包含如下4个步骤:GMR磁性薄膜生长、GMR器件图形化制备、绝缘层生长及抛光、Nb超导薄膜生长及剥离。

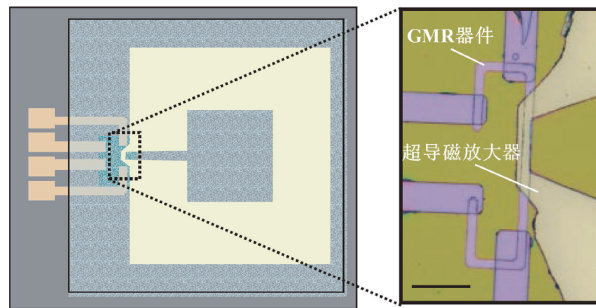


图2 法国Pannetier团队超导/GMR复合磁传感器结构
Fig. 2 Superconducting/GMR composite sensor structure proposed by Pannetier group

当其工作于 4.9 K 时,采用 1 mA 供电条件,超导磁放大器磁场增益达到 108 倍,复合传感器磁灵敏度为 213%/mT,器件分辨力可达 $540 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@100 \text{ Hz}$ 。其磁阻曲线如图 3(a) 所示,在一定范围内,磁阻会随外磁场增加而线性增加,当磁场增加至约 $6 \mu\text{T}$ 时,超导屏蔽电流达到临界值,磁传感输出将维持恒定;此时,如果减小外磁场,输出也将随之减小,直至达到反向饱和。

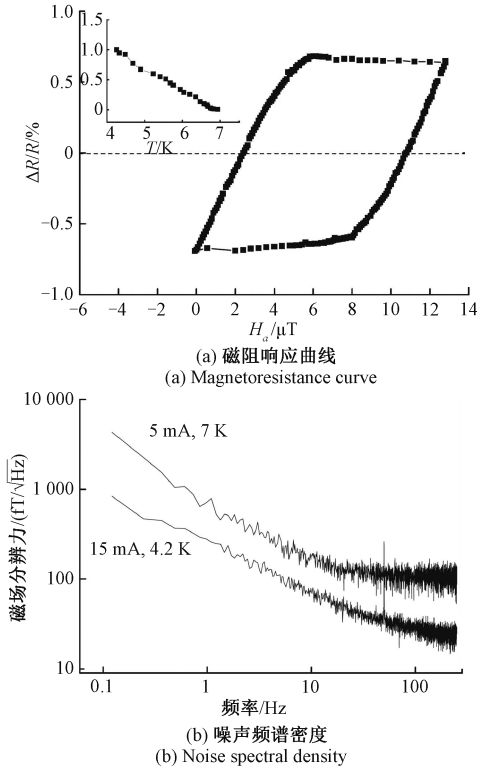


图3 超导/GMR 复合磁传感器测试结果

Fig. 3 Testing results of the Superconducting/GMR composite sensor

为了改善超导/GMR 复合磁传感器性能,一方面可以从 GMR 磁传感器入手,设法提高其信噪比;另一方面,可以通过结构尺寸设计,增加超导磁放大器磁场增益。

1) GMR 磁传感器

Pannetier 团队^[12]首先研究了供电水平对 GMR 器件性能的影响,发现当 GMR 器件工作在较大电流时会有更高的信噪比。由于利用高温超导薄膜制备的超导磁放大器具有更高的超导临界转变温度,可接受 GMR 器件工作于更高的工作电流下,拥有更高的温度宽容度,因此该团队利用高温超导薄膜 YBCO 在同一衬底上制备了 YBCO 基超导/GMR 复合传感器。当其工作于 77 K 时,GMR 供电电流可提高至 5 mA,此时磁场分辨能力将提升到约 $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@100 \text{ Hz}$;当其工作于 4.2 K 时,供电电流可进一步提高至 15 mA,此时器件分辨力将达到 $32 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@100 \text{ Hz}$,如图 3(b) 所示。

增加 GMR 工作电流主要是为了提高其信号水平,也可以从降低噪声出发来改善 GMR 器件性能。GMR 噪声主要分为热噪声和 $1/f$ 噪声,其中低频下的 $1/f$ 噪声影响最为严重。为了抑制 GMR 器件 $1/f$ 噪声影响,目前主要有两种手段:(1) 磁轭型结构设计:GMR 的磁噪声主要是由于铁磁自由层磁矩存在多畴结构,采用 Yoke 型磁轭结构(如图 4(a) 所示)可以有效抑制多畴态的形成,从而有效减弱磁噪声^[17]; (2) 磁场斩波调制技术: $1/f$ 噪声幅值随着频率的增加而迅速衰减,因此可以将待测低频磁场调制到高频区域进行测量。例如,Pannetier 团队通过对超导结构进行周期性的局部加热来控制超导环路的“开”“断”状态,从而实现磁场的高频调制^[16]。由于加热频率可以达到 kHz 范围,因此信号能够调制到 GMR 器件的高频白噪声区域,从而抑制 $1/f$ 噪声的影响。如图 4(a) 所示为包含加热结构的复合器件局部显微图,从图 4(b) 相应的实验测试结果可以看出,通过周期性加热,频率 20 Hz 幅度 100 nT 的正弦磁场信号被调制到高频区域,验证了加热控制超导环路通断从而调制磁场的可行性。这种方案可以使复合传感器低频下的分辨力进一步提高 1~2 个数量级。

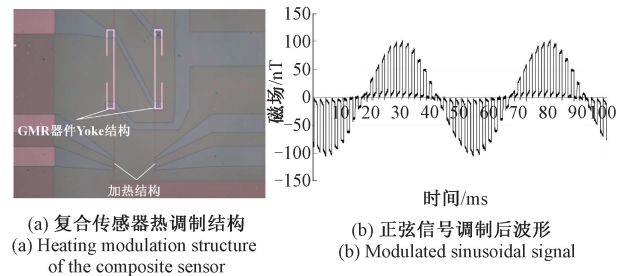


图4 抑制 $1/f$ 噪声的超导热调制方案

Fig. 4 Heating modulation method for $1/f$ noise reduction

2) 超导磁放大器

针对如何提高超导/GMR 复合磁传感器的灵敏度,Pannetier 团队^[18-20]在随后的几年间围绕超导磁放大器开展了一系列性能优化研究。他们首先通过理论推导和仿真分析得到了窄区附近的磁场分布情况,然后制备出器件并利用磁光成像技术对局域磁场进行实际测试,实测结果与理论计算具有很好的一致性^[18],验证了理论推导结果的正确性。在此基础上,进一步分析了不同超导窄区结构对磁场放大倍数的影响规律,结果表明增加超导磁放大器面积和减小窄区宽度都有利于提高磁场放大倍数^[19-20]。表 1 列出了一些不同规格尺寸的超导/GMR 复合传感器的磁场增益和噪声指标^[20]。可以看出,器件在 77 K 和 4.2 K 时,热噪声水平最低已经达到 $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$,这一噪声水平已经十分接近 SQUID 器件。如果进一步增大超导环尺寸并减小窄区宽度,4.2 K 温

表1 不同尺寸超导/GMR 复合磁传感器的性能对比

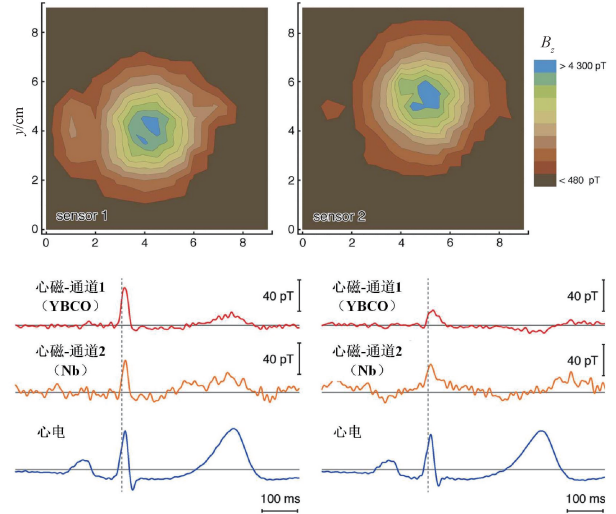
Table 1 Performance comparison of composite magnetic sensors of different sizes

样品	实测磁场增益	超导环面积 /mm ²	窄区宽度 /μm	GMR 工作电流 /mA	热噪声@ 77 K /(fT/√Hz)	热噪声@ 4.2 K /(fT/√Hz)
Nb-100	108	7×7	5	1	—	600.0
Nb-500	500	15×15	5	1	—	140.0
YBaCuO	160	9×9	5	15	150	32.0
YBaCuO	600	17×17	5	10	25	5.0
YBaCuO	1 060	20×20	5	10	10	2.0
YBaCuO	3 500(估计值)	25×25	2	10	3	0.6

度下的热噪声值预计将减小到 0.6 fT/√Hz, 达到亚 fT 量级。

应用方面,2007 年以来,该团队研制的复合传感器被陆续用于核磁共振成像、心磁等微弱磁场探测研究,展现出巨大的应用潜力。2009 年,利用 GMR 中自由层在 GHz 频段的共振特性,将超导/GMR 复合传感器应用于 MHz 频段的核四极矩共振(nuclear quadrupole resonance, NQR)检测,其性能可与优化的谐振线圈相媲美^[21-22]。进一步,利用 NQR 技术检测氮(¹⁴N)元素,可实现对多种炸药的快速探测^[23-24]。

同时,利用超导/GMR 复合传感器获得心磁图信号,并与传统心电图信号进行对比,发现该传感器的灵敏度已经完全满足心磁信号的测量要求^[20,25]。不仅如此,Pannetier 团队利用超导/GMR 复合传感器体积小、结构简单、灵敏度高等优点将其制备成阵列,可以实现多通道生物磁信号成像^[26]。实验中通过 4 个超导/GMR 复合磁传感器组成阵列对心磁金属导线磁信号进行测试,如图 5 所示,证实了该传感器在实时测量方面具有明显优势。若能进一步提高器件的灵敏度,将有望实现脑磁测量。



(b) 心磁测量结果
(b) Magnetocardiographic recording results

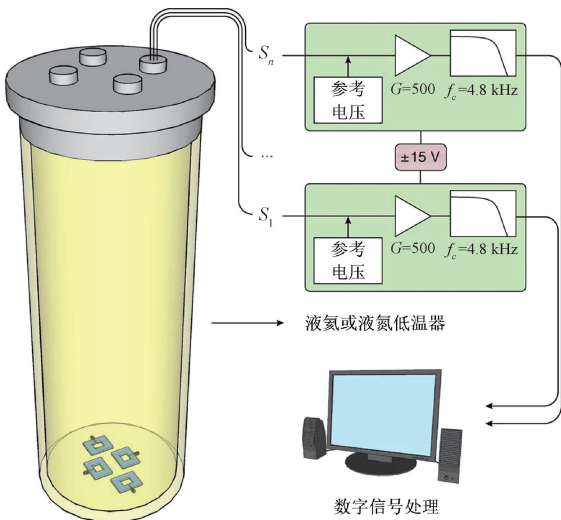
图 5 超导/GMR 复合心磁测量装置及测量结果

Fig. 5 Superconducting/GMR sensing setup for magnetocardiographic recording and related results

由于 GMR 工作时需要相对较大的电流来提高信噪比,增加了传感器功耗,而且,GMR 的磁阻变化率相对较低,限制了复合传感器灵敏度。若要进一步提升传感器分辨力,就需要使用性能更加优异的 GMI 或者 TMR 器件来代替 GMR 器件。

2.2 超导/GMI 复合传感器

Wang 等^[27]和贺同福等^[28]2014 年设计了一种超导/GMI 复合传感器,结构如图 6(a)所示。该团队利用双离子束沉积薄膜技术制备 GMI 薄膜,并探究了不同参数下薄膜的阻抗变化,制备得到了最大灵敏度为 15.8%/Oe 的单层膜。同时,利用化学溶液腐蚀法和离子束刻蚀法,加工制备具有微桥结构的高温超导环,并通过理论仿真和实验测试获得了磁场放大倍数。对于具有 500 μm 长、30 μm 宽的窄桥结构的超导环,图 6(b)所示的磁光克尔测试结果表明,在 5 K 时磁场放大倍数约为 31 倍,证实



(a) 超导/GMR 心磁测量装置

(a) Experimental setup for magnetocardiographic testing

了超导环的磁通转换放大作用,但是由于超导环面积较小,其相对于传统的软磁聚集器并没有取得明显的提升。

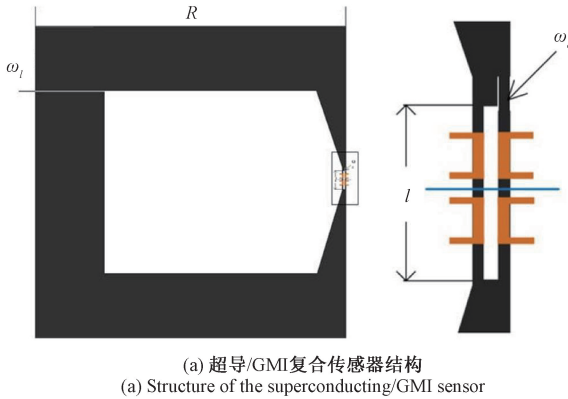


图 6 北航 Wang 团队超导/GMI 复合传感结构及磁光成像结果

Fig. 6 Superconducting/GMI composite sensor structure and the magneto-optical imaging proposed by Wang group

2.3 超导/TMR 复合传感器

相比 GMR 来说,TMR 器件具有更高的灵敏度、更低的功耗、更好的温度稳定性以及更宽的线性范围等优势。用 TMR 器件代替 GMR 器件制备超导/TMR 复合磁传感器,有望进一步提升传感器灵敏度,满足 fT 级微弱磁场检测需求。

2017 年,日本 Tsukada 团队使用两块高温超导板代替超导环完成磁通聚集功能^[29-31],如图 7 所示。通过放置于超导板中间的 TMR 磁敏元件感应放大后的外磁场,即可实现磁传感器灵敏度和分辨力的提升。他们通过改变狭窄区域宽度等参数得到了不同构型布局对复合磁传感器灵敏度的影响规律,最终在室温和液氮温度下分别获得了 $18 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ Hz}$ 和 $9 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ Hz}$ 的磁场分辨力,该指标相对于单独 TMR 器件有了一定程度的提高。这是采用 TMR 器件与超导磁放大器进行复合的第一次实验尝试,然而,由于制备工艺受限,该方案采用超导板来代替超导环,而两块超导板间距过大,使得复合磁传感器的分辨力水平仅达到 nT 量级。

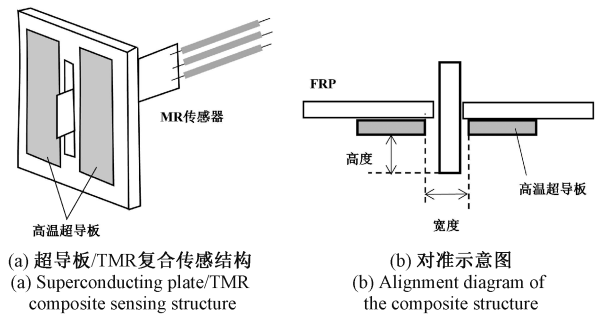


图 7 日本 Tsukada 团队超导/TMR 复合磁传感结构
Fig. 7 Superconducting/TMR composite sensor structure proposed by Tsukada group

直到 2018 年,中科院电工所的 Wu 等^[32]才真正实现了超导环与 TMR 器件的复合,制备并验证了超导/TMR 复合传感器的可行性。主要原因是 TMR 器件的制备工艺复杂,而高温超导薄膜和 TMR 磁性多层膜都需要进行退火处理且退火参数存在差异,这势必会对超导磁放大器以及 TMR 器件性能造成破坏,使得在同一衬底上直接生长超导与 TMR 的复合薄膜变得十分困难。为此,中科院电工所首先在不同衬底上分别制备得到 TMR 磁传感器器件和超导磁放大器,然后采用贴合的方式将超导窄区对准固定在 TMR 器件上方。其中,TMR 磁敏感器件由 12 个磁隧道结(magnetic tunnel junction, MTJ)串联而成,超导环使用 YBCO 薄膜,分别如图 8(a)和(b)所示。该团队实验研究发现,对于窄区宽度为 $20 \mu\text{m}$ 的器件,在 77 K 时灵敏度达到了 $18.1\%/\text{Oe}$,相比 TMR 器件自身提高了约 21 倍,如图 8(c)所示。图 8(d)中的噪声频谱密度结果显示,复合磁传感器在 2 Hz 处的分辨力达到 $67 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。但由于技术限制,过厚的低温胶导致 TMR 器件与超导环窄区之间的距离偏大(约 $50 \mu\text{m}$),限制了器件的灵敏度。

2022 年,国防科技大学的 Sun 等^[33-36]在总结超导/TMR 复合磁传感器研究工作的基础上,从磁敏机理、仿真与设计、制备及测试等方面进一步展开了深入研究,取得了系列研究成果。

1) 超导/TMR 复合磁敏机理及仿真方法

首先,研究了超导磁放大器在外磁场作用下产生超导转换放大的内在机理以及实现过程。从超导磁放大器的电磁特性着手,通过联立麦克斯韦方程与伦敦方程,推导了超导磁放大器内部磁通锁定、超导电流变化、磁场转换及放大机理,为超导/TMR 复合磁传感器的研究提供了理论基础。

在磁敏机理研究基础上,针对超导磁放大器高效仿真需求,探索了仿真方法。首先基于模型近似的有限元仿真方法实现了对简单形状超导磁放大器超导电流、

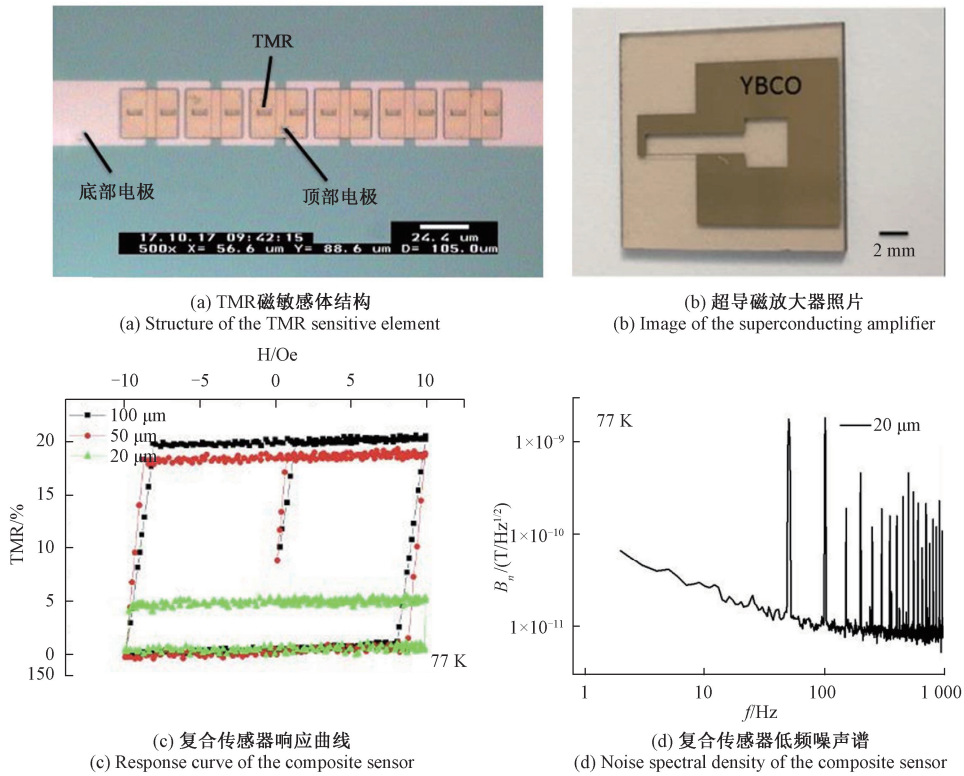


图8 中科院 Wu 团队超导/TMR 复合磁传感结构及测试结果

Fig. 8 Superconducting/TMR composite sensor structure and tested results proposed by Wu group

电流密度分布以及放大磁场分布的仿真计算^[35]。仿真流程如图9所示:(1)首先建立超导磁放大器有限元模型,利用软件中的线圈功能模块仿真计算出超导环电感 L ,然后利用有效面积的近似公式计算出 S (例如:方形超导环有效面积为内外径乘积),即可通过式(1)得到超导屏蔽电流 I ;(2)利用伦敦方程和比例约束边界条件仿真得到超导电流密度 J ;(3)利用安培定律获得窄区附近放大磁场分布 B 和磁场放大倍数 G 。

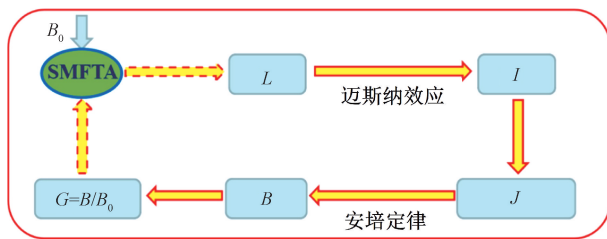


图9 超导环模型近似有限元仿真方法

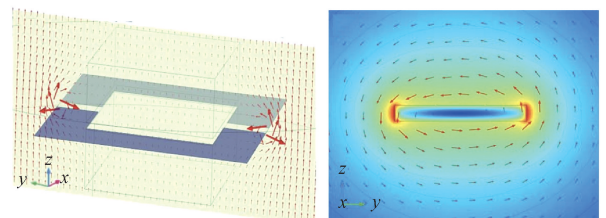
Fig. 9 Finite element simulation method of the superconducting ring based on model approximation

上述模型近似方法仅适用于简单形状的超导环,为了进一步满足复杂超导磁放大器结构的仿真需求,利用超导体电流密度与电场之间的非线性指数函数关系,即

E-J 幂次定律:

$$E = E_c (J/J_c)^n \quad (2)$$

其中, E_c 是超导体的失超电压, J_c 是给定电场 E_c 条件下超导临界电流密度值, n 是拟合指数,用于描述超导材料特性和微观结构的特征量。以此为基础,提出了基于E-J幂次定律的超导磁放大器仿真方法^[33],为超导磁放大器设计提供了高效仿真手段,其基本流程为:首先利用E-J定律仿真得到粗略的超导电流密度,然后进行面积分获取超导电流值,接下来的步骤与模型近似方法的后两步相同。仿真模型及结果如图10所示。



(a) 超导环磁场分布
(a) Magnetic field distribution of superconducting ring

(b) 窄区附近磁场分布
(b) Magnetic field distribution near constriction

图10 超导环 E-J 幂次定律有限元仿真模型及结果
Fig. 10 Finite element simulation model and results of superconducting ring based on E-J power law

2) 超导/TMR 复合磁传感器结构设计

同样,分别从 TMR 磁敏器件和超导磁放大器两方面进行设计。首先针对 TMR 器件,根据 $1/f$ 噪声模型,推导并建立了其磁场分辨力公式:

$$D(\text{T}/\text{Hz}^{0.5}) = \frac{1}{S_{\text{norm}}} \sqrt{\frac{1}{N} \frac{\alpha_{\text{H}}}{A_0} \frac{1}{f}} \quad (3)$$

其中, S_{norm} 为归一化灵敏度, N 为 MTJ 串联个数, α_{H} 为 Hooge 系数, A_0 为 TMR 结区面积, f 为频率。进一步,通过减小势垒层厚度来减小磁性多层膜 α_{H} 值、增大结区面积和隧道结串联个数,来抑制 TMR 器件噪声^[34]。实验结果表明,结构优化后的 TMR 器件灵敏度虽有一定程度降低(图 11(a)),但噪声从 $671 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}@13 \text{ Hz}$ 降低到 $32 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}@13 \text{ Hz}$,对应 13 Hz 频点处的磁场分辨力从 $26.8 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 改善为 $4.1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$,如图 11(b) 所示。

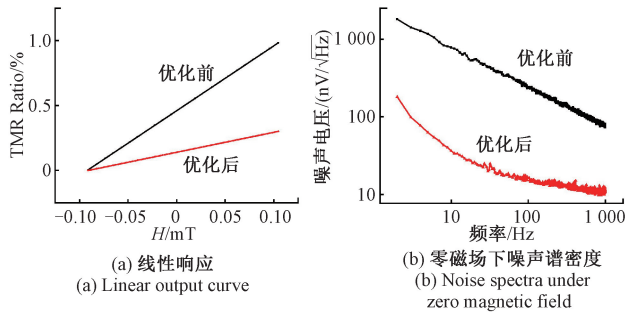


图 11 优化前后的 TMR 敏感性能测试结果

Fig. 11 Testing results for TMR sensing element before and after optimization

然后,针对超导磁放大器,基于建立的有限元仿真方法对其关键结构参数进行了设计。由于超导磁放大器需要在超导薄膜晶圆上进行批量制备,因此将其形状确定为方形。

进一步,仿真分析了超导环外径 R_0 、窄区宽度 w 、离窄区间距 $Height$ 和键合水平偏差 dev 等参数对超导环磁场放大倍数 G 的影响规律^[34],分别如图 12(a)~(d) 所示。结果表明,优化后的磁场放大倍数在现有工艺条件下能达到 1 000 倍左右,将其与 TMR 器件复合能够极大地提高磁传感器的分辨能力。

最后,在分别完成 TMR 器件和超导磁放大器结构优化设计后,为了进一步增强复合磁传感器对外磁场的放大能力,在超导环两侧设计了一对垂直软磁聚集器(magnetic flux concentrator, MFC)用于磁场的初步放大,然后该磁场经过超导磁放大器进行二次放大,从而提高复合传感器灵敏度^[33],其结构如图 13(a) 所示。通过对软磁聚集器的水平尺寸、高度等结构参数进行优化设计,最终的磁场放大倍数在实验上能进一步提高约 2 倍,如图 13(b) 灵敏度曲线所示。

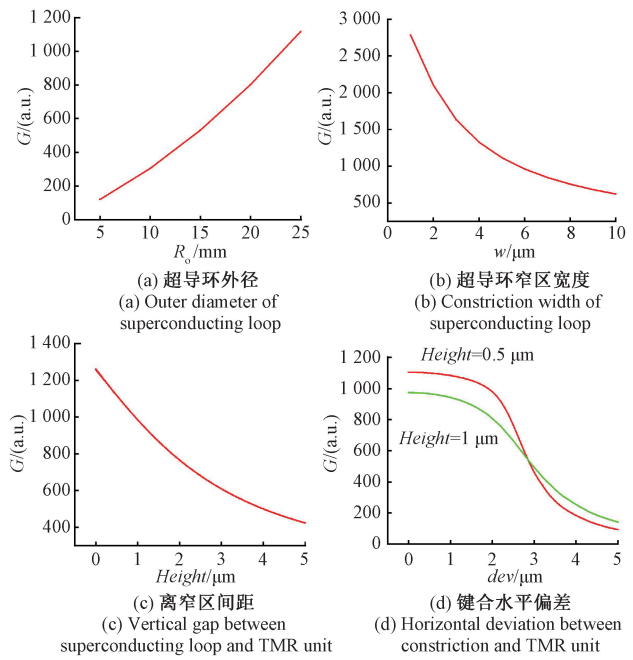


图 12 超导环关键结构参数对其磁场放大倍数影响规律

Fig. 12 Influence of key structural parameters of superconducting ring on its magnetic field magnification

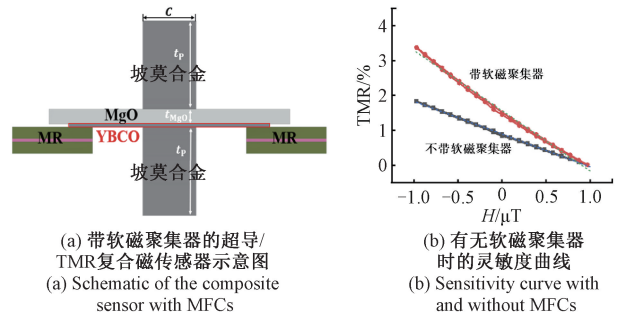


图 13 带软磁聚集器的超导/TMR 复合磁传感器方案

Fig. 13 Scheme of the superconductor/TMR composite sensor with MFCs

3) 超导/TMR 复合磁传感器制备工艺

复合传感器工艺主要包括超导磁放大器制备、TMR 器件制备以及两者的键合。首先,在 MgO 衬底上进行高质量高温超导 YBCO 薄膜生长后,经过高精度图形化刻蚀,实现了超导磁放大器的高精度制备。

然后,提出了以 MTJ 倾斜刻蚀为核心的 TMR 工艺方案,解决了 MTJ 刻蚀时反射射导致的旁路电阻难题^[36],如图 14 所示,并降低了电极电阻引入的串联电阻,提高了器件的 TMR 值与一致性,实现了高性能高一致性的 TMR 磁敏感单元制备。

进一步,突破了二次对准的倒装焊粘贴工艺,通过多步键合条件优化,实现了超导磁放大器和 TMR 敏感单元

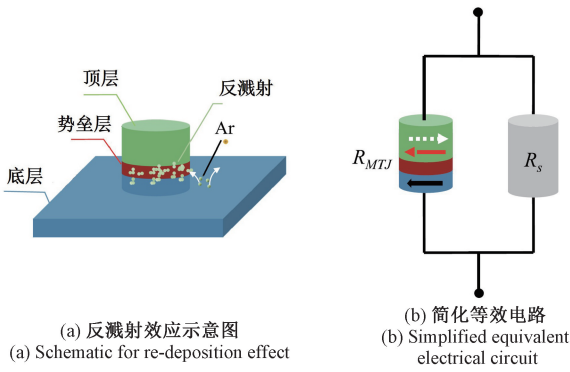
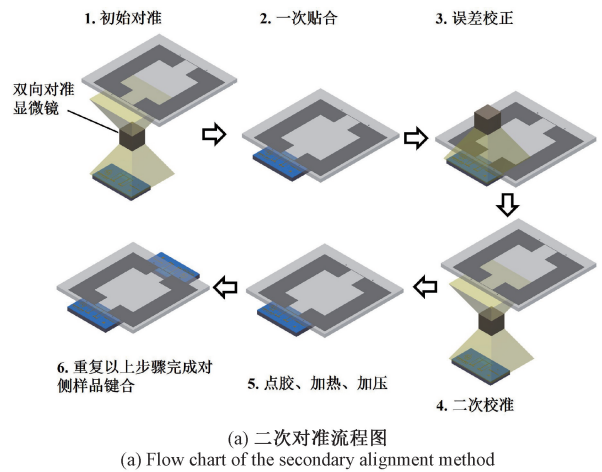


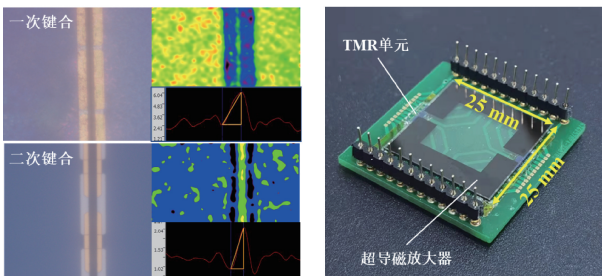
图 14 反溅射效应示意图及简化电路图

Fig. 14 Schematic for re-deposition effect and the simplified electrical circuit diagram

之间的高精度复合^[34]。具体流程如图 15(a)所示,首先将超导磁放大器和 TMR 器件吸附在机械臂的两侧,并使用双面准直显微镜调整超导磁放大器的位置进行初始准直。然后机械臂以一个较轻的压力将超导磁放大器置于 TMR 单元上方,利用 MgO 衬底的透明特性来观察对准并获得设备系统偏差,并依此来校准系统误差。校准系统误差之后,机械臂重新吸收超导磁放大器进行二次对准。最后,在 TMR 单元表面滴下底部填充胶粘剂,并在加热



(a) 二次对准流程图 (a) Flow chart of the secondary alignment method



(b) 一次和二次键合效果 (b) Effect of one-step and optimized two-step bonding (c) 复合传感器实物图 (c) Photograph of the final fabricated composite sensor

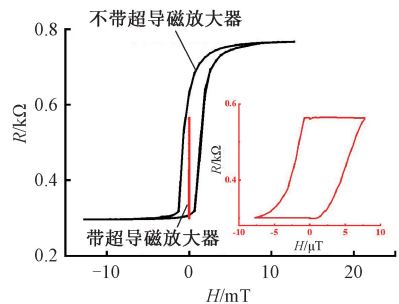
图 15 超导/TMR 复合传感器优化后的键合工艺

Fig. 15 Optimized bonding technique of the superconducting/TMR composite sensor

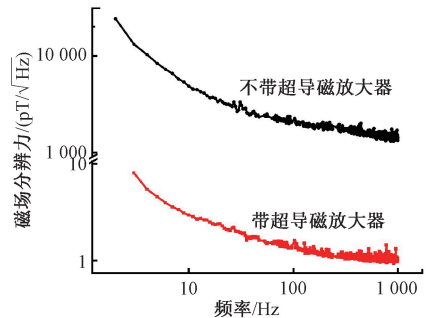
时施加压力,实现高精度复合工艺。经表征,所制备的复合传感器样品平面偏差小于 $0.5 \mu\text{m}$ 、垂直间隙低至 $0.5 \mu\text{m}$,如图 15(b)所示,为复合磁传感器的高灵敏度提供了保证。最终的复合传感器实物如图 15(c)所示。

4) 超导/TMR 复合磁传感器测试分析

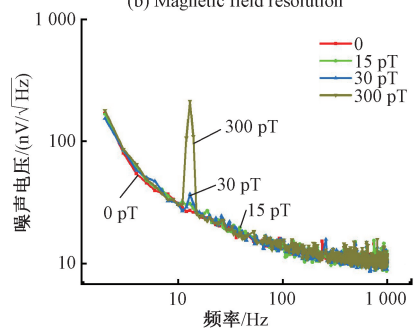
通过设计小型液氮低温维持装置及 DSP 测控电路,研制了复合磁传感器测试系统。通过评估,测试系统电路噪声影响可以忽略不计。按照先局部后整体的原则,对制备的超导/TMR 复合磁传感器零部件和整体分别开展测试与评估,其磁阻响应曲线、磁场分辨力、13 Hz 正弦磁场下的噪声电压谱和 13 Hz 频点处对应的电压密度曲线分别如图 16(a)~(d)所示。最终不带软磁聚集器的 25 mm 尺寸超导环的磁场放大倍数为 1 046 倍,十分接近仿真计算值,复合磁传感器的磁场分辨力在 13 Hz 处达到 $5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,而高频位置的分辨力甚至进入 fT 量级^[34],这是迄今为止报道的超导/TMR 复合磁传感器分辨力的最高水平。



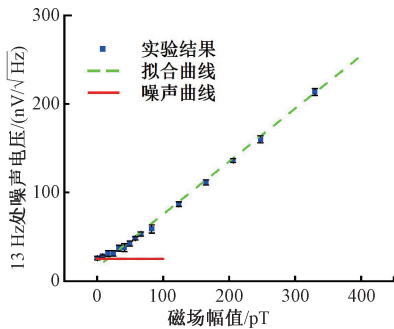
(a) 磁阻响应曲线 (a) MR response curve



(b) 磁场分辨力 (b) Magnetic field resolution



(c) 不同幅值 13 Hz 正弦波磁场下的传感器噪声电压谱 (c) Voltage spectra under 13 Hz sinusoidal magnetic fields with different amplitudes



(d) 13 Hz处噪声电压密度随磁场变化曲线
(d) Voltage density at 13 Hz versus the magnetic field amplitude

图 16 优化后的超导/TMR 复合传感器测试结果

Fig. 16 Tested results of the optimized superconducting/TMR composite sensor

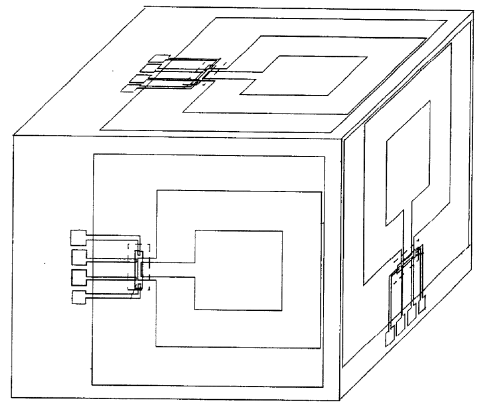


图 17 组装式三维超导复合磁传感器结构示意图

Fig. 17 Diagram of the assembled three-dimensional superconducting composite magnetic sensor

3 三轴化超导/磁阻式复合传感器

在水下目标探测、生物磁场测量等新型磁传感器应用场景中,目标磁场是一种矢量场。相比总量磁传感器,三轴磁传感器能探测到更为丰富的磁场信息,可有效提高水下目标探测的准确性和脑磁图成像的空间分辨率。然而,超导/磁阻式复合磁传感器仅对垂直穿过超导磁放大器的磁场(Z 向磁场)敏感,难以实现三轴磁场测量。为此,人们针对三轴化超导/磁阻式复合传感器开展了系列研究,总结起来现有的三轴化方案主要分为单轴组装式和软磁变轨一体化式两种。

3.1 单轴组装式

超导/磁阻式复合磁传感器仅能敏感垂向单轴磁场,为了实现三维磁场的测量,最简单的方式就是将 3 个单轴传感器按照正交方向组合在一起,此时 3 个传感器的输出即对应磁场三分量的值。2007 年,中科院物理所的覃启航等^[37]设计了一种组装式的三维超导复合磁传感器结构方案,如图 17 所示。他们首先在衬底上制备一维的超导/磁阻式复合传感器,然后将 3 个一维磁传感器分别固定在一个非磁性材料做成的立方体的 3 个相邻面上,使这 3 个传感器的平面两两垂直,从而得到集成的三维超导复合磁传感器。单轴组装式结构简单,但是由于机械组装精度较差,难以保证三轴正交性,而且组装后的磁传感器体积相对较大。

3.2 软磁变轨一体化式

众所周知,软磁结构具有高磁导率,能够聚集磁场并实现磁场的转向或变轨,将其与单轴磁传感器结合能够实现磁场三分量测量,相关研究已经在磁阻式磁传感器上得到充分体现^[38-42],而在超导复合磁传感器上的运用主要是国防科技大学近两年开展的工作。从 2022 年开

始,国防科技大学的 Yang 等^[43-44]在前期超导/TMR 复合单轴磁传感技术研究基础上,提出了利用软磁变轨结构进行磁场转向进而实现超导/TMR 复合三轴一体化测量方案,并为此展开了重点研究。

1) 平面内磁场 Z 向化测量

超导复合磁传感器仅对 Z 向磁场敏感,为了实现磁场三分量测量,首先需要针对平面内磁场开展 Z 向化测量研究。为此,他们分别提出采用双侧型软磁结构和单侧型软磁结构与单个超导环进行复合的方案^[43-44],如图 18(a)和(b)所示。对于双侧型结构而言,当沿 X 方向施加磁场时,磁场会在上下两层软磁结构的交叠处转换至 Z 方向,而 Y 方向磁场作用时,由于结构的对称性,实际作用于超导环的净磁通为 0,因此该结构敏感 X 方向磁场而不敏感 Y 方向磁场。对于单侧型结构而言,当 X 方向磁场作用时,由于软磁结构端面存在 Z 向分量,因此也能实现平面内磁场 Z 向化测量。

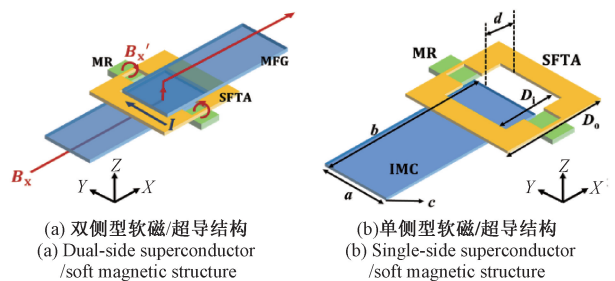


图 18 超导/软磁复合的平面磁场 Z 向化测量方案

Fig. 18 Z -orientation measurement scheme for planar magnetic field by superconducting/soft magnetic structure

考虑到单侧型结构更为简单,他们进一步开展了深入研究。通过联合超导磁放大器和软磁结构有限元仿真模型,研究了软磁结构宽度 a 、长度 b 、厚度 c 以及与超导

环的相对位置 d 等结构参数对磁变轨效率(有无软磁结构时传感器分别对 X 方向和 Z 方向磁场的放大倍数的比值)的影响规律,实现了高效率软磁结构的优化设计。经实验研究发现,加入单片式软磁结构后,器件对 X 和 Z 方向磁场的灵敏度与不加软磁结构时相当,且器件噪声变化不明显,分别如图 19(a) 和(b) 所示。相关工作表明超导/软磁复合结构可实现 X 和 Z 方向磁场的同时测量,且不会引入额外的噪声,为后续的四轴磁传感器一体化设计奠定了技术基础。

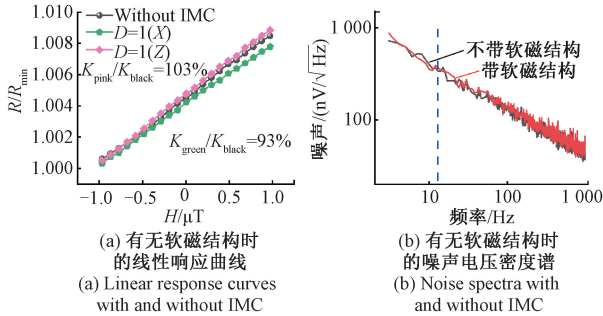


图 19 单侧型复合结构仿真和实验结果

Fig. 19 Simulation and experimental results of single-side superconductor/soft magnetic structure

2) 三轴磁场一体化测量

由上文可知,利用软磁变轨结构可以将平面内磁场转换到 Z 方向进行测量,但是此时不同方向的磁场分量是耦合在一起的,因此,需要多个超导/TMR 复合磁敏单元同时敏感三轴磁场,然后联立多个单元的输出结果以求解得到三轴磁场值。为此,国防科技大学的研究团队在单侧型软磁结构基础上,提出并设计了一种一体化旋转对称式超导/TMR 复合三轴磁传感器^[44],如图 20(a) 所示,包含整片式的软磁变轨块和超导磁放大器,其中超导磁放大器内部包括对称分布的 4 个正方形小环,每个小环的外边设计一个窄区,每个窄区对应一个 TMR 敏感体,此时 4 个超导环自然地处于同一平面。

由于一体化结构设计上的完全对称性,理想情况下 4 个 TMR 磁敏感体对某一方向的磁场灵敏度是一致的,但由于空间位置的不同会存在符号的正负差异,经分析后可以得到 4 个 TMR 敏感体感应到的磁场 (B_1, B_2, B_3, B_4) 与磁场三分量 (B_x, B_y, B_z) 的关系式如下:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= a \cdot B_x + b \cdot B_y + c \cdot B_z \\
 B_2 &= -a \cdot B_x + b \cdot B_y + c \cdot B_z \\
 B_3 &= a \cdot B_x + b \cdot B_y - c \cdot B_z \\
 B_4 &= -a \cdot B_x + b \cdot B_y - c \cdot B_z
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

其中, a, b, c 为某个磁场分量的敏感系数。从中可以看出,联立任意两个磁敏感体输出结果即可求解得

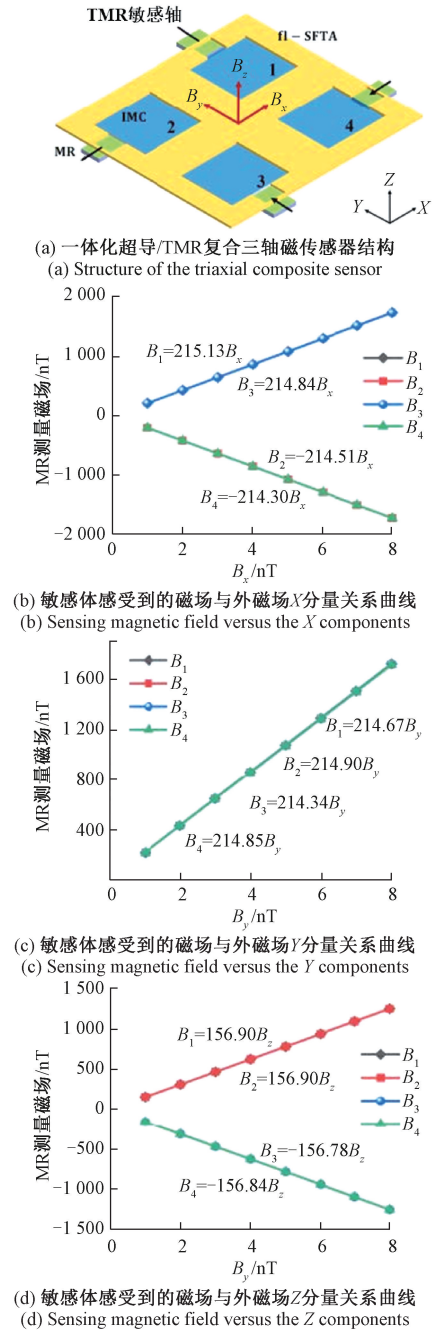


图 20 一体化超导/TMR 复合三轴磁传感器方案

Fig. 20 Scheme of the integrated superconducting/TMR composite triaxial magnetic sensor

到某个方向磁场的敏感系数。进一步,采用有限元仿真方法分析了各个磁敏感体感受到的磁场随外磁场三分量的变化规律,结果分别如图 20(b) ~ (d) 所示。可以看到,磁场敏感系数的符号与理论预测完全一致,而且绝对值基本相等,其微小的误差可能来源于网格划分的不均匀。仿真结果验证了该三轴磁场一体化测量方案的可行性。

4 超导/磁阻式复合传感器研究展望

经过学者们多年的研究,超导/磁阻式复合传感器在高灵敏和三轴化等方面都取得了一定的进展,但是其磁场分辨力、量程等指标离 SQUID 等高灵敏磁传感器还存在一定的差距,可以从以下几个方向进行技术攻关,以不断完善超导/磁阻式传感器性能,使其能真正走向应用。

1) 开展低噪声高分辨 TMR 磁敏器件设计及制备研究。尽管目前超导磁放大器的磁场放大倍数已经达到 1 000 倍,但超导/TMR 复合磁传感器的分辨力仍然只是 pT 级水平,反而不如超导/GMR 复合磁传感器的水平。这主要是因为 TMR 器件自身 1/f 噪声严重,限制了其分辨力提高。为此,需要进一步优化对磁隧道结的膜层设计、制备及后处理工艺,抑制其噪声以提升分辨力性能^[45]。除了文中提到的减小势垒层厚度、增加磁隧道结串联个数、增加结区面积、斩波调制技术等以外,具体的优化手段还包括:(1)将铁磁自由层设计在势垒层下方,从而使 TMR 器件制备后结区面积增大^[46];(2)改变磁隧道结的形状或者沿难轴方向施加外磁场等方式使磁隧道结自由层实现单畴状态^[47-48];(3)使用具有低阻尼系数的赫斯勒合金材料 Co_2FeAl 等^[49];(4)对自由层进行弱钉扎以稳定磁化状态等^[50]。

2) 开展超导/TMR 直接复合工艺研究。由于 TMR 器件制备工艺复杂,目前仍采用多部件键合组装方式实现超导/TMR 复合,这会导致超导环和磁敏感体之间距离较大,一致性不足,最终影响灵敏度等性能。下一步可以采用超导/磁性多层膜异质沉积工艺,首先在衬底上生长超导薄膜,沉积绝缘层并抛光,然后生长 TMR 磁性多层膜,实现共同生长及器件制备,克服超导薄膜/磁性多层膜异质沉积温度匹配问题。这将极大地提升超导/TMR 复合传感器性能以及一致性。

3) 开展超导/磁阻式复合传感器量程扩展研究。由复合磁传感器磁阻响应曲线可知,复合磁传感器由于超导环存在临界电流而容易在外磁场变化下达到饱和,使得其工作量程受到限制。为此,可以采用脉冲磁场重置法,即利用超导的磁通锁定原理,在其即将达到饱和状态时通过给微线圈施加脉冲电流产生脉冲磁场,磁场大小设置为复合传感器线性响应区间的 1/2,将传感器工作点重置到 0 附近,从而实现超导/磁阻式复合传感器的量程扩展。

4) 开展超导/磁阻式复合三轴传感器实验研究。目前一体化超导/TMR 复合三轴磁传感方案已经实现了仿

真验证,但暂未开展实验研究。为此,需要在三轴磁场一体化测量方案基础上进一步开展结构优化、器件制备及实验测试等研究工作,从而从实验上验证方案可行性,并优化完善设计方案。

5 结 论

弱磁传感器作为弱磁测量系统中的核心器件,在磁性目标探测、生物磁场探测等领域的应用越来越广泛。伴随着无人化智能化技术的发展,这些应用领域对磁传感器提出了高分辨力、小型化、低功耗等要求;特别是无人机磁反潜、脑磁测量等领域,对小型化 pT 级甚至 fT 级磁传感器的需求越来越迫切。超导/磁阻式复合磁传感器在理论上可实现很高的灵敏度,具有发展成为小型化高分辨力磁传感器的潜力。为此,本文从超导/磁阻式复合传感器工作原理、高灵敏和三轴化复合磁传感器等方面系统地回顾总结了这种新型磁传感器的研究现状,并针对目前存在的问题对下一步研究工作简要进行了展望。本文工作对于促进仪器科学、自旋电子学等相关学科发展以及推广高灵敏磁传感器应用具有重要的指导作用。

参考文献

- [1] LENZ J, EDELSTEIN S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.
- [2] 李兴邦, 叶志浩, 罗宁昭, 等. 基于 TMR 传感器的脉冲涡流 C 扫描成像技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 105-113.
LI X B, YE ZH H, LUO N ZH, et al. Research on pulsed eddy current C-scan imaging technology based on TMR sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 105-113.
- [3] HUANG B, LIU Z, XU Y, et al. Characteristics of magnetic fields induced by the wake of an underwater vehicle[J]. Applied Sciences, 2022; 12(16): 7964.
- [4] ZUO S, HEIDARI H, FARINA D, et al. Miniaturized magnetic sensors for implantable magnetomyography[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(6): 2000185.
- [5] ZHU K, KIOURTI A. A review of magnetic field emissions from the human body: Sources, sensors, and uses[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2022, 3: 732-744.
- [6] 郑梦羚, 宋欣达, 周斌权, 等. SERF 原子磁强计自适应参数标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022,

- 43(9): 1-9.
- ZHENG M L, SONG X D, ZHOU B Q, et al. Research on the adaptive parameter calibration method of SERF atomic magnetometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 1-9.
- [7] LI J, QUAN W, ZHOU B, et al. A review of SERF atomic magnetometer: Recent advances and applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(20): 8198-8207.
- [8] PFEIFFER C, RUFFIEUX S, JÖNSSON L, et al. A 7-channel high-Tc SQUID-based on-scalp MEG system[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2020, 67(5): 1483-1489.
- [9] 宁双, 邱隆清, 张国峰, 等. 地磁环境下基于 SQUID 三轴磁强计的矢量稳场[J]. 低温物理学报, 2021(43): 108-114.
- NING SH, QIU L Q, ZHANG G F, et al. Vector magnetic field stabilization based on 3-axis SQUID magnetometers in geomagnetic environment [J]. Low Temperature Physical Letters, 2021 (43): 108-114.
- [10] WANG Y, YIN X, LE ROY D, et al. Magnetization reversal and enhanced tunnel magnetoresistance ratio in perpendicular magnetic tunnel junctions based on exchange spring electrodes [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(13): 133906.
- [11] OOGANE M, FUJIWARA K, KANNO A, et al. Sub-pT magnetic field detection by tunnel magneto-resistive sensors[J]. Applied Physics Express, 2021, 14(12): 123002.
- [12] PANNETIER M, FERMON C, GOFF G L, et al. FemtoTesla magnetic field measurement with magnetoresistive sensors[J]. Science, 2004, 304(5677): 1648-1650.
- [13] 伍岳, 肖立业, 侯世中. 磁电阻/超导复合式磁传感器:原理及发展[J]. 物理, 2018, 48(1): 14-21.
- WU Y, XIAO L Y, HOU SH ZH. Magnetoresistive-superconducting mixed magnetic sensors: Principle and Development[J]. Physics, 2018, 48(1): 14-21.
- [14] ROBBES D, DOLABDJIAN C, SAEZ S, et al. Highly sensitive uncooled magnetometers; State of the art. superconducting magnetic hybrid magnetometers, an alternative to SQUIDS? [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 629-634.
- [15] PANNETIER M, KLAASSEN F C, WIJNGAARDEN R J, et al. Magneto-optical investigation of flux penetration in a superconducting ring[J]. Physical Review B, 2001, 64(14): 144505.
- [16] PANNETIER M, FERMON C, POLOVY H, et al. GMR-based sensors for ultra-sensitive magnetometry[C]. 2009 IEEE Sensors, 2009, 1856-1859.
- [17] YAMAKAWA K, SHINTAKU K, HONDA N, et al. Yoke-type vertical GMR head [J]. Journal of the Magnetics Society of Japan, 1997, 21(S2): 391-394.
- [18] PANNETIER M, FERMON C, VEDRINE P, et al. Field line distribution in a mixed sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 129: 146-149.
- [19] PANNETIER M, FERMON C, GOFF G L, et al. Ultra-sensitive mixed sensors-design and performance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 129: 247-250.
- [20] PANNETIER M, FERMON C, DYVORNE H, et al. Magnetoresistive-superconducting mixed sensors for biomagnetic applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322: 1647-1650.
- [21] DYVORNE H, FERMON C, PANNETIER M, et al. NMR with superconducting-GMR mixed sensors [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 819-822.
- [22] PANNETIER M, FERMON C, BIZIERE N, et al. RF response of superconducting-GMR mixed sensors, application to NQR[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 598-601.
- [23] 李雯玉, 魏树峰, 杨文晖. 核四极矩共振探测系统研究进展[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(3): 17-21, 28.
- LI W Y, WEI SH F, YANG W H. Research progress in nuclear quadrupole resonance detection system [J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(3): 17-21, 28.
- [24] 高攀, 金耀辉, 张国进, 等. 基于核四极矩共振原理的炸药探测方法研究与实验[J]. 波谱学杂志, 2008, 25(3): 371-378.
- GAO P, JIN Y H, ZHANG G J, et al. An explosive detection method based on NQR[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25(3): 371-378.
- [25] PANNETIER M, POLOVY H, SERGEEVA-CHOLLET N, et al. Magnetocardiography with GMR-based sensors[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 303: 012054.
- [26] CAMPIGLIO P, CARUSO L, PAUL E, et al. GMR-based sensors arrays for biomagnetic source imaging applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics,

- 2012, 48(11): 3501-3504.
- [27] WANG S, HE T, ZHANG Y. Research on a superconducting magnetic flux concentrator for a GMI-based mixed sensor[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(5): 1-5.
- [28] 贺同福, 王三胜, 张一茗. GMI/超导复合磁强计的超导磁通变换器设计和研究[J]. *低温与超导*, 2014, 42(3): 1-5.
HE T F, WANG S SH, ZHANG Y M. The design and research of a flux-to-field transformer for the GMI/superconducting mixed sensors [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2014, 42(3): 1-5.
- [29] TSUKADA K, HIRATA T, GODA Y, et al. Hybrid magnetic sensor combined with a tunnel magnetoresistive sensor and high-temperature superconducting magnetic-field-focusing plates[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(3): 1-5.
- [30] TSUKADA K, YASUGI T, MAJIMA Y, et al. Absolute-magnetic-field measurement using nanogranular in-gap magnetic sensor with second-harmonic and liquid-nitrogen-temperature operation [J]. *AIP Advances*, 2017, 7(5): 56670.
- [31] HIRATA T, GODA Y, SAKAI K, et al. Development of a highly sensitive magnetic field detector with a wide frequency range for nondestructive testing using an HTS coil with magnetic sensors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 1-5.
- [32] WU Y, XIAO L, HOU S, et al. High T_c TMR-superconducting mixed sensor: Fabrication and performance [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(1): 1-5.
- [33] SUN K, TAO J, YANG L, et al. Vertical magnetic flux concentrators for high-sensitivity superconductor/magnetoresistance composite sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(9): 8460-8465.
- [34] SUN K, YANG L, LI P, et al. A superconductor/TMR composite magnetic sensor for pico-tesla magnetic field detection [J]. *AIP Advances*, 2022, 12(10): 105003.
- [35] YANG L, SUN K, TAO J, et al. Superconducting magnetic flux transformation amplifier for the superconductor/magnetoresistance mixed magnetic sensor: Finite element simulation method and experimental verification study [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 342: 113658.
- [36] JI M, PAN L, HU Y, et al. Study on the effect of re-deposition induced by ion beam etching on MTJ performances [J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 085317.
- [37] 覃启航, 韩秀峰, 王磊, 等. 一种集成的三维超导复合磁场传感器及其制法和用途: CN101034145A [P]. 中国: 发明专利, 2007.
QIN Q H, HAN X F, WANG L, et al. An integrated three-dimensional superconducting composite magnetic field sensor and its preparation method and application: CN101034145A [P]. China: Patent for Invention, 2007.
- [38] ZHAO J, TIAN W, QI Z, et al. Designs of slope magnetic flux guides for 3-axis magnetic sensor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(10): 5301-5303.
- [39] ZHAO J, HU J, TIAN W, et al. Designs of novel magnetic flux guides for three-axis magnetic sensor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(8): 1-6.
- [40] LAI W M, HSU F M, SUNG W L, et al. Monolithic integration of micro magnetic pillar array with anisotropic magneto-resistive (AMR) structure for out-of-plane magnetic field detection [C]. 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Estoril, Portugal, 2015, 901-904.
- [41] LUONG V S, JENG J T, BAI B L, et al. Design of 3-D magnetic field sensor with single bridge of spin-valve giant magnetoresistance films [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(11): 1-4.
- [42] TRINH X, JENG J, LAN M, et al. Miniature tri-axis magnetometer with in-plane GMR sensors [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(11): 1-4.
- [43] YANG L, PAN M, SUN K, et al. Superconductor/magnetoresistance mixed sensor with magnetic flux guides for in-plane magnetic field measurement [J]. *AIP Advances*, 2022, 12(9): 095208.
- [44] YANG L, SUN K, PAN M, et al. The in-plane magnetic field measurement method of SC/MR mixed sensor and its three-axis magnetic sensor with integrated magnetic concentrator [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(1): 240-246.
- [45] 周子童, 闫韶华, 赵巍胜, 等. 隧穿磁阻传感器研究进展 [J]. *物理学报*, 2022, 71(5): 058504.
ZHOU Z T, YAN SH H, ZHAO W SH, et al. Research progress of tunneling magnetoresistance sensor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(5): 058504.
- [46] OOGANE M, FUJIWARA K, KANNO A, et al. Sub-pT magnetic field detection by tunnel magneto-resistive sensors [J]. *Applied Physics Express*, 2021, 14: 123002.

- [47] MOULIN J, DOLL A, PAUL E, et al. Optimizing magnetoresistive sensor signal-to-noise via pinning field tuning [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115: 122406.
- [48] HUANG L, YUAN Z, TAO B, et al. Noise suppression and sensitivity manipulation of magnetic tunnel junction sensors with soft magnetic $\text{Co}_{70.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ layer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122: 113903.
- [49] CUI Y, KHODADADI B, SCHÄFER S, et al. Interfacial perpendicular magnetic anisotropy and damping parameter in ultra thin Co_2FeAl films [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 162403.
- [50] PAZI E, FERREIRA R, FREITAS P P. Linearization of magnetic sensors with a weakly pinned free layer MTJ stack using a three-step annealing process [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(7): 1-4.

作者简介

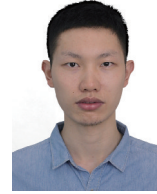


张琦, 1998 年于国防科技大学获得学士学位, 2001 年于国防科技大学获得硕士学位, 2005 年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院教授, 主要研究方向为智能传感与探测。

E-mail: 13873191345@163.com

Zhang Qi received his B. Sc. degree from National University

of Defense Technology in 1998, received his M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2001, and received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2005. He is currently a professor in the College of Intelligence Science and Technology at National University of Defense Technology. His main research interests include intelligent sensing and detection.



胡悦国 (通信作者), 2014 年于国防科技大学获得学士学位, 2016 年于国防科技大学获得硕士学位, 2021 年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院助理研究员, 主要研究方向为智能传感与探测。

E-mail: huyueguo1991@163.com

Hu Yueguo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2014, received his M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2016, and received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2021. He is currently an assistant research fellow in the College of Intelligence Science and Technology at National University of Defense Technology. His main research interests include intelligent sensing and detection.