

磁电阻/超导复合式磁传感器:原理及发展*

伍岳[†] 肖立业 侯世中

(中国科学院电工研究所 超导与新材料应用研究实验室 北京 100190)

2018-07-30收到

[†] email: wuyue@mail.iee.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20190103

Magnetoresistive-superconducting mixed magnetic sensors: principle and development

WU Yue[†] XIAO Li-Ye HOU Shi-Zhong

(Laboratory of Superconductors and New Materials, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 弱磁探测在科研、工业生产以及日常生活中已起到越来越重要的作用。近年来,利用超导技术与磁电阻传感器相结合,人们研制成功一种新型的磁电阻材料/超导复合式磁传感器,其探测精度有望达到 fT 量级,并在弱磁探测领域具有大规模应用的潜力。文章介绍了该类磁传感器的结构及工作原理,并根据磁电阻材料的不同,分别对巨磁电阻(GMR)和由作者所在实验室制备的隧道磁电阻(TMR)/超导复合式磁传感器的发展及应用进行了说明。

关键词 复合式磁传感器, 超导磁场放大器, 巨磁电阻磁传感器, 隧道磁电阻磁传感器

Abstract Weak magnetic field detection has played an increasingly important role in the field of scientific research, industrial manufacture, and people's daily lives. In recent years, a new kind of magnetic sensor has been proposed, composed of a superconducting flux-to-field transformer and a high-sensitivity magnetoresistive sensor. This kind of sensor is expected to be widely used because of its excellent sensitivity (femtotesla), stability, band characteristics, and low cost. In this paper, its structure and principle of operation will first be reviewed. We then describe and compare the development and applications of giant magnetoresistance sensors and the tunnel magnetoresistance/superconductor based mixed sensors fabricated in our lab.

Keywords mixed magnetic sensor, superconducting magnetic concentrator, giant magnetoresistive sensor, tunneling magnetoresistance sensor

1 引言

弱磁探测技术的发展,归根结底依靠的是磁传感器技术的进步。近年来,随着各种物理效应在磁场测量中的应用,各种弱磁测量的方法已经逐渐趋于完善,而根据不同测量方法,各类磁传

感器也应运而生。从霍尔效应磁传感器、磁通门磁传感器、磁电阻传感器到光泵磁强计和超导量子干涉器件(SQUID),磁传感器技术不断的向前发展^[1, 2]。这其中,最为熟知的探测精度达到 fT 量级的弱磁传感器当属基于超导约瑟夫森效应的超导量子干涉器件^[3]。目前,单独的 SQUID 器件在低温下灵敏度可以达到 0.2—2 pT,而通过加入耦合线圈磁通放大器,在 4.2 K 灵敏度可以达到

* 国家自然科学基金(批准号: 51721005, 51707187)资助项目

10 fT 以下。然而，对于低温超导 SQUID 而言^[4]，需要昂贵的低温制冷设备(液氦、低温制冷机等)；高温超导 SQUID^[5]由于超导材料的相干长度短，在约瑟夫森结的制备方面存在困难。这些因素都制约了 SQUID 的大规模应用。

伴随着科技进步和信息技术的发展，除了灵敏度之外，人们对磁传感器的尺寸、稳定性、功耗、制备工艺的简单化等提出了越来越高的要求。其中基于磁电阻效应^[6]的传感器因其具备高灵敏度、功耗低、体积小、加工技术成熟等优点正在越来越大规模的使用。其中，基于巨磁电阻(GMR)^[7]及隧道磁电阻(TMR)效应^[8]制备的磁电阻传感器因其饱和磁场较低、单位磁场灵敏度高、温度特性稳定等优点，目前已被广泛用于生产应用中。特别是 TMR 磁传感器，拥有小型化、低成本、低功耗、高集成性、高相应频率和高灵敏度特性，使其成为未来竞争的制高点^[9]。

另一方面，作为高灵敏度传感器而言，GMR 和 TMR 的固有噪声仍然较大，特别是在低频下，传感器存在明显的 $1/f$ 噪声。并且在探测精度方面(pT—nT 量级)相比于 SQUID、光泵磁力仪等高灵敏度磁传感器仍然有较大差距^[1, 6]，这也限制了其在生物磁性、军工等一些弱磁探测领域的应用。

为了提高传感器的探测精度，可以借助磁场放大器放大待测磁场来实现探测精度的提高。常规的磁场放大器是利用高磁导率的材料制备磁通聚集器，通过将软磁材料制备成特殊形状，使磁通聚集器间隙的磁场增强^[10]。这种磁场放大器存在磁场放大倍数有限、制备工艺复杂、磁通聚集器自身会引入磁场噪声等问题。

近年来，随着薄膜技术的发展，构成了一种新型的基于磁电阻传感器薄膜与超导薄膜相结合的磁电阻/超导复合式磁传感器^[11]。该类传感器使得原本的磁电阻器件灵敏度大幅提升，此外，该类器件结构简单，作为一种新型的高灵敏度磁传感器，磁场探测精度可以达到接近 SQUID 的水平。同时这类传感器又具有体积小、结构简单、性能稳定等优势，在未来有巨大发展潜力。本文针对这一类传感器的结构、原理进行介绍，并对

该类磁传感器的发展及应用进行阐述。

2 磁电阻/超导复合式磁传感器原理

磁电阻/超导复合式磁传感器最早由 D. Robbes 等人^[12]提出，该类传感器主要由磁电阻传感器和超导磁场放大器构成，其结构如图 1(a)所示。其中超导磁场放大器是一个由超导薄膜构成的闭合环路。超导环路中有一段宽度狭窄区域。磁电阻传感器位于超导磁场放大器环路狭窄区域上方并由绝缘层分隔。

器件工作原理如下：在超导转变温度以下，当有外磁场 B_a 垂直穿过超导环路时，会由于超导体的迈斯纳效应(Meissner)在超导磁场放大器环路中产生屏蔽电流 I ：

$$I = \frac{B_a S}{L}, \quad (1)$$

式中 S 为超导磁场放大器的有效面积， L 为超导环路自感。当屏蔽电流通过狭窄区域时，受其宽度所限，电流密度会迅速增大，同时在狭窄区域上

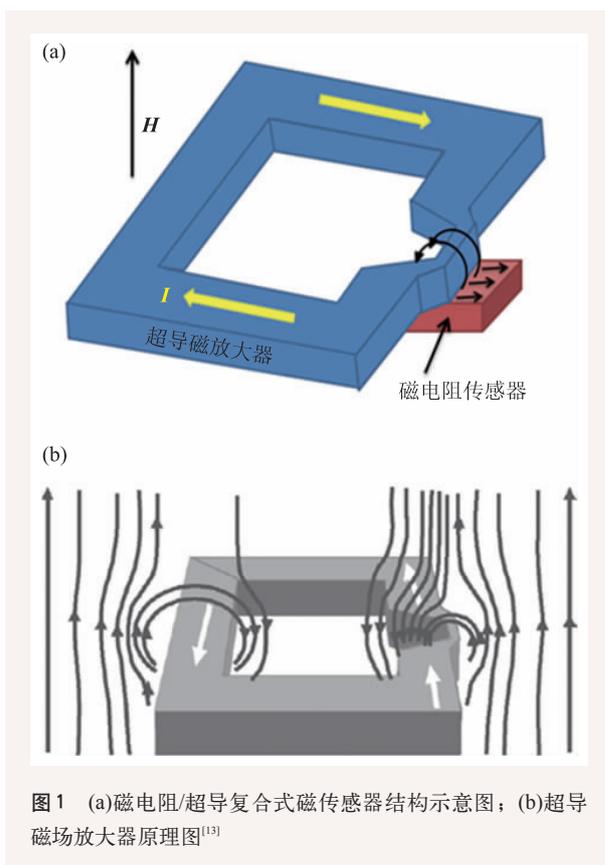


图 1 (a)磁电阻/超导复合式磁传感器结构示意图；(b)超导磁场放大器原理图^[13]

下方附近形成局域磁场增强。对于超导体而言，由于迈斯纳效应的存在，流经超导体的电流在材料内部并非均匀分布，而是沿着法线方向向内部迅速衰减。

对于超导薄膜传输线来说，令其薄膜宽度为 w ，膜厚为 h ， λ 为伦敦(London)穿透深度，且 $w \gg h$ ， $h \cong \lambda$ ，因此可以认为电流在膜厚方向是均匀分布的，而电流密度分布可以简化为^[14]：

$$j(x, y) = j(x) = \frac{I}{\lambda h} \times \exp\left[-\frac{|x| - w/2}{\lambda}\right]. \quad (2)$$

通过狭窄区域的电流产生的放大磁感应强度可以通过毕奥萨伐尔(Biot—Savart)定律计算获得。图2(a, b)分别为超导磁场放大器狭窄区域磁场分布的理论计算及磁光实验测试结果^[15]，对应的超导磁场放大器环路直径为3 mm，狭窄区域宽度为7 μm 。根据理论计算，其磁场被放大约240倍，磁光设备测试结果与理论计算相符，磁场放大倍数为250倍。位于超导磁场放大器环路狭窄区域上方的磁电阻传感器灵敏度也会提升相应的倍数，从而使得器件的探测精度大幅提升。

对于超导磁场放大器而言，其磁场放大倍数主要由放大器的尺寸和狭窄区域宽度决定。增大超导磁场放大器的尺寸，以及减小狭窄区域的宽度，都会显著增加超导磁场放大器的磁场放大倍数。例如，理论计算表明，当超导磁场放大器直径达到25 mm，狭窄区域宽度为2 μm 时，磁场放大倍数将达到3500倍^[16]，而相应的磁电阻/超导复合式磁传感器的磁场探测能力将有望达到1 fT，

甚至更低的磁场。

磁电阻/超导复合式磁传感器的性能不仅取决于超导磁场放大器的磁场放大能力，同时也取决于磁电阻传感器的灵敏度、噪声等特性。目前在磁电阻传感器领域性能最为优异、同时最具有应用价值及潜力的当属GMR和TMR磁传感器。下面将分别对GMR/超导复合式磁传感器的发展及本课题组在TMR/超导复合式磁传感器制备、测试方面开展的工作进行介绍。

3 GMR/超导复合式磁传感器

磁电阻效应是对于一些磁性材料，当施加外磁场时，材料的电阻会发生变化的效应。这种磁电阻效应第一次由William Thomson于1857年在铁样品中发现^[17]。这一发现的材料磁阻变化率很小，只有1%，此效应即被称为各向异性磁电阻(AMR)效应。

1988年，Grunberg和Baibich等人通过分子束外延的方法制备了Fe/Cr多层膜，并在其中首次发现了磁阻变化率达到50%以上。这种巨大的磁电阻变化效应被称为巨磁电阻(GMR)效应^[7, 18]。GMR效应来源于载流电子在不同的自旋状态下与磁场的作用不同导致的电阻变化。GMR由铁磁—非磁性金属—铁磁多层膜交叠组成。两层铁磁层的矫顽力不同。当铁磁层的磁矩互相平行时，载流子与自旋有关的散射最小，材料具有最小的电阻。而当铁磁层的磁矩为反平行时，载流子与自旋相关的散射最强，材料的电阻最大。对于GMR效应可以由Mott提出的双电流模型解释^[19]。在非磁性层中，不同自旋的电子能带相同，但是在铁磁金属中，不同自旋的能带发生劈裂，导致在费米能级处，自旋向上和向下的电子态密度不同。在双电流模型中，假设自旋向上

的电阻最大。对于GMR效应可以由Mott提出的双电流模型解释^[19]。在非磁性层中，不同自旋的电子能带相同，但是在铁磁金属中，不同自旋的能带发生劈裂，导致在费米能级处，自旋向上和向下的电子态密度不同。在双电流模型中，假设自旋向上

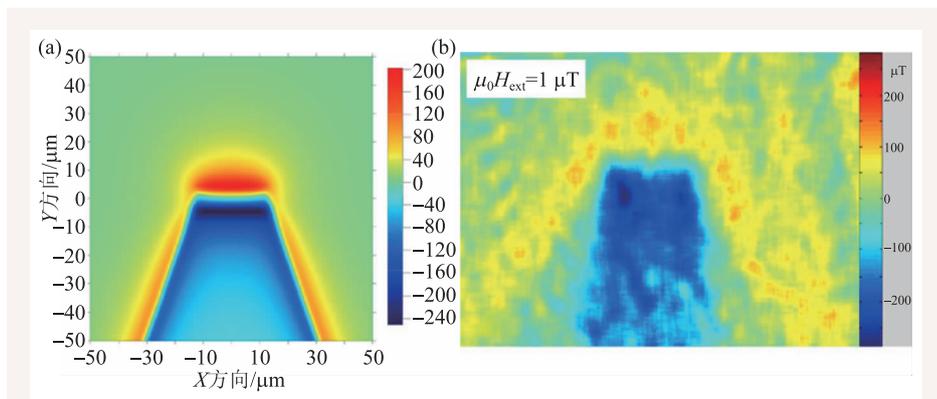


图2 超导磁场放大器狭窄区域磁场分布 (a)理论计算结果；(b)磁光设备测试结果^[15]

和向下的电子沿层面流动对应两个互相独立的导电通道，其中自旋向上的电子，其平均自由程远大于自旋向下的电子。在铁磁层磁矩反平行排列下，自旋向上和自旋向下的电子散射概率相同；而在平行排列下，自旋向上的电子散射要远小于自旋向下的电子，从而造成平行和反平行排列下电阻的差别。

目前，GMR器件已广泛应用于传感器、磁存储等领域。器件的电阻变化率可以达到50%以上，灵敏度可以达到0.6%/Oe以上，传感器在100 Hz下的磁场噪声约为20 pT/Hz^{1/2}[20]。

2004年，Myriam Pannetier小组通过将CoFe/Cu/NiFe多层膜构成的GMR器件与YBCO超导磁放大器相结合，首次成功制备出GMR/超导复合式磁传感器^[11]。其中超导磁放大器磁场放大倍数达到了108倍。在4.2 K下，结合超导磁场放大器的GMR灵敏度达到了21.3%/Oe(图3(a))，4.2 K下，器件的热噪声水平达到了32 fT/Hz^{1/2}(图3(b))。在150 Hz以下，1/f噪声开始出现。

GMR/超导复合式传感器的噪声主要来自GMR器件的热噪声及1/f磁噪声^[21]，其中，低频下GMR器件的1/f磁噪声起主要作用。降低器件的1/f噪声主要通过如下方式：(1)将GMR器件设计成Yoke型结构(图4(a))：GMR低频下的1/f磁噪声主要由铁磁层中出现分畴导致，采用磁轭结构将有效抑制铁磁层中分畴的出现；(2)利用斩波技术进行调频：采用调制外磁场的方法，将外加恒定磁场调制为交流磁场，从而提高GMR器件的工作频率，可以有效降低传感器的低频噪声^[22]。例如，Myriam Pannetier小组在超导磁场放大器的超导狭窄区域接入加热电路，加热电路通入交变电流对狭窄区域进行周期加热，超导磁放大器处于周期失超—恢复的过程，从而达到磁场调频的作用(图4(a))。图4(b)为利用斩波技术

测得的100 nT正弦波信号，图4(c)为器件是否利用斩波技术的低频噪声对比。此外，为了提升器件的灵敏度，可以提高通入GMR器件的工作电流，同时选用磁场放大倍数更高的超导磁场放大器。表1列出了目前国际上(主要是该课题组)研制的不同规格GMR/超导复合式传感器及其性能

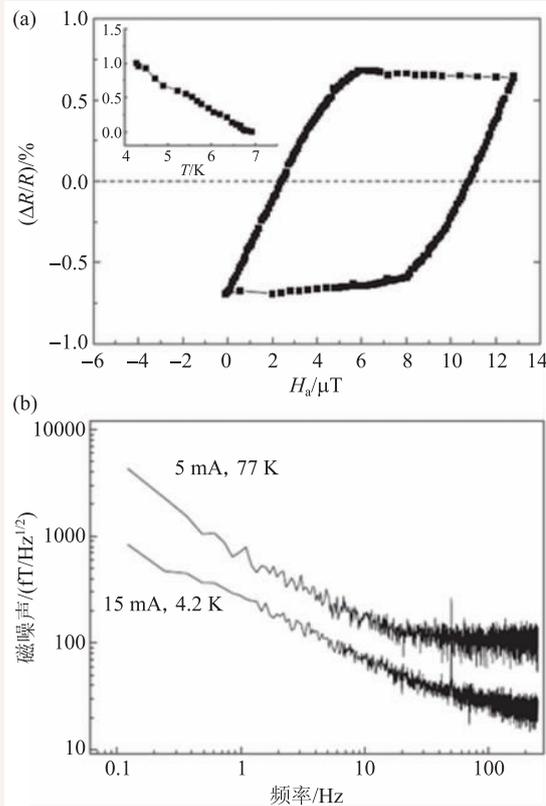


图3 (a)GMR/超导复合式磁传感器的磁阻曲线；(b)器件在77 K和4.2 K下的低频噪声频谱^[11]

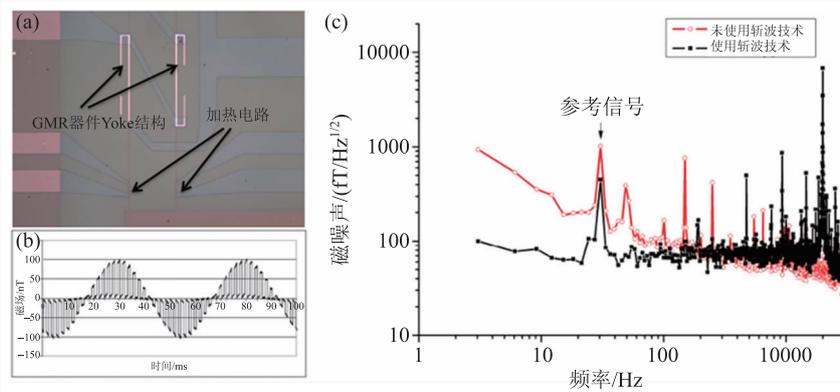


图4 (a)GMR磁轭结构设计；(b)利用斩波技术测得的100 nT正弦波信号^[21]；(c)未使用斩波技术和使用斩波技术时GMR/超导复合式磁传感器的低频噪声信号对比

表1 不同规格GMR/超导复合式传感器及其性能^[16, 23]

样品名称	超导磁场放大器狭窄区域宽度/ μm	超导磁场放大器面积/ mm^2	磁场放大倍数	GMR工作电流/ mA	77 K热噪声/ $(\text{fT}/\text{Hz}^{1/2})$	4.2 K热噪声/ $(\text{fT}/\text{Hz}^{1/2})$
Nb-100	5	7×7	108	1	/	600
Nb-500	5	15×15	500	1	/	140
YBCO	5	9×9	160	10	150	32
YBCO	5	17×17	600	10	25	5
YBCO	5	20×20	1060	10	10	2

能^[16, 23]。可以看出,器件在77 K和4.2 K时,热噪声水平已经分别可以达到 $10 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 和 $2 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 。这一噪声水平已接近SQUID器件。

基于其高灵敏度,目前,该类传感器已经开始在生物医学领域进行测试^[24]。图5是通过该类传感器获得的心磁图信号,并与传统心电图信号进行对比。可以看出,该传感器的灵敏度已经可以完全满足心磁信号的测量。

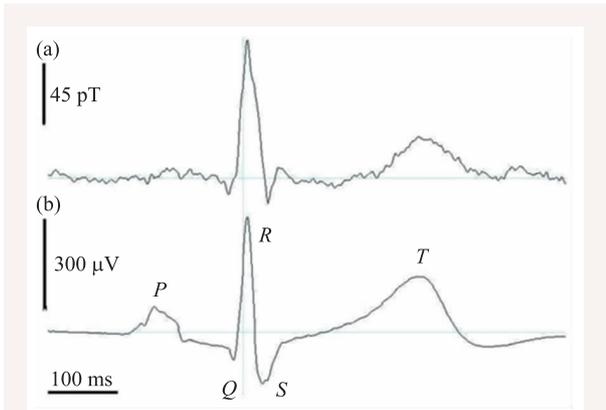


图5 (a)GMR/超导复合式磁传感器获得的心磁信号;(b)心电图测试结果^[24]

不仅如此,利用该类传感器体积小、结构简单、灵敏度高优点将传感器制备成阵列,可以实现多通道生物磁信号成像。相应的实验工作已经于2012年开展^[25]。实验中通过4个GMR/超导复合式磁传感器组成阵列对心磁金属导线磁信号进行了测试(图6),证实了该传感器在实时测量方面具有明显优势,同时该传感器阵列结构简单,若能进一步提高器件的灵敏度,将有望实现脑磁测量。

除了高灵敏度,GMR/超导复合式磁传感器同时具有较大的频带宽度^[26]。图7(a)是不同背景磁场下传感器磁场的响应随磁场频率的变化。背景磁场为0时,传感器对于磁场信号在1 GHz的频率范围内都具有平坦的响应(更高的频率会引起GMR铁磁层发生铁磁共振)。此外,该复合式传感器具有非常快的响应恢复速度,图7(b)是该复合式传感器对一个 $50 \mu\text{s}$ 方波脉冲的响应及恢复。通过对比可以看出,其响应恢复时间要明显优于共振线圈。

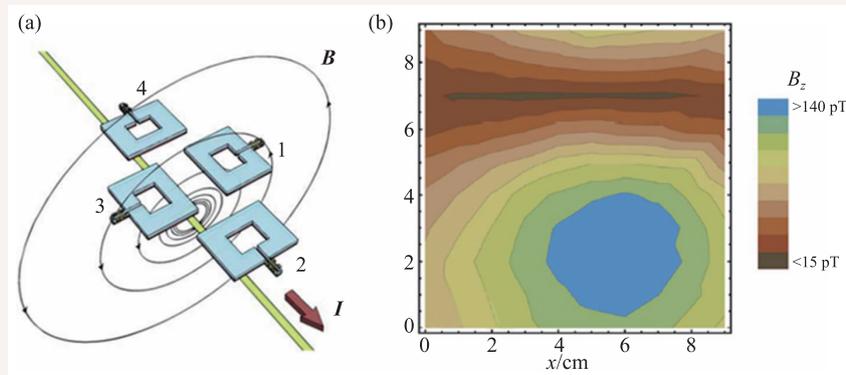


图6 (a)GMR/超导复合式磁传感器阵列结构示意图;(b)传感器阵列对金属导线的磁成像^[25]

利用其优异的频带特性,该传感器有望应用于低场核磁共振(NMR)、核四级共振(NQR)以及磁共振成像(MRI)等共振信号测试领域。目前相关实验工作已经开展^[23, 27, 28]。其中Myriam Pannetier小组利用GMR/超导复合式磁传感器作为信号检测器件,搭建了一套低场核磁共振系统。图8(a)为利用该系统测得的3 ml

的CuSO₄溶液的自由感应衰减信号(频率210 kHz, 5 mT)^[23]。图8(b)是利用该系统获得的MRI图像^[27], 被成像物体为一个多孔的塑料球, 孔内注有液体(图8(b)插图), MRI图像空间分辨率达到了1 mm。

作为一种新型的弱磁探测器, GMR/超导复合式磁传感器的磁场探测精度目前已经达到fT量级。若要进一步提升器件的磁场探测精度, 就需要用灵敏度更高、性能更加优异的磁传感器代替GMR。

4 TMR/超导复合式磁传感器

1995年, 由美国麻省理工学院和日本东北大学的两个研究小组独立发现, 将两个磁性电极层之间用极薄的绝缘层分开会产生很大的磁电阻效应(室温下达到11%)^[8]。这种由磁性层/绝缘层/磁性层构成的结构, 称为磁性隧道结(MTJ)。在MTJ中, 中间的绝缘层很薄(几个纳米), 使得可以有大量电子隧穿通过。通过隧道结的电流依赖于两个磁性层的磁化强度矢量的相对取向。这种隧穿电流随外磁场变化的效应被称为隧道磁电阻(TMR)效应。隧道磁电阻效应可以由Julliere双电流模型解释^[29]。假定电子在隧穿过程中自旋不发生翻转, 并且隧穿电流正比于费米面附近电子的态密度。当MTJ两侧铁磁层处于平行排列时, 左侧的少数电子向右侧的少数空态隧穿, 左侧的多子电子向右侧的多子空态隧穿, MTJ处于低阻态; 当MTJ两侧铁磁层处于反平行排列时, 左侧的少数电子向右侧的多子空态隧穿, 而左侧的多子电子向右侧的少数空态隧穿, MTJ呈现高阻态。

过去的十几年中, TMR电阻变化率在被不断提高。例如2005年, Djayaprawira等人得到了230%的基于氧化镁绝缘层的TMR磁电阻变化率^[30]。不久之后, 日立及IBM两家公司分别报导了350%的TMR变化率^[31]。2006年, 日立公司又报导了磁阻变化率为472%的TMR材料^[32]。与此同时, 理论工作表明, 对于氧化镁基的TMR材料, 其磁电阻变化率可达1000%^[33]。

表2列出了AMR器件、GMR器件以及TMR

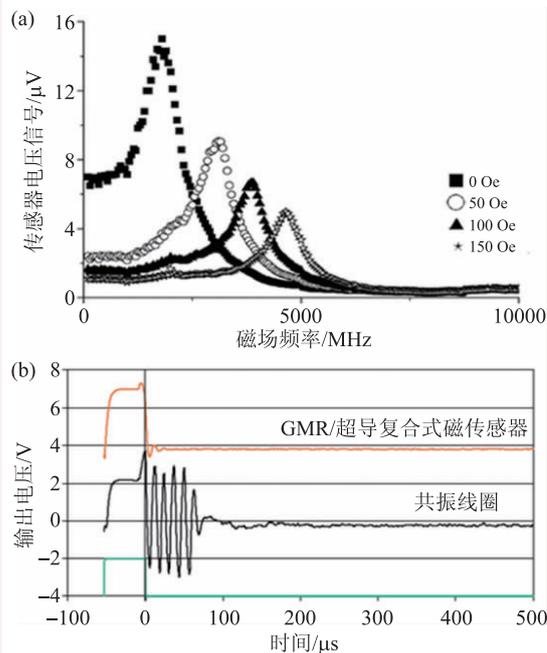


图7 (a)不同磁场下复合式传感器信号随频率的变化; (b)GMR/超导复合式传感器与共振线圈在800 kHz时对50 μs 脉冲的响应恢复^[26]

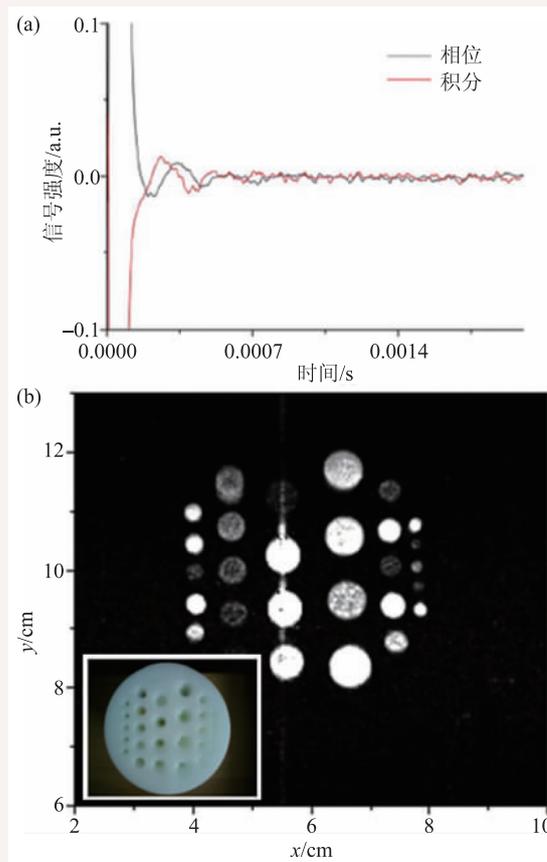


图8 (a)3 ml的CuSO₄溶液的自由感应衰减信号^[32]; (b)一个带孔的塑料球的图像, 孔内注有液体。插图为带孔塑料球^[27]

表2 各类磁电阻器件的典型技术参数对比

器件	尺寸/mm	磁阻变化率/%	线性区间/Oe	灵敏度/(mV/V/Oe)
AMR	1*1	2—3	~10	1
GMR	2*2	5—80	~30	3
TMR	0.5*0.5	30—400	~200	20

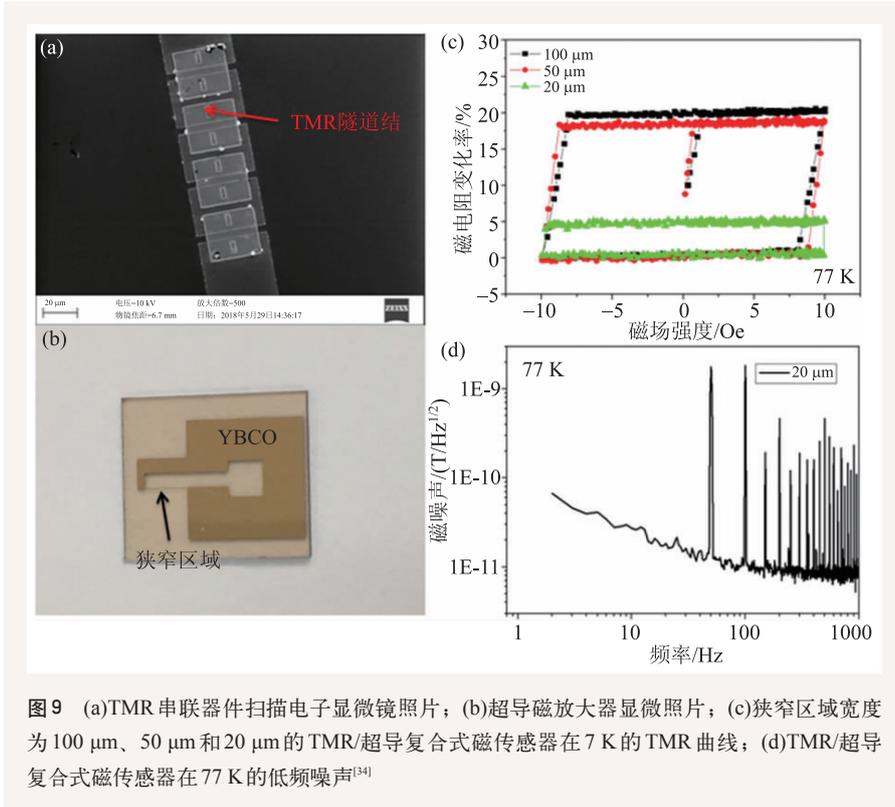


图9 (a)TMR串联器件扫描电子显微镜照片；(b)超导磁放大器显微照片；(c)狭窄区域宽度为100 μm、50 μm和20 μm的TMR/超导复合式磁传感器在77 K的TMR曲线；(d)TMR/超导复合式磁传感器在77 K的低频噪声^[34]

器件的典型技术参数对比。可以看出，相比GMR来说，TMR具有更好的温度稳定性、更高的灵敏度、更低的功耗，以及更宽的线性范围。用TMR代替GMR制备TMR/超导复合式磁传感器，将会进一步提升器件的灵敏度，并且预计噪声水平将降低至1 fT/Hz^{1/2}水平。然而目前尚未有TMR/超导复合式磁传感器的文献报导，其主要原因是TMR电极制备较为复杂，超导薄膜(例如YBCO)和TMR传感器都需要分别进行高温退火处理，这将会对超导薄膜的超导电性以及TMR传感器的性能造成破坏，使得TMR与超导的复合薄膜难以制备。

本课题组首先采用贴合的方式将TMR传感器对准贴合在超导磁放大器狭窄区域上方，成功制备了不同超导磁放大器狭窄区域宽度的TMR/超

导复合式弱磁传感器。相比于TMR与超导复合薄膜存在的制备困难，这种贴合方式具有操作简单，且不影响超导磁场放大器与TMR器件各自的性能等优点。同时对该传感器灵敏度、噪声水平等进行了测试^[34]。

为避免单个TMR隧道结被静电击穿，以及提高磁场检测精度，实验所设计的TMR传感器电路采用8个隧道结串联组成(图9(a))。TMR器件灵敏度在77 K为0.86%/Oe。实验中选用YBCO作为超导磁场放大器的材料(图9(b))。

图9(c)为TMR/超导复合式磁传感器在77 K的TMR曲线。其中TMR曲线在零场附近或闭合回路两侧线性区间的斜率即为器件的灵敏度。器件的灵敏度较之TMR传感器自身得到了明显提高，并且灵敏度随着狭窄区域的宽度减小而显著增加。对于狭窄区域宽度为20 μm的器件，在77 K时灵敏度达到了18.1%/Oe，相比于TMR传感器自身提高了约21倍。

狭窄区域宽度为20 μm的器件的低频噪声频谱密度测试结果如图9(d)所示。器件在500 Hz噪声水平约为6.6 pT/Hz^{1/2}。在110 Hz以下的低频范围内，1/f噪声占据主导地位，在2 Hz噪声水平达到67 pT/Hz^{1/2}。

由于贴合TMR器件与超导磁放大器的低温胶过厚导致TMR—超导磁放大器间距过大(50 μm)，使得TMR/超导复合式磁传感器的灵敏度、探测精度较GMR/超导复合式磁传感器、SQUID等器件仍有明显差距。理论计算表明，减小TMR—超导磁放大器间距将使得磁场放大倍数呈指数形式

上升;若能将TMR—超导磁放大器间距降低至 $0.5\ \mu\text{m}$ 以内,磁场放大倍数可接近1000倍。今后可通过热压印等技术减小TMR—超导磁放大器间距,从而提高器件的灵敏度。

5 结论

磁电阻/超导复合式磁传感器作为一种新型的高灵敏度磁探测器,其探测精度目前已接近SQUID器件并已达到fT量级。同时这类传感器又具有体积小、结构简单、工艺成熟、便于大规模

生产等优势,使其在未来发展潜力巨大。就该复合式磁传感器而言,进一步提升器件的探测精度是其未来研究发展的主要方向。一方面,继续减小超导磁场放大器的狭窄区域宽度至 $1\ \mu\text{m}$ 以下,同时增大磁场放大器的有效面积都可以将磁场放大倍数继续提升至几千甚至上万倍,但是同时会对传感器的工作区间以及小型化造成影响。另一方面,使用灵敏度更高的磁电阻传感器(TMR、巨磁阻抗器件(GMI)等^[35]),将有望使得该复合式传感器的磁场探测精度达到1fT,甚至0.1 fT的量级。

参考文献

- [1] Lenz J, Edelstein A S. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(3): 631
- [2] Robbes D. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 129: 86
- [3] Clarke J, Braginski A I. *The SQUID handbook*. Wiley-VCH, 2004
- [4] Drung D, Assmann C, Beyer J *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, 17(2): 699
- [5] Koelle D, Kleiner R, Ludwig F *et al.* *Reviews of Modern Physics*, 1999, 71: 631
- [6] Fert A. *Reviews of Modern Physics*, 2008, 80: 1517
- [7] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* *Physical Review Letters*, 1988, 61(21): 2472
- [8] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M *et al.* *Physical Review Letters*, 1995, 74(16): 3273
- [9] 吕华,刘明峰,曹江伟等. *磁性材料及器件*, 2012, 03: 1
- [10] Chaves R C, Freitas P P, Ocker B *et al.* *Applied Physics Letters*, 2007, 91: 102504
- [11] Pannetier M, Fermon C, Legoff G *et al.* *Science*, 2004, 304: 1648
- [12] Robbes D, Dolabdjian C, Saez S *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11(1): 629
- [13] Pannetier M, Fermon C, Legoff G *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, 15(2): 892
- [14] Brandt E H, Mikitik G P. *Physical Review Letters*, 2000, 85(19): 4164
- [15] Pannetier M, Fermon C, Vedrine P *et al.* *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 129(SI): 149
- [16] Pannetier M, Fermon C, Dyvorne H *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 332(9): 1647
- [17] Thomson W. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1856, 8: 546
- [18] Caruso M J, Bratland T, Smith C H *et al.* *Sensors-Peterborough*, 1998, 15: 34
- [19] Mott N F. *Proceedings of The Cambridge Philosophical Society*, 1936, 32, 281
- [20] Honda S, Ohmoto S, Imada R *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1993, 126(1): 493
- [21] Pannetier M, Fermon C, Legoff G *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, 290(SI): 1158
- [22] Pannetier M, Fermon C, Polovy H *et al.* *IEEE Sensors*. 2009, 1: 1856
- [23] Dyvorne H, Fermon C, Pannetier M *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, 19(3): 819
- [24] Pannetier M, Polovy H, Sergeeva C N *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 303: 012054
- [25] Campiglio P, Caruso L, Paul E *et al.* *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3501
- [26] Pannetier M, Fermon C, Biziere N *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, 17(2): 598
- [27] Sergeeva C N, Dyvorne H, Dabek J *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 303: 012055
- [28] Sinibaldi R, De Luca C, Nieminen J O *et al.* *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 142: 389
- [29] Julliere M. *Physics Letters A*, 1975, 54(3): 225
- [30] Djayaprawira D D, Tsunekawa K, Nagai M *et al.* *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 092502
- [31] Parkin S, Jiang X, Kaiser C *et al.* *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(5): 661
- [32] Ikeda S, Hayakawa J, Lee Y M *et al.* *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(37): L1442
- [33] Mathon J, Umerski A. *Physical Review B*, 2001, 63: 220403
- [34] Wu Y, Xiao L Y, Hou S Z *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, submitted
- [35] 王三胜,郭强. *物理*, 2016, 45(3): 172