



隧穿磁阻传感器研究进展

周子童 闫韶华 赵巍胜 冷群文

Research progress of tunneling magnetoresistance sensor

Zhou Zi-Tong Yan Shao-Hua Zhao Wei-Sheng Leng Qun-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 058504 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211883

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211883>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚕丝基可穿戴传感器的研究进展

Recent advances in silk-based wearable sensors

物理学报. 2020, 69(17): 178703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200818>

自驱动柔性生物医学传感器的研究进展

Research progress of self-powered flexible biomedical sensors

物理学报. 2020, 69(17): 178704 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201012>

柔性压阻式压力传感器的研究进展

Advances in flexible piezoresistive pressure sensor

物理学报. 2021, 70(10): 100703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210023>

柔性压力传感器的原理及应用

Sensing mechanisms and applications of flexible pressure sensors

物理学报. 2020, 69(17): 178102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200987>

基于流体模型的碳纳米管电离式传感器的结构优化方法

Structure optimization of carbon nanotube ionization sensor based on fluid model

物理学报. 2021, 70(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201828>

二维材料在生物传感器中的应用

Applications of two-dimensional materials in bio-sensors

物理学报. 2021, 70(6): 064701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201613>

综述

隧穿磁阻传感器研究进展*

周子童¹⁾²⁾ 闫韶华¹⁾²⁾ 赵巍胜^{1)†} 冷群文^{2)‡}

1) (北京航空航天大学集成电路科学与工程学院, 北京 100191)

2) (北京航空航天大学青岛研究院, 北航歌尔微电子研究院, 青岛 266000)

(2021年10月11日收到; 2021年11月15日收到修改稿)

传感器作为物联网技术的基石, 在人们的生产生活中发挥着重大作用. 其中, 基于隧穿磁阻效应 (tunneling magnetoresistance, TMR) 的磁传感器具有灵敏度高、尺寸小、功耗低等优点, 在导航定位、生物医学、电流检测和无损检测等领域具有极大的应用前景. 本综述以 TMR 传感器技术路线的发展为核心, 囊括了从基本传感单元到三维空间磁场检测, 再到实际应用的多个研究重点. 首先, 介绍了 TMR 传感器发展历程并阐明其基本工作原理, 讨论了提高单个传感单元磁隧道结输出线性度的方法. 接下来, 详细介绍了传感器的重要电路结构——惠斯通电桥, 以及制备 TMR 全桥结构的多种工艺方法. 进一步, 从三维空间磁场检测这一市场需求入手, 深入讨论了基于 TMR 传感器的三维传感结构的设计和制备方法. 同时, 以传感器灵敏度和噪声水平这两大基本性能为切入点, 列举了 TMR 传感器性能的优化方案. 最后, 本文对 TMR 传感器的应用展开了详细介绍, 以自旋麦克风, 生物传感器两个新兴应用为例, 对 TMR 传感器未来在物联网中的发展和应用进行了展望.

关键词: 隧穿磁阻传感器, 线性化方法, 磁传感器噪声, 智能应用**PACS:** 85.75.Ss, 73.43.Qt, 75.47.Gk, 85.70.-w**DOI:** 10.7498/aps.71.20211883

1 引言

近年来, 受物联网 (internet of things, IoT) 产业驱动, 传感器迎来了飞速发展. 传感器种类繁多, 从不同类型的应用场景中收集数据, 提高生产生活效率, 为万物互联赋能. 其中, 磁传感器占据了物联网各类智能传感器约 10% 的份额^[1,2], 从检测地磁场用于导航交通, 到检测神经元活动产生的极微弱磁场用于医疗诊断, 磁传感器的应用无处不在.

随着人们对传感器高灵敏度、低功耗、小型化等性能需求的提高, 集成电路中微型磁传感器所使用的技术也在不断更新, 目前主要包括霍尔效应 (Hall effect)、各向异性磁阻 (anisotropic magne-

toresistance, AMR) 效应、巨磁阻 (giant magnetoresistance, GMR) 效应以及隧穿磁阻 (tunneling magnetoresistance, TMR) 效应四种. 其中, 霍尔传感器是发展最为成熟的商业产品, 原理简单, 制备成本低, 但是霍尔传感器需要集成聚磁环结构来提高灵敏度^[3], 器件尺寸较大, 同时霍尔元件又有功耗高, 线性度差等缺点. 因此, 基于磁阻效应的磁传感器得益于其低功耗、高灵敏度、易集成等优点, 开始受到关注.

早在 1857 年人们就发现和验证了 AMR 效应^[4], 然而受限于薄膜技术的发展, 直到约百年后 AMR 效应才真正应用到传感器中. AMR 效应产生的磁阻率较低, 因此在弱磁探测方面的能力不足, 但胜在制备成本低, 在磁传感器市场中仍有一席.

* 山东省重点研发项目 (批准号: 2021CXGC010109)、北京市科技委项目 (批准号: Z201100004220002) 和国际合作项目 (批准号: B16001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weisheng.zhao@buaa.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: lengqw@bhqdit.com

表 1 不同磁传感器技术性能对比^[14]
Table 1. Performance comparison of different magnetic sensor technologies^[14].

	HALL	AMR	GMR	TMR
物理效应	霍尔效应	各向异性磁阻效应	巨磁阻效应	隧穿磁阻效应
感应方向	垂直	面内	面内	面内/垂直
最大磁阻率/%	—	2.0 ^[23]	24 ^[24]	604 ^[10,11]
磁场探测范围/T	10 ⁻³ —10	10 ⁻⁹ —10 ⁻³	10 ⁻⁵ —10 ⁴	10 ⁻¹² —10
退火温度/℃	—	—	220—280	280—340
磁场灵敏度/(mV·V ⁻¹ ·Oe ⁻¹)	~0.05	~1	~3	~100
噪声指数/(nT·Hz ^{-1/2})@1 Hz	>100	0.1—10	1—10	0.01~10
功耗/mA	5—10	1—10	1—10	0.001—0.1
芯片尺寸/mm ²	~1×1	~1×1	~0.5×0.5	~0.5×0.5

GMR 效应自 1988 年被首次发现之后^[5,6]很快便得到了商业化应用,应用于硬盘驱动器的数据读取磁头,极大提高了硬盘的面记录密度,更重要的是与互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 技术的高兼容性使之获得广泛研究和应用. TMR 效应的发现早于 GMR 效应^[7],但直到 1995 年,室温下可重复的隧穿磁阻效应被报道后^[8,9],才唤起人们的研究热潮. TMR 效应理论上能产生极高的磁阻率,基于单晶 MgO 势垒的 TMR 磁阻率实验值不断提高,一度达到 604%^[10,11],时至今日,其薄膜结构和性能参数仍在不断优化^[12,13]. 表 1 对比了各类磁传感器之间的主要性能^[14]. 显然, TMR 传感器相对于其他几类磁传感器,有更高的灵敏度、更低的功耗和更宽的线性范围,被认为是构建磁传感器的理想器件,并且在多个领域有广阔的应有前景.

例如,在生物医学检测以及辅助诊疗领域,实现人体心磁图 (magnetocardiography, MCG) 和脑磁图 (magnetoencephalography, MEG) 信号的提取,可以帮助人类加深对自身行为的认知^[15,16],提高医疗健康服务水平. 然而,心脏产生的磁场量级约在 10⁻¹² T,脑部神经元产生的磁场约在 10⁻¹⁵ T,对传感器的探测能力要求极高. 相对于目前测量心、脑磁场常用的超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device, SQUID), TMR 传感器具有尺寸小、成本低、空间分辨率高等优点,同时其检测灵敏度也可与 SQUID 相比拟,在人体磁场探测方面具有非常大的潜力^[17]. 在导航定位及车辆监控方面,通过检测车辆通过路面指定位置带来的地磁场扰动,可以对车辆进行测速、分类,得到如车速、车辆位置、流量、占用率等动态交通

信息,利用这些信息可以进一步规划交通灯控制、堵塞预警、事故预估、限速、停车位管理等工作,可用于建立大规模交通监控和管理系统,进而发展防碰撞、无人驾驶等应用,极大方便了智能交通网络的构建^[18,19]. 在电流检测方面, TMR 传感器可支撑频率高达 10 MHz 的交流电流以及直流电流的测试^[20],适用于无接触式的多线电缆中的电流检测,相较于传统的电流钳,使用方便且无需过多维护,因此常被应用于智能电网监测或智能制造中的功耗监测^[21]. 除此之外,由于 TMR 传感器在高频交变磁场中表现出来的高灵敏度以及其可以实现非接触检测,因此这类传感器也常用于导电材料中的无损检测^[22].

本文首先介绍 TMR 传感器的基本单元——磁隧道结 (magnetic tunnel junction, MTJ),阐述其对磁场进行线性感应的原理,介绍基于磁隧道结的磁阻传感器结构设计以及工艺制备的关键技术,并重点从灵敏度及噪声水平两方面探讨总结传感器性能优化的方法,最后从自旋麦克风、生物医疗等新兴领域介绍 TMR 传感器应用情况,对传感器的发展前景和应用潜力进行展望.

2 传感器的工作原理

图 1(a) 为 TMR 传感器基本单元磁隧道结的结构原理图. 隧道结的核心部分是由两个铁磁金属层夹着一个隧穿势垒层 (barrier layer) 而形成的“三明治”结构,其中一个铁磁层为自由层 (free layer),另一个为参考层 (reference layer),参考层的磁化方向由下方的钉扎层 (pinning layer) 固定,在一定大小的磁场下保持不变,而自由层的磁化方

向可在外磁场作用下转动. 如图 1(b) 所示, 隧道结的电阻随着自由层与参考层之间相对磁化方向的夹角改变, 电阻值可以通过 (1) 式计算,

$$R(\theta) = R_p + (R_{ap} - R_p)(1 - \cos \theta)/2, \quad (1)$$

其中, R_p 与 R_{ap} 分别表示两个铁磁层相对磁化方向为平行和反平行时隧道结的电阻, θ 为相对磁化方向的夹角, 当自由层和参考层磁化方向反平行时, 阻值最大, 磁化方向平行时阻值最小. 在最大值和最小值中间, 电阻随磁场变化的线性区即为传感器的工作区间.

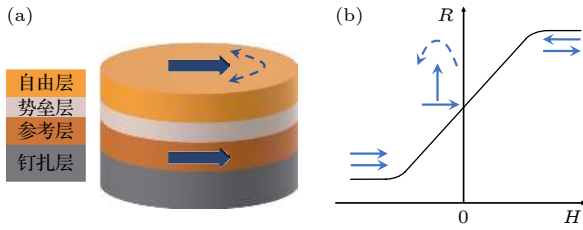


图 1 磁隧道结 (a) 膜层示意图; (b) R - H 曲线图
Fig. 1. Magnetic tunnel junction: (a) Schematic diagram of the MTJ stacks; (b) R - H loop curve.

2.1 传感器的制备工艺

通过微纳加工方法对 TMR 多层膜进行图形化工艺, 制作相关功能性器件以及电路是 TMR 传感器制备过程中极为重要的部分. 图 2 为 TMR 传感器的图形化工艺流程图, 包括光刻、刻蚀、去胶、回填等加工步骤. 图形化的主要目的是将所设计的图形转移到硅片表面. 制备串联或并联的传感单元磁隧道结, 一般需要 4 次光刻. 光刻是通过特定光源将设计好的器件结构从掩模板转移到薄膜表面光刻胶上从而实现图形转移的工艺. 刻蚀是通过物理或者化学手段将没有被光刻胶保护的薄膜区域去除的步骤, 从而得到与掩模板完全对应的图案.

在图 2 中, 第 1 步光刻的目的是形成底电极 (bottom electrode, BE) 的图形结构, 首先通过光刻显影将图形复制到光刻胶上, 再通过刻蚀工艺将图形转移到底电极上并去胶. 第 2 步光刻是为了形成多个磁隧道结的图形结构. 需要注意的是, 在这一步刻蚀得到磁隧道结后需要回填 SiO_2 或者 Si_3N_4 , 以此来保护磁隧道结不会在后续工艺中受

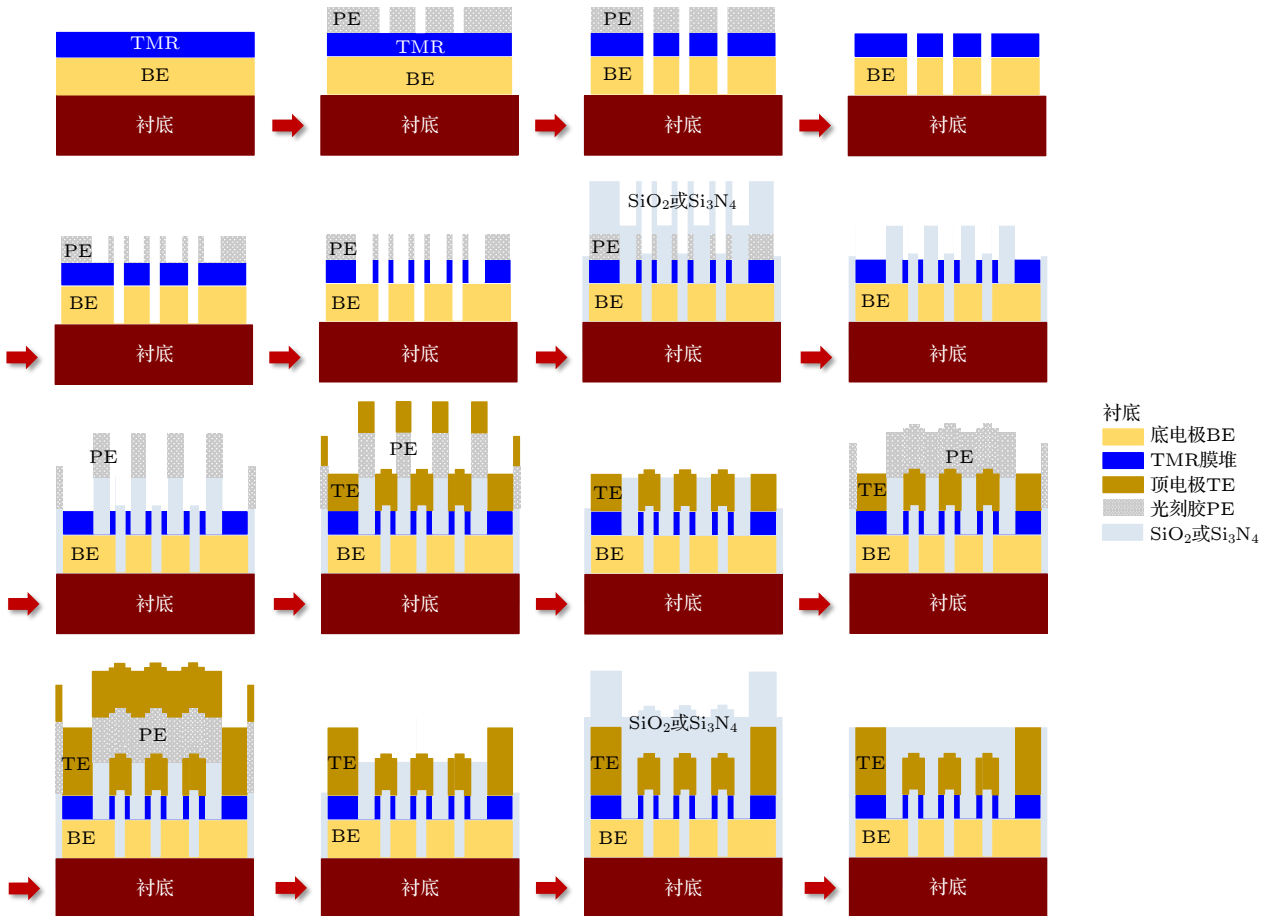


图 2 TMR 传感器的图形化工艺流程图
Fig. 2. Flow chart of pattern process of TMR sensors.

到损伤而导致磁阻率降低. 去胶后进行第 3 次光刻来定义顶电极 (top electrode, TE) 图形, 再通过电子束蒸发沉积顶电极, 完成多个磁隧道结单元的互联. 最后一次光刻目的是保护磁隧道结之间的互连线, 进行第 2 次电极蒸镀增加焊盘的厚度. 随后, 回填 SiO_2 或者 Si_3N_4 保护整个 TMR 传感器的器件结构, 最后, 通过化学机械抛光将焊盘从 SiO_2 或者 Si_3N_4 保护层中曝露出来以确保器件测试的可行性.

对于更加复杂的图形结构, 其光刻和刻蚀次数也会相应增加. 然而, 随着光刻以及刻蚀次数的增加, 工艺难度和风险也随之增大. 因此, 简化工艺步骤也是提高 TMR 传感器性能的重要研究方向. 在实际应用中, 可以通过改变图形以及电路结构设计或者调整工艺参数和工艺流程实现传感器性能优化.

2.2 传感器的线性化

如图 1(b) 所示, 在理想情况下, 隧道结的电阻在一定范围内随外磁场呈线性变化, 同时没有磁滞, 即矫顽场 (coercivity field) $H_c = 0$; 没有偏置, 即 R_{ap} 与 R_{p} 的中间值正好处于零磁场位置. 实现无磁滞的线性化输出一般有以下几种方案. 1) 通过直接施加与传感器感应方向相垂直的外偏置场^[25]或在隧道结周围集成如 CoCrPt 的永磁体产生偏置场^[26], 实现线性化的输出, 如图 3(a) 所示. 这种方法可以稳定自由层的磁化状态, 减少输出曲线中

的跳点, 但是会增加器件制备的复杂性和成本, 不利于小型化. 2) 利用形状各向异性, 通过调节磁隧道结宽长比 W/L , 产生强于各向异性场的退磁场来实现线性化输出^[27], 如图 3(b) 所示. 3) 通过减小自由层厚度使材料表现出类似超顺磁的性质, 进而使隧道结电阻随外场产生线性变化^[28]. 然而该方法会极大地降低隧道结的磁阻率并同时增大噪声水平. 4) 在自由层上再额外生长一层钉扎层, 如图 3(c) 所示. 由于自由层的钉扎层和参考层的钉扎层具有不同阻挡温度 (blocking temperature), 通过两次磁场退火处理, 产生相垂直的钉扎方向, 从而达到线性化的目的^[29].

以上方式大多仅适用于具有面内各向异性 (inplane magnetic anisotropy, IMA) 的隧道结. 对于感应垂直方向磁场的隧道结, 可以通过结合具有垂直各向异性 (perpendicular magnetic anisotropy, PMA) 的参考层和具有面内各向异性的自由层实现^[30,31]. 由于参考层的磁化方向在垂直各向异性性能的作用下垂直于平面, 因此自由层的磁化方向将随外磁场实现由面内向面外的翻转, 如图 3(d) 所示. 这样交叉易磁化轴的设计, 可根据应用需求, 通过选取合适的钉扎层材料和改变自由层厚度来调节线性范围和灵敏度^[32], 例如可以使用 $[\text{Co}/\text{Pd}]_n$ 多层膜构成合成反铁磁 (synthetic antiferromagnetism, SAF) 结构, 可产生高达 ± 2.5 kOe 的线性区, 来满足电流测试的需求^[12].

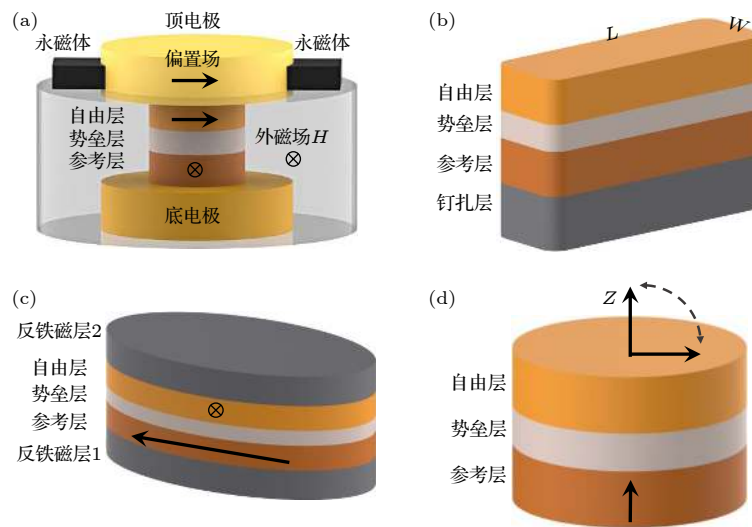


图 3 线性化方案图示 (a) 外加偏置场结构; (b) 强形状各向异性结构; (c) 双钉扎结构; (d) 交叉易磁化轴结构

Fig. 3. Linearization scheme diagram: (a) MTJ junction with bias field; (b) MTJ junction with strong shape anisotropic; (c) MTJ junction of double pinning; (d) MTJ junction with linear perpendicular magnetic anisotropy.

2.3 惠斯通电桥结构

磁隧道结的温度特性也影响其在传感器中的应用, 即其高阻态电阻 R_{ap} 会随着温度的升高而降低, 从而导致整体磁阻率降低^[33]. 为了抑制温度漂移, 提高传感器在不同温度环境下的稳定性, 通常将隧道结连接成惠斯通电桥结构, 当 4 个桥臂的电阻值随温度一致变化时, 电桥没有输出. 电桥结构中根据活跃电阻的数目可分为单桥 (unique bridge)、半桥 (half bridge) 和全桥 (full bridge) 3 种^[34]. 在单桥和半桥结构中, 不活跃的桥臂电阻通常使用 NiFe 等软磁材料进行屏蔽. 如图 4 所示, 图中 R 为单个磁隧道结的电阻值, V_0 表示差分输出电压, V_b 表示偏置电压. 全桥式结构的灵敏度最高, 且输出完全线性. 所以实际应用中常选用惠斯通全桥式结构. 值得注意的是, 在全桥式传感器中, 相邻两个桥臂上的磁电阻随外磁场的变化相反, 也即构成桥臂的磁隧道结要具有相反的磁钉扎方向, 而在同一晶圆上沉积的薄膜, 其钉扎方向一致, 因此如何简单高效地制备全桥式传感器也是学术和工业界的重要研究热点之一.

$R_1 = R_2 = R_3 = R$	$R_1 = R_3$	$R_1 = R_3 = R + \Delta R$
$R_4 = R + \Delta R$	$R_2 = R_4 = R + \Delta R$	$R_2 = R_4 = R - \Delta R$
$\frac{\Delta R}{R}$	$\frac{\Delta R}{R}$	$\frac{\Delta R}{R}$
$V_0 = V_b \frac{\Delta R/R}{2(2+\Delta R/R)}$	$V_0 = V_b \frac{\Delta R/R}{2+\Delta R/R}$	$V_0 = V_b \frac{\Delta R}{R}$

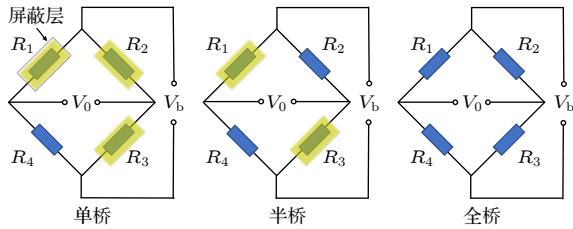


图 4 惠斯通电桥结构示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the Wheatstone-bridge structure.

通常有以下几种方法制备惠斯通全桥磁阻传感器. 第 1 种是将制备完成的单个隧道结器件按照相反的磁钉扎方向排列, 如图 5(a) 所示, 通过外部绑线的方式连接成全桥式结构. 这样机械组装式的方法会引入较大的对准误差, 且显然不适用于大规模生产, 因此, 在同片晶圆上实现全桥式传感器结构制备更为重要.

第 2 种是通过局部退火的方式改变电桥中两个桥臂上磁隧道结的钉扎方向. 具体做法是, 先将整个晶圆加热至接近但小于反铁磁钉扎层的阻挡温度, 之后在需要改变方向的桥臂上通入脉冲电

流, 如图 5(b) 中的 MTJ_1, MTJ_3 , 同时施加与原退火方向相反的外磁场. 在脉冲电流的作用下, 局部温度将上升至阻挡温度之上, 磁钉扎方向被改变, 未通电流的另外两个桥臂则不受影响^[35]. 然而, 达到阻挡温度所需要的电流较大, 容易造成隧道结的击穿. 类似地, 也可用激光辐射实现局部加热进行退火^[36]. 这种方法同样比较低效, 不适用于大规模生产.

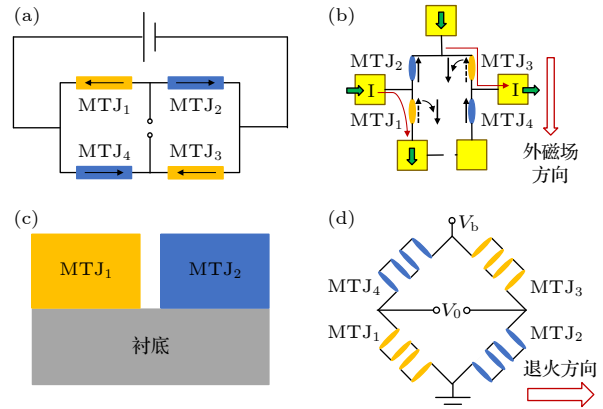


图 5 惠斯通全桥制备方法 (a) 机械组装式; (b) 局部退火式; (c) 分区域光刻式; (d) 后退火式

Fig. 5. Wheatstone bridge manufacturing method: (a) Mechanical assembly; (b) local annealing; (c) divide different areas for photolithography; (d) annealing after pattern process.

第 3 种方法是在同片晶圆上, 先通过光刻定义出不同的区域, 再分两次沉积不同结构的薄膜, 如图 5(c) 所示. 例如可以在常用的合成反铁磁结构 $CoFe/Ru/CoFe$ 中额外添加一层, 形成 $CoFe/Ru/CoFe/Ru/CoFeB$ 的结构^[37]. 经过退火处理后, 由于反铁磁耦合作用的存在, 两种结构的薄膜将会形成相反的参考层方向, 从而在同一晶圆上按照既定区域直接加工成惠斯通全桥式器件^[39]. 这种方法虽然简化了器件加工步骤, 但是却使薄膜沉积工艺变得极其复杂, 同时沉积两种薄膜结构需要精确设计, 保证其具有大致相同的磁阻率、电阻面积乘积 (RA) 等参数, 以避免桥式传感器的输出偏置.

第 4 种方法是利用形状各向异性和后退火工艺来设定桥臂中不同的钉扎方向^[40,41]. 例如, 在薄膜制备完成后, 不进行退火工艺, 直接加工成如图 5(d) 所示的桥式器件. 桥臂中磁阻单元的长轴沿着 45° 方向, 并且相邻桥臂中磁阻单元的长轴相互垂直. 经过加磁场的热退火处理, 由于退火过程中形

状各向异性产生的退磁场、感生各向异性场和来自反铁磁结构中的交换偏置场等相互作用,使得参考层的易磁化轴趋向于每个单元的短轴方向,如图 5(d)所示.同时,自由层的易磁化轴则受退磁场影响停留在长轴方向.通过这样的方式,可以得到具有线性化输出的全桥式传感器,也是目前较为高效的方法,适用于大规模生产.

除此之外,通过磁通聚集器 (magnetic flux concentrators, MFC) 改变相邻桥臂上的感应磁场方向实现全桥式输出也是常用方法之一.

2.4 传感器的三维集成

在实际生活中,磁场不仅仅存在于单一方向,因此需要磁阻传感器具有探测三维空间磁场的能力.最简单的实现方法是将 3 个面内单轴的磁传感器分别沿 x, y, z 传感方向相互垂直排列^[44],如图 6(a)所示.同时,为了降低这类传感器的噪声水平,可以在传感器外设置用铜线缠绕成的软磁管^[38],通入交流电流产生交变磁场,将传感器感应磁场频率调制到高频,以降低 $1/f$ 噪声,如图 6(b)所示,这种降低磁噪声方法的作用机制将在第 4 节详细阐述.此类三维磁传感器虽然结构简单,但是体积大,集成难度高,会引入较大的角度误差.而为了降低噪声,矫正误差需要集成复杂的外部电路,这又会导致功耗增大,难以得到广泛应用.

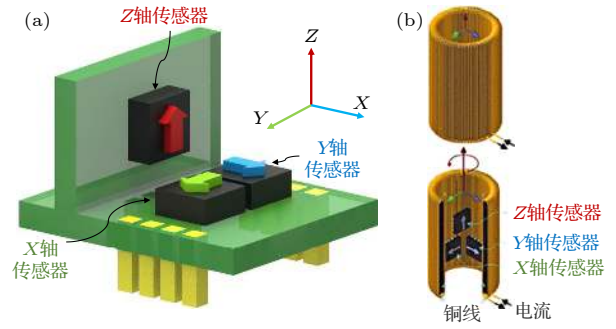


图 6 组装式三维 TMR 传感器 (a) 传感器结构示意图; (b) 带软磁管降噪的三维结构^[38]

Fig. 6. Assembled three-dimensional TMR sensor: (a) Schematic diagram of sensor structure; (b) three-dimensional structure with soft magnetic tube for noise reduction^[38].

如图 7(a)所示,为了改善拼接的角度误差,可以集成磁通控制器来诱导磁场方向发生变化,也就是利用其使垂直方向的磁通量转向面内,再通过面内的磁传感器进行探测^[42,45,46].如图 7(b).然而,用这种结构进行三维检测需要采用电压场矩阵进行线性标定,提取 3 个传感器的正交传感方向来消除直流偏移和角度误差,会造成大量冗余计算^[47],增大传感器功耗.

以上两种三轴传感结构,容易受实验设置和环境因素的限制,在实际制备过程中,无法保证传感方向的正交性.因此研发制备三轴磁阻传感器的新工艺方案是基于磁阻效应的三维空间磁场传感技术继续发展必须要克服的难题.

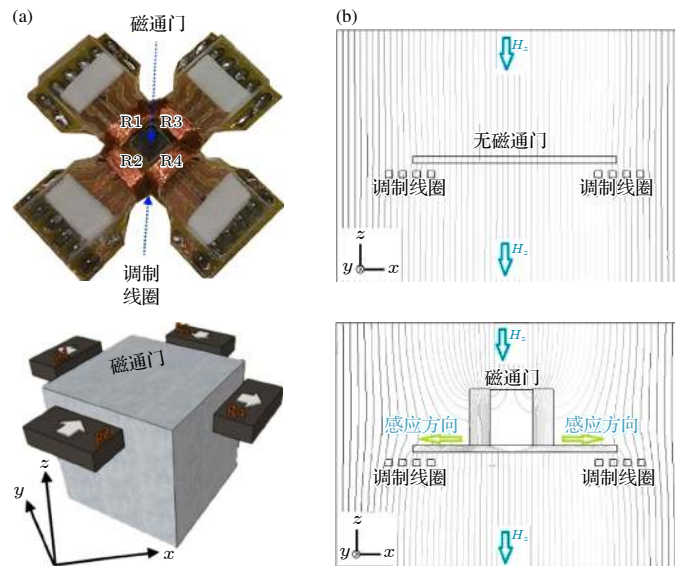


图 7 带磁通控制器的三维磁阻式传感器 (a) 传感器结构示意图^[42]; (b) 磁通控制器对于 Z 轴磁场磁通量的影响^[43]

Fig. 7. Three-dimensional TMR sensor with flux guides: (a) Schematic diagram of sensor structure^[42]; (b) effect of flux guides on magnetic flux of Z-axis magnetic field^[43].

与 GMR 传感器只能感应面内磁场不同, TMR 传感器可以用于探测垂直于面内的磁场, 因为调整膜层结构可以得到具有垂直磁各向异性的磁隧道结^[48]. 集成具有垂直磁各向异性的 TMR 传感器, 将是未来三轴 TMR 传感器的发展方向之一.

除此之外, Li 等^[49]提出了一种由 Ta/CoFeB/MgO 异质结构组成的单个自旋轨道矩器件. 该器件在原理上可以作为三维磁传感器, 通过磁畴壁运动, 得到反常霍尔效应电阻与面内/垂直磁场的线性变化关系, 以检测 X, Y, Z 三轴方向的磁场. 同时研究也预测了该传感原理可以在磁隧道结的结构中实现, 并且得到更高的灵敏度.

2.5 后端电路

虽然 TMR 传感器灵敏度高, 惠斯通电桥结构也为传感器提供了良好的温度稳定性, 但是在实际应用中, 为了提高传感器在复杂环境下的稳定性, 需要根据器件结构设计相应的专用集成电路 (application specific integrated circuit, ASIC). 如图 8 所示, 以 2020 年东京电气化学工业株式会社 (TDK) 发布的具有模拟和数字输出的高精度 TMR 角度传感器为例^[50], 为了匹配后端电路首先需要进行阻抗变换, 然后对多个桥式传感器的信号进行滤波放大处理, 再经过模数转换器将模拟信号

转换为可供数字系统传送及运算的数字信号. 数字信号处理器中主要进行初始化、补偿、校正等操作, 包括在芯片内部集成温度传感器, 进行温度测量并补偿计算; 对传感器本身的输出偏差和环境干扰等带来的误差进行校正, 最后输出修正后信号.

3 传感器的性能指标

3.1 灵敏度

灵敏度是磁阻传感器的重要性能指标之一, 在传感器传递曲线的线性范围内, 将灵敏度定义为

$$S = \frac{MR}{2\mu_0 H_k}, \quad (2)$$

其中 MR 与 H_k 表示传感器的磁阻比率和自由层各向异性场, μ_0 是真空磁导率. 很显然, 通过提高磁阻率和降低各向异性场均可以优化传感器的灵敏度.

磁隧道结的材料选择会影响其磁阻率. 经过多年的理论及实验探索, 发现采用单晶 MgO 代替无定形的 Al_2O_3 作为隧穿层, 隧道结磁阻率可以提升数个量级, 原因是 MgO 晶格对称性对隧穿电子的波函数具有筛选作用, 因而对 TMR 产生了额外的贡献^[26]. 同时, 常用的铁磁层材料 CoFeB 合金中各元素组分及厚度会影响其退火过程中的结晶度, 进而影响磁阻率^[51].

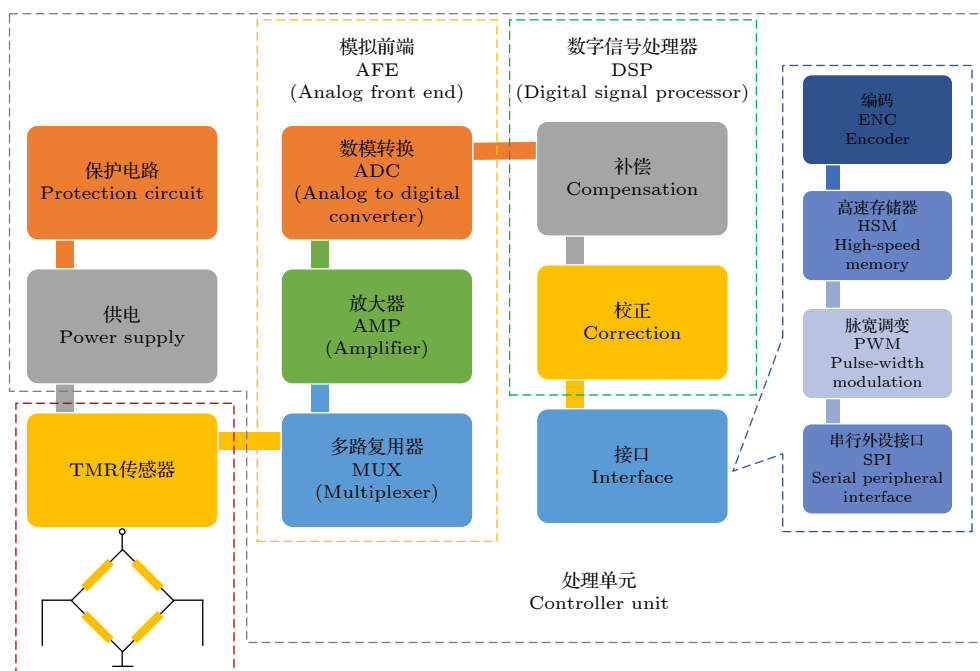


图 8 传感器后端基本电路结构图

Fig. 8. Basic back-end circuit diagram of sensor.

此外, 赫斯勒合金 (Heusler alloy) 作为一种半金属材料, 理论上自旋极化率可以高达 100%, 但是由于极少量的无序原子就会破坏赫斯勒合金的半金属性质, 并在费米能级附近产生少数自旋态^[53], 而在赫斯勒合金薄膜的制备过程中不可避免地会引入缺陷或杂质, 因此在实际应用中赫斯勒合金的自旋极化率很难达到理论值, 尽管如此, 也远高于其他铁磁材料, 因此将其用作隧道结的铁磁层材料, 能够有效提高磁阻率^[53,54].

隧道结的几何形状和加工工艺也会影响器件性能. 对于双钉扎的膜层结构, 理想情况下器件长宽比越大, 线性度越好. 然而在实际制备中器件线宽过小对光刻工艺的要求极高, 加工带来的工艺损伤无法避免. 损伤会导致隧道结边缘呈现不均匀的磁化状态, 降低器件灵敏度^[55].

如图 9 所示, 在隧道结周围引入磁通聚集器也是一种能有效提高传感器灵敏度的方法^[52], 磁通聚集器的主要作用是将待测磁场放大, 一般由高磁导率的材料, 如 CoZrNb, NiFe 等, 通过物理气相沉积的方式制备而成. 磁通聚集器对磁场的放大效果与其形状和与传感器的间距有关.

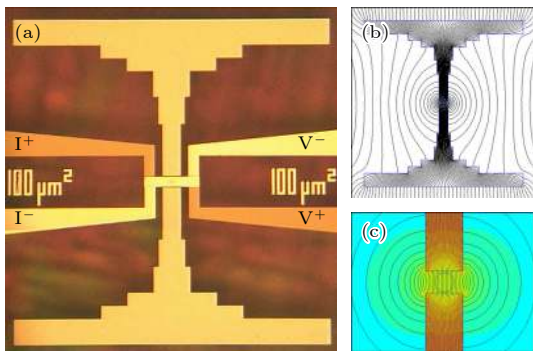


图 9 磁通聚集器的结构图以及周围磁通量分布情况^[52]
 (a) 光学显微镜下磁通聚集器和磁隧道结; (b) 磁通聚集器两端的模拟磁通量浓度; (c) 模拟磁通量浓度区域放大图
 Fig. 9. The structure diagram of the magnetic flux concentrator and the surrounding magnetic flux distribution^[52]:
 (a) Magnetic flux concentrator and magnetic tunnel junction under light microscope; (b) simulated magnetic flux concentrations at both ends of the flux concentrator; (c) enlarged image of simulated magnetic flux concentration area.

3.2 探测精度

除了灵敏度, 探测精度也是磁阻传感器的重要性能指标之一, 探测精度与传感器的灵敏度以及噪声性能相关, 表明磁阻传感器可探测的磁场最小值, 因此探测精度定义为

$$D^2 = \frac{S_v}{(\Delta V/\Delta H)^2}, \quad (3)$$

其中 S_v 表示传感器的电压噪声功率谱密度, $\Delta V/\Delta H$ 表示磁阻传感器的电压灵敏度. 可以看出, 提高传感器的灵敏度以及降低传感器的本征噪声都可以提高探测精度.

4 传感器的噪声

对于探测微弱磁场信号的 TMR 传感器来说, 除了提高灵敏度外, 降低噪声水平至关重要. TMR 传感器中的噪声有多种来源^[56], 根据与频率的相关性, 可以将其分为白噪声和与频率相关噪声. 白噪声指的是与频率无关的噪声, 包括热噪声和散粒噪声. 与频率相关的噪声主要包括 $1/f$ 噪声和随机电报噪声 (random telegraph noise, RTN). 根据作用机制不同, 磁阻传感器中的噪声也可以分为磁噪声和电噪声. 电噪声存在于所有电学材料和器件中, 而磁噪声则是磁性材料中特有的噪声, 也是对 TMR 传感器影响最大的噪声. 除了磁隧道结的本征噪声, 外部电路的噪声也会对探测精度产生影响. 这些噪声源互不相干, 总噪声可以看作是各噪声分量的叠加.

4.1 噪声来源

1) 在 TMR 传感器中, 白噪声存在于磁阻传感器工作的整个频段, 主要由两种噪声构成, 即热噪声和散粒噪声. 其中热噪声根据来源不同又可以分为热电噪声和热磁噪声. 热电噪声, 也称为 Johnson-Nyquist 噪声, 主要起源于载流子受温度影响在费米面附近发生的随机运动^[57,58]. 热磁噪声主要来源于磁场和热激发引起的磁矩运动, 也有研究认为热磁噪声来源于磁性薄膜中层间的畴壁跳跃^[59], 且随着自由层体积的增大而减小^[60]. 热电噪声的功率谱密度可以表示为

$$S_{\text{therm}} = 4k_B RT, \quad (4)$$

其中, S_{therm} 表示噪声的功率谱密度, k_B 为玻尔兹曼常数, R 为电阻值, T 为环境温度. 由此看出, 对于传感器器件, 热电噪声仅受电阻值和环境温度的影响.

Egelhoff 等^[61] 提出了一种基于涨落耗散定律的计算热磁噪声功率谱密度的方法, 热磁噪声的功率谱密度可以表示为

$$S_V^{\text{therm-mag}} = \frac{4k_B T \mu_0 \alpha_G}{\Omega \gamma M_S}, \quad (5)$$

其中, α_G 是吉尔伯特阻尼系数, γ 是单个电子的旋磁比, Ω 是自由层的体积.

散粒噪声来源于载流子的微粒特性, 与电子离散性和电子发射随机性有关. 隧道结中的绝缘势垒层可以视为导电介质的不连续处^[62], 因此 TMR 传感器中的散粒噪声远高于 GMR 传感器中的散粒噪声. 散粒噪声是白噪声的一种, 但不同的是散粒噪声与通入电流相关, 常出现于非平衡系统中, 属于非平衡本征噪声, 散粒噪声的功率谱密度表示为

$$S_{\text{shot}} = 2eIR^2, \quad (6)$$

其中, e 表示元电荷的大小, I 为通过隧道结的电流. 在磁隧道结中, 散粒噪声和热电噪声通常交织在一起^[63], 并且热能也会引起一部分电流波动, 为了同时考虑热能对噪声的影响, 可以将热-散粒噪声表示为

$$S_V^{\text{therm-shot}} = 2eIR^2 \coth\left(\frac{eV}{2k_B T}\right), \quad (7)$$

其中 V 是施加在磁隧道结上的偏置电压, 根据 (7) 式可知, 当偏置电压 V 低至使 $eV \ll k_B T$ 时, 热噪声成为白噪声的主要噪声源. 相反, 当偏压较高或者在低温环境的影响下, 令 $eV \gg k_B T$ 时, (7) 式近似等于 (6) 式, 此时散粒噪声成为主要噪声源, 因此环境温度和偏置电压是影响热-散粒噪声功率谱密度的重要因素.

2) $1/f$ 噪声与白噪声不同, $1/f$ 噪声与频率呈 $1/f^\beta$ 的变化关系, 通常 $\beta = 1$, 如图 10(a) 所示. 在磁性薄膜中, $1/f$ 噪声根据不同作用机制分为电 $1/f$ 噪声和磁 $1/f$ 噪声. 研究表明, 电 $1/f$ 噪声主要来源于隧道结中隧穿势垒层的缺陷以及其与铁磁层界面上电荷捕获带来的扰动^[62], 其功率谱密度表示为

$$S_V^{\text{elec-1/f}} = \alpha_{\text{elec}} \frac{V^2}{Af}, \quad (8)$$

其中 V 为施加在 MTJ 两端的电压, A 为隧道结感应面积, f 为频率, α_{elec} 是电胡格常数, 其大小依赖于隧道结的 RA 、磁阻率、磁化状态和施加偏压等性质^[56,64].

磁 $1/f$ 噪声也是低频噪声的一种, 这种磁噪声来源于磁畴在亚稳态间的跃动, 即自由层和钉扎层界面之间的磁矩转动, 这种膜层结构内部的磁化扰

动会带来较大的磁噪声^[65]. Egelhoff 等^[61] 给出了磁 $1/f$ 噪声的功率谱密度,

$$S_V^{\text{mag-1/f}} = \frac{2B_{\text{sat}} \alpha_{\text{mag}}}{\Omega f}, \quad (9)$$

其中 B_{sat} 表示自由层的饱和磁场大小, α_{mag} 是磁胡格常数. 降低饱和场可以相应降低磁 $1/f$ 噪声的大小, 帮助提高传感器对微弱磁场的检测能力.

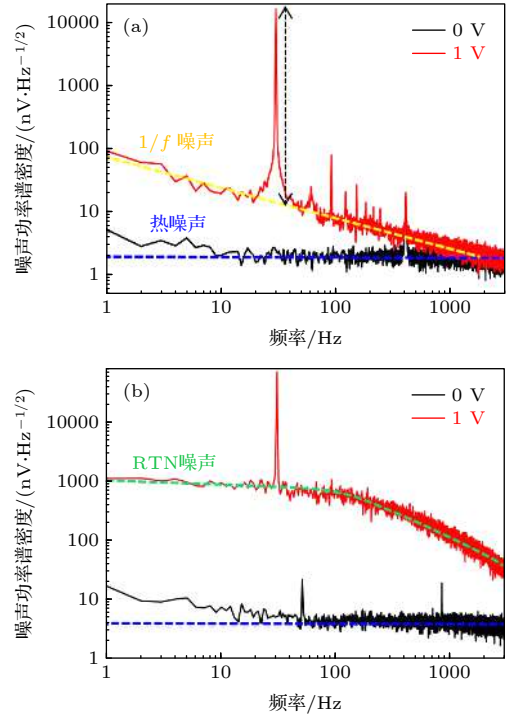


图 10 噪声功率谱密度曲线 (a) 热噪声和 $1/f$ 噪声功率谱密度曲线; (b) RTN 噪声功率谱密度曲线^[69]

Fig. 10. Noise power spectral density curve: (a) Power spectral density curves of thermal noise and $1/f$ noise; (b) RTN noise power spectral density curve^[69].

3) 随机电报噪声 (RTN) 是 Kandiah 和 Whiting^[66] 在场效应晶体管的相关研究中发现并提出的, 他们认为 RTN 由缺陷中心的充放电过程造成, 最终表现为信号在两个状态之间的波动. 对于隧道结来说, RTN 可以解释为随机的单个电子被单个陷阱捕获又释放的重复过程, 因此当 TMR 传感器的尺寸较小, 个别缺陷占主导时, RTN 会比较明显. 也有研究认为自由层中的磁矩波动也是 RTN 的来源之一^[67], 因此通过改善退火工艺进而减少膜层晶格缺陷也能有效抑制该噪声. 其功率谱密度可以表示为

$$S_V^{\text{RTN}} = 1 + \frac{S_0}{1 + (f/f_0)^2}, \quad (10)$$

其中 S_0 表示功率谱密度中与频率无关的分量, f_0 为特征衰减频率, $f_0 = (2\pi\tau)^{-1}$, τ 为洛伦兹涨落弛豫时间, 其噪声功率谱密度曲线如图 10(b) 所示. 通常情况下, RTN 在低频频段是低于 $1/f$ 噪声的, 但是当施加在传感器两端的偏压逐渐增大时, RTN 会明显增大^[68].

对于 TMR 磁传感器来说, 总噪声等于以上各种噪声的叠加, 在进行噪声测试和分析的过程中, 可以通过消除某种噪声, 反向计算这种噪声的量级大小, 实现不同类噪声分离.

4.2 降低噪声的方法

4.2.1 降低白噪声项

从 (7) 式可以看出, 通过增大施加在隧道结两端的电压, 可以相应地降低热-散粒噪声项^[70]. 然而, 隧道结的磁阻率会随着施加电压的增大而减小^[9], 因此需要在二者之间寻求折中以避免影响传感器的性能.

此外, 散粒噪声常出现于非平衡态系统. 因此, 使用惠斯通桥电路结构可以有效地减小输出的直流偏置和温度漂移, 使传感单元接近平衡态, 能起到抑制散粒噪声的效果^[71].

4.2.2 降低磁噪声项

热磁噪声和磁 $1/f$ 噪声都与隧道结的材料特性相关. 从 (5) 式和 (9) 式可以看出, 增大自由层体积可以同时降低热磁噪声和磁 $1/f$ 噪声, 即增大自由层的厚度^[72] 或面积. 另外, 根据 (9) 式, 降低自由层饱和场可以达到降低磁 $1/f$ 噪声的目的^[73], 这可以通过减小自由层厚度实现, 但同时会导致自由层体积减小, 继而导致热磁噪声增大以及磁 $1/f$ 噪声降幅低于计算值, 更严重的是会降低磁隧道结的磁阻率. 因此在优化噪声时平衡不同来源的磁噪声大小并同时保证传感器的高灵敏度是非常重要的. 例如, 减小自由层厚度使之成为超顺磁状态, 同时集成磁通聚集器以补偿厚度降低带来传感器灵敏度的损失^[52]. 磁性薄膜的多畴态也是磁性噪声的重要来源, 可以通过改变磁隧道结的形状以及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^[74,75]. 此外, 使用具有低阻尼系数的赫斯勒合金材料 Co_2FeAl ^[76] 等, 或对自由层进行弱钉扎以稳定磁化状态^[77] 等手段亦能达到降低磁噪声的效果.

4.2.3 降低电 $1/f$ 噪声项

目前降低电 $1/f$ 噪声主要有两种方法: 增加串并联隧道结的个数和集成磁通聚集器.

串并联多个 MTJ 单元: 在低频段内, 传感器的噪声以 $1/f$ 噪声为主. 根据 (8) 式, 增大自由层面积也可以减小电 $1/f$ 噪声^[78]. 但是单个结面积的增大使其形状各向异性发生改变, 会影响传感器的线性化输出. 因此, 通过对隧道结进行串并联来增大总感应面积可以有效提高传感器的信噪比. 如图 11 所示, 将 N 个 MTJ 串联后再并联 M 排, $1/f$ 噪声项理论上能降低到原来的 $1/(MN)$, 同时通过调节 N/M 的值来改变总电阻保持热噪声项稳定^[79].

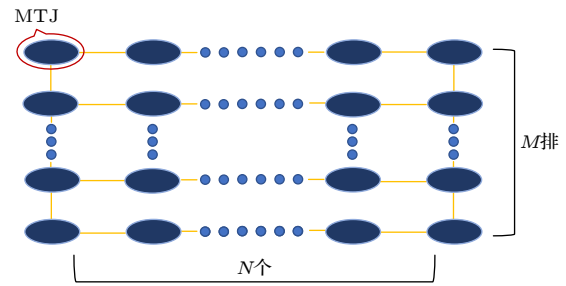


图 11 通过串并联 MTJ 来降低噪声的方法

Fig. 11. Noise is reduced by series and parallel MTJ.

引入磁通聚集器: 由 (7) 式可知, $1/f$ 噪声随着频率增大而减小, 将待测信号从低频段调制到高频段可以大幅度减小 $1/f$ 噪声对传感器输出信号的影响. 2002 年, Edelstein 等^[80] 提出了一种基于微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 的水平运动磁通聚集器, 这种聚集器由磁传感器和磁通聚集器组成, 如图 12 所示. 传统的磁通聚集器工作原理是将具有高磁导率的软铁磁体制作成特定的形状, 可以将固定位置的磁场放大 10—100 倍. 不同于常见固定的磁通聚集器, Edelstein 等将磁通聚集器制作在 MEMS 结构的弹簧片上, 通过驱动弹簧片周期性水平振动, 驱动频率选择弹簧片的共振频率 f_m , 令外磁场的频率被调制到 $2f_m$. 将 TMR 传感器放置于磁通聚集中心, 可以将待测磁场由低频调制到高频, 高频磁场通过磁电阻效应转化为交流电阻输出信号, 从而抑制 $1/f$ 噪声. 在 2006 年, Edelstein 等^[81] 实现了 MEMS 磁通聚集器和磁传感器的同片集成, 这种结构可以通过微瓦级的功率驱动 kHz 谐振频率, 从而将磁传感器的 $1/f$ 噪声水平降低 3 个数量级.

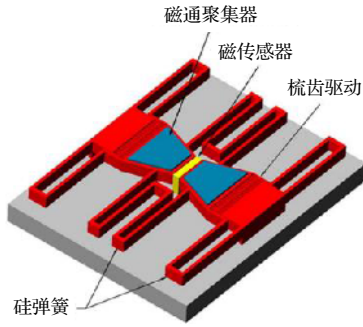


图 12 水平运动磁通聚集器原理图^[81]

Fig. 12. Schematic diagram of horizontal motion flux concentrator^[81].

然而, 使用 MEMS 弹簧片作为主动调制器的磁通聚集器的场调制效率只有 0.11%. 为了进一步提高调制效率, Guedes 等^[82] 提出了一种新型混合磁通聚集器, 利用带磁导的 MEMS 谐振器对外部直流磁场进行高频调制, 场调制效率可以达到 11%, 使得磁阻传感器的探测精度达到了皮特斯拉 (pT), 为磁阻传感器在生物探测领域的应用提供了可能性.

混合磁通聚集器虽然有较高的调制效率, 但是其结构复杂, 制造成本较高, 难以量产.

为了降低成本同时提高场调制效率, Hu 等^[83,84] 提出了一种基于悬臂梁结构的 MEMS 垂直运动磁通聚集器 (vertical motion flux modulation, VMFM). 将软磁材料作为磁通调制膜 (flux modulation film, FMF). 同时, 使用两个磁通聚集器在磁阻传感器两端形成两组磁通结构. 如图 13 所示, 通过改变磁通调制膜和两个磁通聚集器间隙的距离来改变磁通量, 当磁通调制膜远离间隙时, 空气间隙中磁通量变多, 磁场增强; 当磁通调制膜靠近间隙时, 磁通量减少, 磁场减弱. 保持磁通调制膜上下振动, 从而实现磁场的周期性变化, 达到降低传感器 $1/f$ 噪声的目的. VMFM 的场调制效率达到了 18.8%, 同时可将噪声水平降低至 $10 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ 左右. 然而 VMFM 需要高电压驱动悬臂梁振动, 会产生较大的功耗, 并且虽然 MEMS 悬臂梁的调制效率有所提高, 但仍有很大的提升空间.

2019 年, Du 等^[85,86] 基于垂直运动磁通聚集器的基础上提出了一种带振幅反馈的压电驱动磁通调制结构, 当交流电压作用于压电材料时, 调制膜会产生垂直方向的振动, 进而实现磁场调制. 同时, 这种结构具有两个检测电极, 可通过输出波形来判断调制膜是否接触到 TMR 传感器, 又可作为控制

膜振动稳定的反馈单元, 其场调制效率可以达到 68.7%. 这一突破将有助于推动磁通聚集器向实际应用方向发展, 同时也有望使 TMR 传感器实现 pT 级别的低频检测. 然而, 这种调制结构振动产生的最大幅值漂移会导致传感器输出不稳定, 为了提高调制结构的幅值稳定性, Du 等^[87] 提出一种基于被调制信号一、二次谐波分量幅值比的幅值控制方法. 这种方法通过调制信号的谐波分量来反映信号的幅值特性, 利用被调信号的一次和二次谐波分量建立幅值控制回路, 并且不需要独立的幅度转换电路, 具有结构简单、控制效率高、抗干扰能力强的优点, 能够显著抑制调制结构的幅值漂移和温度漂移, 对于提高 TMR 传感器的应用环境适应性具有重要意义. 同年, Liu 等^[88] 也提出了一种基于待测信号多次谐波预测压电悬臂梁顶端位移和谐振频率的新模型, 有限元仿真以及实验结果证实该模型顶端位移误差不超过 6%, 可为 TMR 传感器的磁通聚集器降噪设计提供重要参数验证.

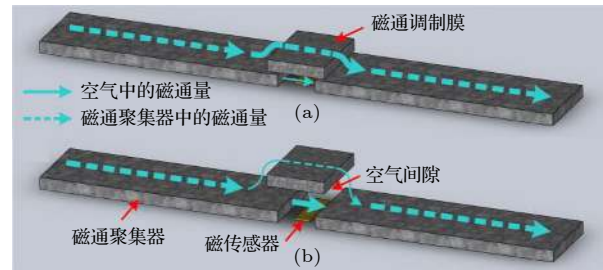


图 13 垂直运动磁通聚集器原理图^[83] (a) 磁通调制膜靠近间隙; (b) 远离间隙

Fig. 13. Schematic diagram of vertical motion flux concentrator^[83]: (a) The state of flux modulated film close to the air gap; (b) the state of flux modulated film far away from the air gap.

尽管基于压电共振的垂直磁通调制方法使调制效率得到了极大的提高, 但是由于机械振动产生的共振极大限制了磁场可调制的频率范围, 难以将频率调制到 $1/f$ 噪声最低的高频段 ($>10 \text{ kHz}$). 为了避免机械共振对调制频率的限制, Pan 等^[89] 提出了磁通电调制 (magnetic flux electric modulation, MFEM) 的新调制概念. 这种调制方法是通过改变磁通调制膜的磁导率 (μ_F) 来调制被测磁场, 以此使传感器周围的磁通量周期性改变. 这种模型可以通过铁电/铁磁 (ferroelectric/ferromagnetic, FE/FM) 多铁异质结构的电磁耦合实现磁通调制膜磁导率的改变. 如图 14(a) 所示, 该模型包括 TMR 传感

器、磁通集中器 (FC) 和由 FE 衬底和磁通调制膜组成的调制结构. 磁通集中器由传感器两侧的两个软磁薄膜组成, 用于增强 TMR 传感器的灵敏度. 磁通调制膜位于磁通集中器的上方, 间隔一个空气间隙. 不同于 MEMS 驱动器中制备的 VMFM 结构, 该模型中的磁通调制膜是在 FE 衬底中制备的人工 FE/FM 多铁异质结构. 由于电磁耦合, 当电场作用于 FE 衬底时, 将会调节磁通调制膜的磁导率. 在 FE/FM 多铁异质结构上加载驱动电压 V_{cc} , 在 FE 层中产生强各向异性应变并使其作用到 FM 中, 进而通过磁致伸缩效应影响 FM 层的磁导率. 在这种情况下, MFEM 结构空气间隙的磁通量 (Φ) 也会发生相应的变化, 如图 14(b) 中细箭头所示. 当 $V_{cc} = 0$ 时, 由于磁通调制膜的磁导率高, 磁通主要通过磁通调制膜, 而通过空气间隙的磁通较少; 而当 V_{cc} 增加到 V_i 时, 磁通调制膜的磁化率由于较大的应变耦合引起的磁各向异性而降低, 从而通过空气间隙的磁通量增大, 如图 14(c) 所示. 磁通调制膜的磁导率和通过气隙的磁通量将随着交流驱动电压 V_{cc} 发生周期性变化从而使传感器检测到交变磁场, 如图 14(d) 所示. 并且由于气隙中交变磁场信号的频率与驱动电压 V_{cc} 具有相同频率, 很容易通过锁相技术精确测量磁场信号并且可以不受振膜共振频率的影响将磁场信号调制到高频, 从而极大提高了 TMR 传感器的低频检测能力.

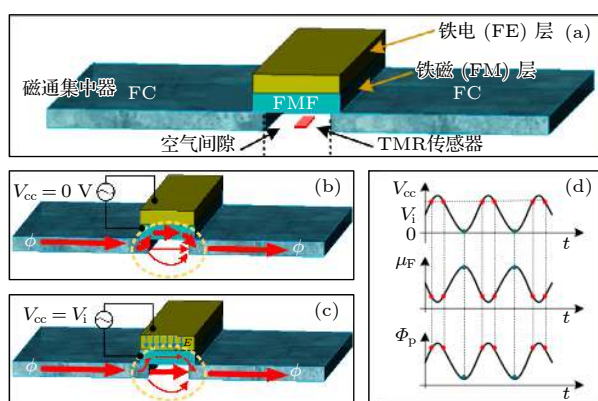


图 14 电调制磁通聚集器原理图^[89] (a) 电调制磁通聚集器结构图; (b) 电压为 0 时的磁通分布; (c) 电压为 V_i 时的磁通分布; (d) 磁通调制膜的磁导率和空气间隙中的磁通量随着电压发生周期性变化

Fig. 14. Schematic diagram of magnetic flux electric modulation^[89]: (a) Structure diagram of MFEM; (b) the magnetic flux distribution at voltage = 0; (c) the magnetic flux distribution at voltage = V_i ; (d) the permeability of the FxF and the magnetic flux in the air gap change periodically with the voltage.

在 2020 年, Che 等^[90] 通过在 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.7}O_3$ - $PbTi_{0.3}O_3$ 衬底上制备 FeGaB 薄膜得到 MFEM 结构, 并且把调制结构集成到 TMR 传感器中, 建立了 MFEM 结构调制效率测试系统. 这一系统将调制频率提高到了 10010 Hz, 证明了提高驱动电压幅值和减小铁电层厚度可以进一步提高调制效率.

4.2.4 抑制外接放大电路噪声

使用低噪放大器, 并且将干电池或蓄电池作为电源为放大器和传感器供电可以消除电源带来的谐波信号, 有效地抑制放大器和电源噪声. 更进一步, 同时使用两台放大器进行互相关测试也可以有效抑制放大器噪声. 如果需要探测微弱磁场, 需要尽可能减小外接连接长度. 在屏蔽室或者屏蔽筒内测试, 可以有效地抑制外界磁场环境对测试的影响.

需要强调的是, 目前对于一些噪声来源还存在不同的理论, 并且大部分抑制噪声的方法都会带来负面效果, 例如降低传感器灵敏度, 降低 TMR 值, 增大功耗等问题. 使用磁通聚集器是一种较为有效降低噪声的手段, 有望将噪声降低至 pT 量级, 但工艺难度和器件尺寸的增加限制了其进一步应用.

5 TMR 传感器的应用

近年来, TMR 传感器已经得到了广泛应用^[91]. 根据应用场景, 现有的 TMR 传感器可以分为以下几大类: 读取磁头^[92,93]、开关^[94–96]、矢量传感器^[97,98]、转速测量^[99,100]、无损检测^[101]、电流检测^[102]、微弱磁场探测^[15,103]和自旋-MEMS 传感器, 其中最重要的应用之一是硬盘驱动器中用于磁记录的读取磁头. TMR 读取磁头的应用是实现硬盘高面记录密度的重要里程碑. 除了读取磁头外, TMR 传感器还可以在空调等家用电器中作为开关传感器使用. 另一个实现大量商业生产是 TMR 矢量传感器, 特别是角度传感器和地磁传感器, 通过磁场强度间接检测位置、角度等物理参数, 广泛应用于导航定位等领域. 和矢量传感器类似, TMR 电流传感器也是通过磁场间接实现电流变化的检测. 同时由于 TMR 传感器可实现极低转速检测和远距离检测, 对应用环境的要求低, 常用于汽车中的转速检测和工业中的无损检测.

事实上, 基于磁阻效应的传感领域一直处于快速发展阶段, TMR 传感器的高操作性和高灵敏度为其开辟了许多新型应用, 例如, 与 MEMS 结合

用于麦克风, 与生物医学结合用于心、脑磁检测或人体动态捕捉等. 本节将重点围绕这两个 TMR 传感器的新型应用展开详细介绍.

5.1 自旋-MEMS 麦克风

目前现有的麦克风 (microphone, MIC) 种类主要包括电容式麦克风、压电式麦克风、巨压阻式麦克风、磁悬浮式麦克风、自旋-MEMS 麦克风^[104]. 其中, 市场占有率最大的麦克风种类是电容式麦克风, 这种 MIC 通过振膜振动, 实现电容充放电, 进而将声音信号转化为电信号. 电容式麦克风也分为驻极体麦克风 (electret condenser microphone, ECM MIC) 和微机电系统麦克风 (MEMS MIC), MEMS MIC 以体积小、产品稳定性高等优势, 被广泛应用于手机等电子产品中, 具有巨大的市场. 2017 年, 日本东芝公司发布了一种基于磁隧道结自旋应变传感器 (spintronic strain-gauge sensors, Spin-SGSs) 的 MEMS 麦克风^[105]. 这种麦克风将自旋材料和 MEMS 结构组合起来, 利用 TMR 传感器的高灵敏度, 极大地提高了传统 MEMS MIC 的信噪比.

这种新型自旋麦克风是用磁致伸缩材料作为磁隧道结的自由层, 并将 TMR 传感器用作应变传感器. 如图 15(a) 所示, 将磁隧道结制备在振膜上, 通过由声波产生的振膜形变, 令隧道结产生相应的拉伸或者压缩的形变, 导致自由层的磁化方向发生改变, 使隧道结的电阻发生变化, 从而将声音信号转化为电信号, 实现麦克风功能^[107]. 更进一步地, 由于外加固定方向的恒定磁场可以初始化自由层和钉扎层的磁化夹角, 通过改变外加磁场的大小, 可以实现应变系数的调制, 如图 15(b) 所示. 目

前东芝公司制备的 TMR 应变传感器具有极高的灵敏度, 其应变系数高达 5000^[106].

自旋材料和 MEMS 结构相结合可以显著提高传统 MEMS 传感器的灵敏度和探测精度, 同时这种结构也可以拓展应用到更多领域, 具有可观的商业价值和发展前景.

5.2 TMR 生物传感器

在智能医疗领域, TMR 传感器常用于可穿戴设备中, 监测残疾人士或老年人的活动状态, 例如电子皮肤、电子隐形眼镜等^[108]. 目前常用的追踪肢体活动状态的方法仍是基于摄像机或红外深度传感器的三维追踪, 但是这种追踪方式经常需要多台设备以确保连续观测, 并且需要计算机处理大量数据来建立模型分析. 结合微小的永磁体, 使用 TMR 传感器对固定磁场进行跟踪, 可在异常情况下立即得到反馈, 及时为需要的人提供协助. 2020 年, Tanwear 等^[109] 利用可穿戴技术通过 TMR 传感器跟踪人体眼球转动, 可以提高行动障碍者和身体障碍者的生活质量. 如图 16 所示, 在眼镜框架上集成 3 个 TMR 传感器, 用于检测传感器和嵌入隐形眼镜中的微小磁铁之间的相对运动. 采用灵敏度为 $11 \text{ mV}/(\text{V}\cdot\text{Oe})$ 的 TMR 传感器, 形成一个眼动追踪系统. 通过阈值分类器, 可以分辨出参与者向上、向右或向左看时的眼部动向.

得益于较强的微弱磁场探测能力, TMR 传感器可以应用于心脏磁场和脑磁场的检测^[110], 如图 17(a), (b) 所示. 将 TMR 传感器放置于图中体表几毫米处, 通过信号放大, 多次平均等数据处理, 可以得到与传统心、脑电图相近的结果. 但是由于

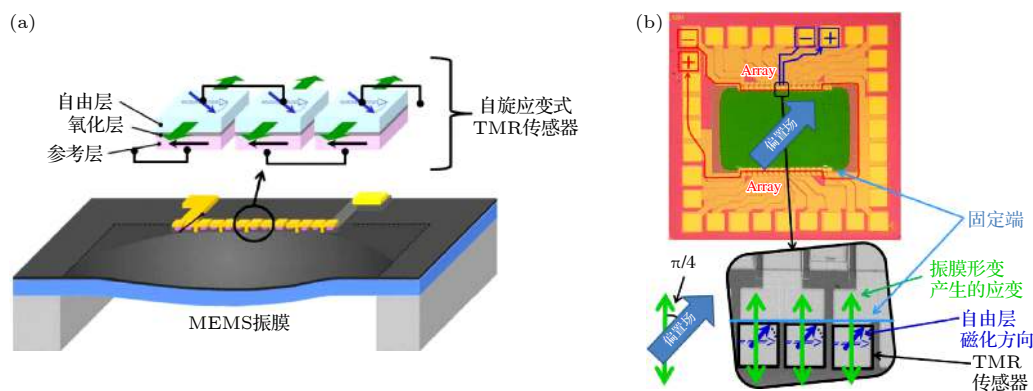


图 15 自旋-MEMS 麦克风^[106] (a) 原理图; (b) 版图结构

Fig. 15. Spin-MEMS microphone^[106]. (a) Schematic diagram; (b) physical structure.

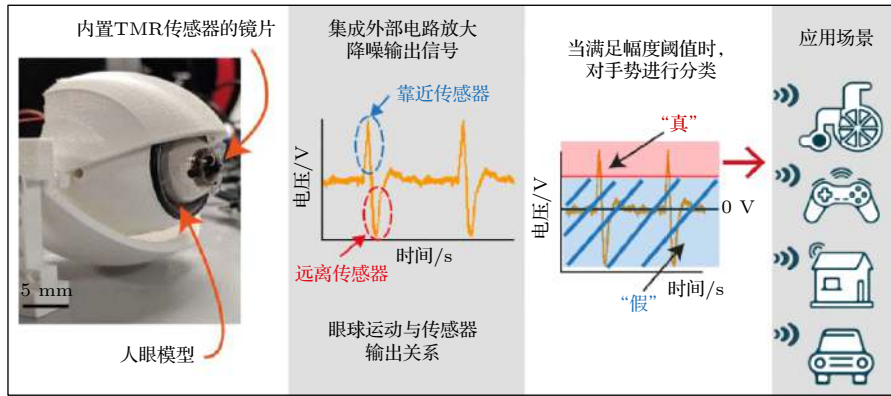


图 16 集成 TMR 传感器的可穿戴眼动仪工作原理^[109]

Fig. 16. Working principle diagram of wearable eye tracker integrated with TMR sensor^[109].

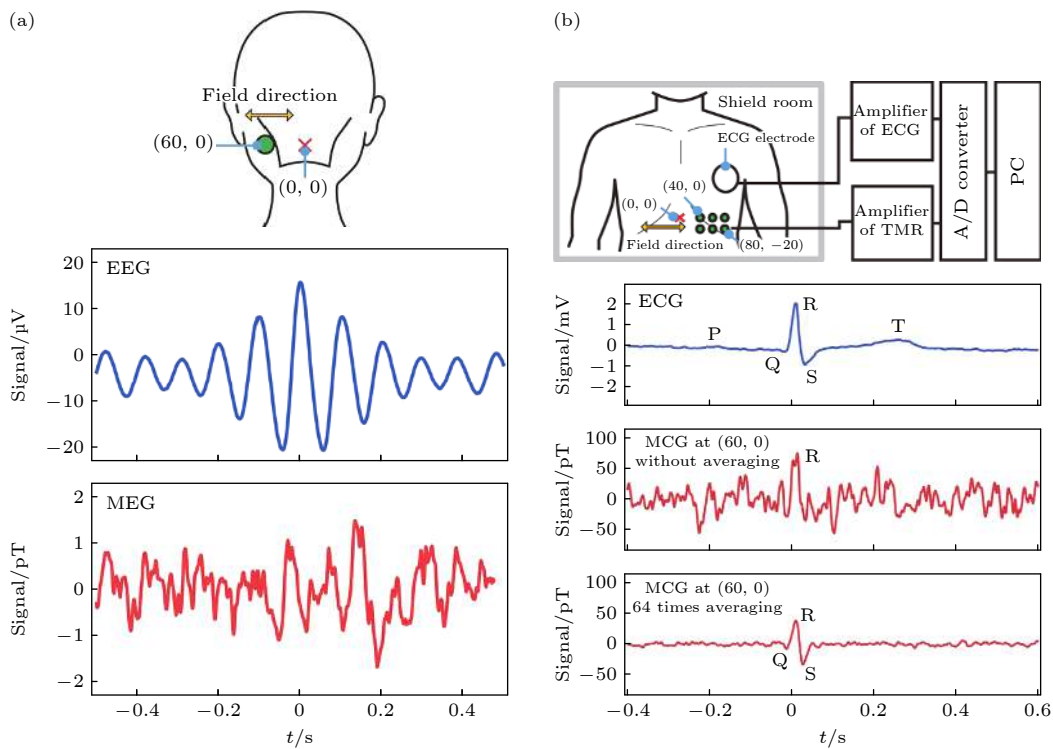


图 17 TMR 传感器在心磁图和脑磁图测试中的应用^[110] (a) 心磁场测试原理图; (b) 脑磁场测试原理图

Fig. 17. Application of TMR sensor in magnetocardiogram and magnetoencephalography testing^[110]: (a) Schematic diagram of magnetocardiogram testing; (b) schematic diagram of magnetoencephalography testing.

脑磁场非常微弱, 因此用同样方法测试到的脑磁图不太理想, 这需要对 TMR 传感器的探测精度进行更深的优化. 同时, 开发基于此的可穿戴设备用于患有心脏病或其他脑部疾病的病人身上, 借助物联网和云平台, 可及时将异常情况报告至相应的服务器以得到及时的医疗援助. 此外, 基于 TMR 传感器的 DNA 检测、细胞检测^[111-113] 等可集成于精准医疗设备中, 分布在医院、家庭或户外区域, 有利于这些设备完成医疗诊断, 记录到的医疗数据经分析评估以便提供即时医疗服务.

6 总结与展望

基于磁阻效应的磁传感器在解决下一代高精度传感问题上起着至关重要的作用, 相对于 AMR 和 GMR 传感器, TMR 传感器在灵敏度、尺寸、功耗等方面都具有明显优势. 如今, 通过膜层材料的进一步改善、集成磁通聚集器、合理的结构和电路设计优化, TMR 传感器的性能仍在不断提升. 本文首先对 TMR 传感器的发展历史进行介绍, 通过

对比不同原理磁传感器的性能指标, 表明了 TMR 传感器的性能优势. 接下来介绍了 TMR 传感器基本单元磁隧道结的结构, 并对实现传感器感应区域线性化的方法展开了详细的阐述. 为了提升传感器在不同温度环境下的稳定性, 通常使用惠斯通电桥结构以降低输出信号的温度漂移, 结合三维集成方法以满足空间磁场的探测需求. 探测精度是 TMR 传感器的重要性能指标, 决定了传感器对于微弱磁场探测的能力, 其主要受传感器灵敏度以及噪声影响. 本综述从理论出发, 总结了灵敏度和噪声的优化方法. 最后, 给出了 TMR 传感器在智能医疗以及自旋-MEMS 学科交叉领域的新型应用实例.

近年来, TMR 传感器依靠其巨大的性能优势取得了快速发展, 多家国内外电子企业都在研发和销售基于 TMR 效应的磁阻传感器, 例如美国的 NVE 科技, 日本的 TDK, 德国的英飞凌, 中国的多维科技等公司. 然而, 作为下一代磁阻传感器发展的重点, TMR 传感器仍存在许多亟需攻克的技术难点, 虽然其具有高灵敏度, 但远高于 AMR, GMR 传感器的低频噪声极大地影响了器件的信噪比, 限制了其探测微弱磁场的能力. 因此降低 TMR 传感器的输出噪声仍是研究热点之一. 与此同时, 实现高稳定性的惠斯通电桥结构和磁场三维检测, 仍需要对制备工艺进行一定优化, 以达到降低成本、提高检测精度的目的.

参考文献

- [1] Liu X, Lam K H, Zhu K, Zheng C, Li X, Du Y, Liu C, Pong P W T 2019 *IEEE Trans. Magn.* **55** 1
- [2] Mohsen A, Al-Mahdawi M, Fouda M M, Oogane M, Ando Y, Fadlullah Z M 2020 *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)* Dublin Ireland, 27 July 2020 pp1-6
- [3] Leroy P, Coillot C, Mosser V, Roux A, Chantaur G 2007 *Sens. Lett.* **5** 162
- [4] Thomson W 1857 *Proc. R. Soc. London* **8** 546
- [5] Baibich M N, Broto J M, Fert A, Van Dau F N, Petroff F, Etienne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
- [6] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, Zinn W 1989 *Phys. Rev. B* **39** 4828
- [7] Julliere M 1975 *Phys. Lett. A* **54** 225
- [8] Miyazaki T, Tezuka N 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **139** L231
- [9] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M, Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [10] Parkin S S, Kaiser C, Panchula A, Rice P M, Hughes B, Samant M, Yang S H 2004 *Nat. Mater.* **3** 862
- [11] Ikeda S, Hayakawa J, Ashizawa Y, Lee Y, Miura K, Hasegawa H, Tsumoda M, Matsukura F, Ohno H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 082508
- [12] Cao Z, Chen W, Lu S, Yan S, Zhang Y, Zhou Z, Yang Y, Li Z, Zhao W, Leng Q 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 122402
- [13] Chen W, Yan S, Yang Y, Cao Z, Lin Y, Zhou Z, Yan S, Leng Q 2021 *2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)* Chengdu China, 8-11 April 2021 pp1-3
- [14] Tumanski S 2016 *Handbook of Magnetic Measurements (CRC Press)* pp159-256
- [15] Su D, Wu K, Saha R, Peng C, Wang J P 2020 *Micromachines* **11** 34
- [16] Wang M, Wang Y, Peng L, Ye C 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 9610
- [17] Ichkitidze L, Bazaev N, Telyshev D, Preobrazhensky R, Gavrushina M 2015 *Biomed. Eng.* **48** 305
- [18] Markevicius V, Navikas D, Zilyys M, Andriukaitis D, Valinevicius A, Cepenas M 2016 *Sensors* **16** 78
- [19] Zhou X 2013 *2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings* Galveston TX USA, 19-21 February 2013 pp80-83
- [20] Rosado L S, Cardoso F A, Cardoso S, Ramos P M, Freitas P P, Piedade M S 2014 *Sens. Actuators, A* **212** 58
- [21] Sun X, Huang Q, Hou Y, Jiang L, Pong P W 2013 *IEEE Trans. Power Delivery* **28** 2145
- [22] Jin Z, Mohd Noor Sam M A I, Oogane M, Ando Y 2021 *Sensors* **21** 668
- [23] Wang C, Su W, Hu Z, Pu J, Guan M, Peng B, Li L, Ren W, Zhou Z, Jiang Z 2018 *IEEE Trans. Magn.* **54** 1
- [24] Diao Z, Zheng Y, Kaiser C, Jiang X, Chen L, Roy A, Chien C, Wang M, Gider S, Mauri D 2015 *2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)* Beijing China, 11-15 May 2015 p1
- [25] Liu X, Ren C, Xiao G 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 4722
- [26] Chaves R, Cardoso S, Ferreira R, Freitas P 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 07E506
- [27] Silva A V, Leitao D C, Valadeiro J, Amaral J, Freitas P P, Cardoso S 2015 *Eur. Phys. J. :Appl. Phys.* **72** 10601
- [28] Wiśniowski P, Almeida J, Cardoso S, Barradas N, Freitas P 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07A910
- [29] Van Driel J, De Boer F, Lenssen K M, Coehoorn R 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 975
- [30] van Dijken S, Coey J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 022504
- [31] Wei H, Qin Q, Wen Z, Han X, Zhang XG 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 172902
- [32] Nakano T, Oogane M, Furuichi T, Ando Y 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 012401
- [33] Yuan L, Liou SH, Wang D 2006 *Phys. Rev. B* **73** 134403
- [34] Reig C, Cardoso S, Mukhopadhyay S C 2013 *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation* (Springer) pp103-131
- [35] Cao J, Freitas P 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 09E712
- [36] Berthold I, Müller M, Klötzer S, Ebert R, Thomas S, Matthes P, Albrecht M, Exner H 2014 *Appl. Surf. Sci.* **302** 159
- [37] Franco F, Silva M, Cardoso S, Freitas P P 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 072401
- [38] Luong V, Jeng J, Lai B, Lu C 2015 *2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)* Beijing China, 11-15 May 2015 p1
- [39] Freitas P P, Ferreira R, Cardoso S 2016 *Proc. IEEE* **104** 1894
- [40] Yan S, Cao Z, Guo Z, Zheng Z, Cao A, Qi Y, Leng Q, Zhao W 2018 *Sensors* **18** 1832
- [41] Cao Z, Wei Y, Chen W, Yan S, Lin L, Li Z, Wang L, Yang H, Leng Q, Zhao W 2021 *Sci. China: Inf. Sci.* **64** 1
- [42] Luong V S, Jeng J T, Lai B L, Hsu J H, Chang C R, Lu C

- C 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 4004504
- [43] Lu C C, Huang J 2015 *Sensors* **15** 14727
- [44] Cerro G, Ferrigno L, Laracca M, Milano F, Bellitti P, Serpelloni M, Piedrafita O C 2020 *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* Dubrovnik Croatia, 25–28 May 2020 pp1–6
- [45] Deak Z J 2015 *Association for Sensors and Measurement (AMA) Conferences* Nürnberg Germany, 19–21 May 2015 pp245–250
- [46] Chiang C Y, Jeng J T, Lai B L, Luong V S, Lu C C 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 17A321
- [47] Su Y H, Lu C C, Jeng J T, Hsu J H, Liao M H, Wu J C, Lai M H, Chang C R 2017 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **17** 11
- [48] Yan S, Zhou Z, Cao Z, Yang Y, Li Z, Chen W, Leng Q, Zhao W 2021 *2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)* Chengdu China, 8–11 April 2021 pp1–3
- [49] Li R, Zhang S, Luo S, Guo Z, Xu Y, Ouyang J, Song M, Zou Q, Xi L, Yang X 2021 *Nat. Electron.* **4** 179
- [50] TDK 2020 *TDK Product Catalog* [EB/OL]
- [51] Lee Y, Hayakawa J, Ikeda S, Matsukura F, Ohno H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 212507
- [52] Almeida J, Freitas P 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 07E722
- [53] Orgassa D, Fujiwara H, Schulthess T, Butler W 1999 *Phys. Rev. B* **60** 13237
- [54] Tezuka N, Ikeda N, Mitsuhashi F, Sugimoto S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 162504
- [55] Fujiwara K, Oogane M, Yokota S, Nishikawa T, Naganuma H, Ando Y 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 07C710
- [56] Lei Z, Li G, Egelhoff W F, Lai P, Pong P W 2011 *IEEE Trans. Magn.* **47** 602
- [57] Nyquist H 1928 *Phys. Rev.* **32** 110
- [58] Johnson J B 1928 *Phys. Rev.* **32** 97
- [59] Ingvarsson S, Xiao G, Parkin S, Gallagher W, Grinstein G, Koch R 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3289
- [60] Smith N, Arnett P 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1448
- [61] Egelhoff Jr W, Pong P, Unguris J, McMichael R, Nowak E, Edelstein A, Burnette J, Fischer G 2009 *Sens. Actuators, A* **155** 217
- [62] Freitas P, Ferreira R, Cardoso S, Cardoso F 2007 *J. Phys.: Condens. Matter* **19** 165221
- [63] Nowak E, Weissman M, Parkin S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 600
- [64] Almeida J, Wisniowski P, Freitas P 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 2569
- [65] Liou S H, Zhang R, Russek S E, Yuan L, Halloran S T, Pappas D P 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07E920
- [66] Kandiah K, Whiting F 1978 *Solid-State Electron.* **21** 1079
- [67] Xi H, Loven J, Netzer R, Guzman J I, Franzen S, Mao S 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 2024
- [68] Polovy H, Guerrero R, Scola J, Pannetier-Lecoœur M, Fermon C, Feng G, Fahy K, Cardoso S, Almeida J, Freitas P 2010 *J. Magn. Magn. Mater.* **322** 1624
- [69] Torrejon J, Solignac A, Chopin C, Moulin J, Doll A, Paul E, Fermon C, Pannetier-Lecoœur M 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 034031
- [70] Garzon S, Chen Y, Webb R A 2007 *Physica E (Amsterdam, Neth.)* **40** 133
- [71] Fermon C, Pannetier-Lecoœur M 2013 *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors* (Springer) pp47–70
- [72] Wisniowski P, Almeida J M, Freitas P P 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 2551
- [73] Deak J G, Zhou Z, Shen W 2017 *AIP Adv.* **7** 056676
- [74] Moulin J, Doll A, Paul E, Pannetier-Lecoœur M, Fermon C, Sergeeva-Chollet N, Solignac A 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 122406
- [75] Huang L, Yuan Z, Tao B, Wan C, Guo P, Zhang Q, Yin L, Feng J, Nakano T, Naganuma H 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 113903
- [76] Cui Y, Khodadadi B, Schäfer S, Mewes T, Lu J, Wolf S A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 162403
- [77] Valadeiro J P, Amaral J, Leitao D C, Ferreira R, Cardoso S F, Freitas P J 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 4400204
- [78] Tondra M, Daughton J M, Wang D, Beech R S, Fink A, Taylor J A 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 6688
- [79] Guerrero R, Pannetier-Lecoœur M, Fermon C, Cardoso S, Ferreira R, Freitas P 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 113922
- [80] Edelstein A S, Fischer G A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 7795
- [81] Edelstein A, Fischer G, Pedersen M, Nowak E, Cheng S F, Nordman C 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08B317
- [82] Guedes A, Jaramillo G, Buffa C, Vigevani G, Cardoso S, Leitao D, Freitas P, Horsley D 2012 *IEEE Trans. Magn.* **48** 4115
- [83] Hu J, Pan M, Tian W, Chen D, Zhao J, Luo F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 244102
- [84] Hu J, Pan M, Tian W, Chen D, Zhao J 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 055009
- [85] Du Q, Hu J, Sun K, Chen D, Pan L, Che Y, Zhang X, Li P, Zhang B, Peng J 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 1824
- [86] Hu J, Du Q, Pan M, Li P, Sun K, Wang W, Zhang J, Peng J, Qiu W, Chen D 2020 *2020 IEEE Sensors Rotterdam Netherlands, October 25–28, 2020* pp1–4
- [87] Zhang J, Pan M, Du Q, Hu J, Sun K, Yu Y, Zhang X, Luo H 2021 *Micromachines* **12** 722
- [88] Liu Z, Chen J, Zou X 2021 *Sensors* **21** 87
- [89] Pan L, Pan M, Hu J, Hu Y, Che Y, Yu Y, Wang N, Qiu W, Li P, Peng J 2020 *Sensors* **20** 1440
- [90] Che Y, Hu J, Pan L, Li P, Pan M, Chen D, Sun K, Zhang X, Du Q, Yu Y 2020 *AIP Adv.* **10** 105032
- [91] Zheng C, Zhu K, De Freitas S C, Chang J Y, Davies J E, Eames P, Freitas P P, Kazakova O, Kim C, Leung C W 2019 *IEEE Trans. Magn.* **55** 0800130
- [92] Song D, Nowak J, Larson R, Kolbo P, Chellew R 2000 *IEEE Trans. Magn.* **36** 2545
- [93] Vopsaroiu M, Blackburn J, Cain M G 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 5027
- [94] Hayakawa J, Ikeda S, Lee Y M, Sasaki R, Meguro T, Matsukura F, Takahashi H, Ohno H 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** L1267
- [95] Diao Z, Apalkov D, Pakala M, Ding Y, Panchula A, Huai Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 232502
- [96] Aurelio D, Torres L, Finocchio G 2009 *J. Magn. Magn. Mater.* **321** 3913
- [97] Jeng J T, Lu C C, Hsu H Y 2017 *Measurement* **109** 297
- [98] Deak J, Jin I 2019 *IEEE Trans. Magn.* **55** 6700104
- [99] Hainz S, de la Torre E, Guettinger J 2021 *AmE 2021-Automotive Meets Electronics; 12th GMM-Symposium* online, March 10–11, 2021 pp1–4
- [100] Rohrmann K, Sandner M, Meier P, Prochaska M 2018 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* Houston TX USA, May 14–17, 2018 pp1–6
- [101] Guo D, Cardoso F, Ferreira R, Paz E, Cardoso S, Freitas P 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 17E513
- [102] Lawrence D, Donnal J S, Leeb S 2016 *IEEE Sens. J.* **16** 6095
- [103] Simmons L P, Welsh J S 2013 *5th International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation Seoul Korea (South), September 24–25, 2013* pp69–74
- [104] Sedaghat S B, Ganji B A 2019 *Microsyst. Technol.* **25** 217
- [105] Fuji Y, Hara M, Higashi Y, Kaji S, Masunishi K, Nagata T,

- Yuzawa A, Otsu K, Okamoto K, Baba S 2017 *19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS) Kaohsiung Taiwan, June 18–22, 2017* pp63–66
- [106] Higashi Y, Fuji Y, Kaji S, Masunishi K, Nagata T, Yuzawa A, Otsu K, Okamoto K, Baba S, Ono T 2018 *IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Belfast UK, January 21–25, 2018* pp1060–1063
- [107] Fuji Y, Higashi Y, Kaji S, Masunishi K, Yuzawa A, Nagata T, Okamoto K, Baba S, Ono T, Hara M 2018 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) San Francisco CA USA, December 1–5, 2018* pp4.2.1–4.2.4
- [108] Bermúdez G S C, Fuchs H, Bischoff L, Fassbender J R, Makarov D 2018 *Nat. Electron.* **1** 589
- [109] Tanwear A, Liang X, Liu Y, Vuckovic A, Ghannam R, Böhnert T, Paz E, Freitas P P, Ferreira R, Heidari H 2020 *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* **14** 1299
- [110] Fujiwara K, Oogane M, Kammo A, Imada M, Jono J, Terauchi T, Okuno T, Aritomi Y, Morikawa M, Tsuchida M 2018 *Appl. Phys. Express* **11** 023001
- [111] Hajba L, Guttman A 2016 *Biotechnol. Adv.* **34** 354
- [112] Liu W J, Ou S L, Chang Y H, Chen Y T, Liang Y C, Chang C Y, Chu C L, Wu T H 2021 *Surf. Eng.* **37** 429
- [113] Kim K, Hall D A, Yao C, Lee J R, Ooi C C, Bechstein D J, Guo Y, Wang S X 2018 *Sci. Rep.* **8** 1

REVIEW

Research progress of tunneling magnetoresistance sensor^{*}

Zhou Zi-Tong¹⁾²⁾ Yan Shao-Hua¹⁾²⁾ Zhao Wei-Sheng^{1)†} Leng Qun-Wen^{2)‡}

¹⁾ (School of Integrated Circuit Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

²⁾ (Institute of Beihang-Goertek Microelectronics, Qingdao Research Institute, Beihang University, Qingdao 266000, China)

(Received 11 October 2021; revised manuscript received 15 November 2021)

Abstract

Sensors play an important role in Internet of Things (IoT) industry and account for a rapidly growing market share. Among them, the magnetic sensor based on tunneling magnetoresistance (TMR) effect possesses great potential applications in the fields of biomedical, navigation, positioning, current detection, and non-destructive testing due to its extremely high sensitivity, small device size and low power consumption. In this paper, we focus on the development of TMR sensor technology routes, covering a series of research advances from a sensor transducer to three-dimensional magnetic field detection, and then to the applications. Firstly, we recall the development history of TMR sensors, explain its working principle, and discuss the method to improve the output linearity of single magnetic tunnel junction. Next, we state the Wheatstone-bridge structure, which can inhibit temperature drift in detail and review several methods of fabricating the full bridge of TMR sensors. Furthermore, for the market demand of three-dimensional magnetic field detection, we summarize the methods of designing and fabricating three-dimensional sensing structure of the TMR sensor. At the same time, we list several optimization schemes of TMR sensor performance in terms of sensitivity and noise level. Finally, we discuss two types of emerging applications of TMR sensors in recent years. The TMR sensors can also be used in intelligence healthcare due to their ultra-high sensitivity. In addition, devices from the combination of spin materials and MEMS structure have attracted wide attention, especially, because of the large commercial market of microphones, spin-MEMS microphones utilized TMR techniques will be the next research hotspot in this interdisciplinary field.

Keywords: tunneling magnetoresistance sensors, linearization methods, sensor noise, intelligent applications

PACS: 85.75.Ss, 73.43.Qt, 75.47.Gk, 85.70.–w

DOI: 10.7498/aps.71.20211883

* Project supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province, China (Grant No. 2021CXGC010109), the Beijing Municipal Science and Technology Project, China (Grant No. Z201100004220002), and the International Collaboration Project, China (Grnat No. B16001).

† Corresponding author. E-mail: weisheng.zhao@buaa.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: lengqw@bhqdti.com