

专题: 应用磁学

隧道磁阻传感器性能优化研究进展*

刘远溱¹⁾ 雷绍钰¹⁾ 张诗怡¹⁾ 潘孟春¹⁾²⁾ 胡悦国¹⁾²⁾ 胡佳飞¹⁾²⁾
彭俊平¹⁾²⁾ 杜青法¹⁾²⁾ 张琦¹⁾²⁾ 李裴森^{1)2)†}

1) (国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

2) (国防科技大学, 装备状态感知与敏捷保障国家重点实验室, 长沙 410073)

(2025 年 11 月 24 日收到; 2025 年 12 月 24 日收到修改稿)

隧道磁阻 (tunneling magnetoresistance, TMR) 传感器作为新一代高性能磁传感技术的代表, 凭借其高灵敏度、低功耗、宽频响及优异的集成性, 在工业自动化、新能源汽车、生物医疗和智能电网等领域展现出广泛应用前景. 本文系统地综述了 TMR 磁传感器的性能优化策略, 重点从薄膜材料体系与敏感结构设计两个维度展开分析. 在材料体系方面, 详细地探讨了高灵敏 TMR 材料体系和宽量程 TMR 材料体系的发展现状与优化思路; 在结构设计方面, 系统地阐述了磁性隧道结几何形状优化、磁轭结构设计、磁通聚集器集成及噪声调制技术等创新方案. 本文还总结了 TMR 传感器在生物医疗和智能电网等前沿领域的应用进展, 并对未来发展方向进行展望: 开发更高灵敏度与更宽量程的 TMR 材料体系、实现一体化高性能三轴 TMR 磁传感、探索 TMR 与人工智能的深度融合等. 本文为 TMR 磁传感器的性能突破与应用拓展提供了系统性参考, 对推动其在高精度磁场探测领域的深入应用具有重要指导意义.

关键词: 隧道磁阻磁传感器, 性能优化, 薄膜材料, 磁性隧道结结构设计**DOI:** 10.7498/aps.75.20251597**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251597

1 引言

随着物联网 (internet of things, IoT)、人工智能 (artificial intelligence, AI) 以及新能源汽车、具身智能等新兴技术的蓬勃发展, 传感器作为信息感知的“神经末梢”, 正迎来前所未有的发展机遇. 近几年, 在工业自动化、智能制造、新能源汽车等战略性新兴产业推动下, 磁传感器因其非接触测量、高可靠性以及优异的复杂环境适应能力, 已成为智能感知层的核心器件之一, 全球市场规模持续扩大. 当前, 芯片级磁传感器市场主要由霍尔 (Hall) 传感器和磁阻传感器主导^[1]. 其中, 霍尔传感器因体积小、成本低、制造工艺成熟等优势, 占据市场

主要份额, 但随着智能电网、新能源汽车、机器人技术发展, 现有霍尔传感器的灵敏度、频响性能越发不能满足新技术及时、安全、可靠的需求. 相比之下, 磁阻传感器由于具有高灵敏度、低功耗及宽频响等优势, 日益受到学术界与工业界的广泛关注. 磁阻传感器主要分为各向异性磁阻 (anisotropic magnetoresistance, AMR) 传感器、巨磁阻 (giant magnetoresistance, GMR) 传感器和隧道磁阻 (tunneling magnetoresistance, TMR) 传感器. 表 1 总结了上述磁传感器的关键性能指标, 可以看出, TMR 传感器相比于 AMR 传感器和 GMR 传感器等, 具有更显著的高灵敏、低功耗和小型化优势, 成为当前磁阻传感器的研究重点, 也成为了目前行业发展高性能小型化磁传感的重要技术途径^[1,2].

* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFB2407700) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lips13@163.com

表 1 典型小型化磁传感器性能对比
Table 1. Typical performance comparison of magnetic sensors.

性能	霍尔	MR		
		AMR	GMR	TMR
最大磁阻率/%	/	2	24	631
磁场灵敏度/(%·Oe ⁻¹)	1	~1	~3	~100
分辨力/(nT·Hz ^{-1/2})	130	~1	~10	~0.01
功耗/mW	35	~29	~110	~0.07
芯片尺寸	较大	中等	中等	较小
频响范围	DC—100 kHz	DC—1 MHz	DC—1 MHz	DC—数MHz

TMR 磁传感器是基于隧道磁阻效应的新一代自旋电子器件,其物理本质源于电子在纳米尺度绝缘势垒层中展现出的与自旋相关的量子隧穿行为。TMR 效应由法国学者 Julliere^[3] 于 1975 年首次在 Fe/Ge-O/Co 多层膜中发现,因其高可靠性和高灵敏度最早在硬盘读出磁头中实现广泛应用。2014 年,TDK 推出全球首款面向传感器应用的 TMR 芯片,标志着该技术从存储领域拓展至电流、位置等传感应用场景。凭借高灵敏度、低功耗、小型化和优异的稳定性,近年来 TMR 传感器迅速在汽车、工业和新能源领域获得认可,迎来了蓬勃的技术发展。然而,面对生物磁探测、太空磁场测量、高精度工业自动化控制及智能电网监测等新兴应用需求,现有 TMR 传感器在灵敏度提升、低频噪声抑制、分辨力突破、线性量程扩展等方面仍面临严峻挑战^[4-6]。为突破这些瓶颈,当前研究正聚焦于两个关键环节的协同创新:一方面,通过优化薄膜材料体系优化灵敏度、噪声和量程等性能指标;另一方面,通过磁性隧道结 (magnetic tunneling junction, MTJ) 敏感结构的创新设计以实现性能的进一步突破。本文从上述两个关键环节着手,在介绍 TMR 磁传感器基础结构演化和性能指标评价体系的基础上,总结薄膜材料体系的优化策略及通过 MTJ 结构设计以提升传感器性能的途径。最后,对 TMR 磁传感器的应用前景与发展挑战进行介绍与展望。

2 基本物理结构

TMR 传感器的核心结构通常由“铁磁层/绝缘势垒层/铁磁层”构成,如图 1 所示,呈三明治式堆叠。其中一层铁磁层的磁化方向被钉扎 (即参考层),另一层为可随外磁场自由翻转的自由层。根

据 TMR 效应,当两个铁磁层的磁化方向平行时,一层的多数自旋电子能够隧穿至另一层的多数自旋空态,同时少数自旋电子也对应隧穿至另一层的少数自旋空态,整体隧穿概率高,表现为较低的电阻状态 R_P ;而当磁化方向反平行时,一层的多数自旋电子隧穿至另一层的少数自旋空态,导致电阻显著升高,表现为较高电阻态 R_{AP} 。用于量化这种电阻变化程度的参数被称为隧道磁阻比率 (TMR 值),定义为

$$TMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \times 100\%. \quad (1)$$

TMR 传感器的基本功能单元是 MTJ,其基本结构包括:缓冲层、反铁磁层、参考层、势垒层、自由层和盖帽层。其中,缓冲层处于薄膜的底部,以便诱导关键膜层的结构取向,提高薄膜 TMR 值,同时通过增加厚度,降低 MTJ 的走线电阻以提高 TMR 值,常用的缓冲层材料为多层 Ru/Ta 复合结构。反铁磁层的主要作用是通过高温磁退火,利用铁磁层与反铁磁层之间强的交换偏置相互作用,将参考层磁矩固定在一个方向,使 MTJ 成为一个单轴磁传感器。参考层是由一个非磁间隔层和反平行耦合的上下两层铁磁层构成的人工合成反铁磁结构组成。这种结构的参考层可以有效地降低杂散场对自由层的影响,同时使 MTJ 具有优秀的稳定性。自由层用于敏感外部磁场变化,其磁矩方向在外加磁场作用下发生可控旋转,从而改变与参考层之间的相对取向角度,最终通过隧穿磁阻效应将磁场信息转换为可测量的电阻变化信号。在早期研究中,MTJ 普遍采用仅固定参考层磁矩的“单钉扎”体系^[7,8],其工艺简单但自由层在磁场响应过程中易产生磁滞效应,导致输出信号非线性。为克服上述局限,研究人员开发了“双钉扎”体系,通过在自由层和参考层分别引入不同阻挡温度 (blocking

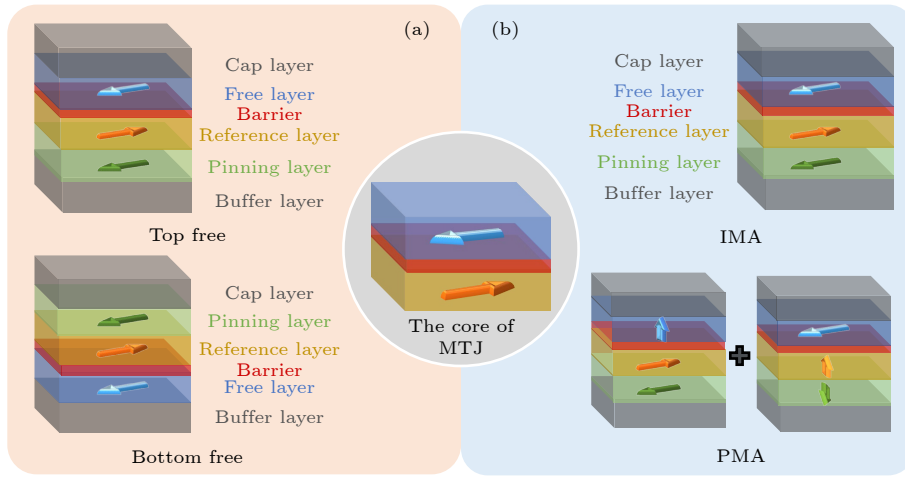


图 1 MTJ 基本结构及分类示意图 (a) 根据自由层位置分类; (b) 根据各向异性方向分类

Fig. 1. Diagram of the basic structure and classification of MTJ: (a) Classification based on the position of the free layer; (b) classification based on anisotropic directions.

temperature) 的反铁磁层^[9,10], 使两层磁性材料在特定退火工艺下获得可控的钉扎强度和方向, 有效地平衡了自由层的各向异性与热稳定性. 随着日益复杂化、多样化的应用场景对 TMR 磁传感器提出的性能要求越来越苛刻, TMR 薄膜材料结构也越来越复杂.

根据自由层的位置不同, MTJ 可分为“底自由”和“顶自由”两种基本构型, 如图 1(a) 所示. 前者自由层位于整个材料体系的底部, 有利于实现高质量的底部界面结晶, 同时便于通过结构尺寸优化磁矩的一致性翻转并有效地抑制噪声^[11], 在传感器应用中展现出优异的稳定性, 但对钉扎结构的生长提出了新的挑战; 后者自由层则位于材料体系顶部, 薄膜生长工艺成熟度高, 且便于通过图形化工艺精确调控其形状各向异性, 和集成磁通聚集器 (magnetic flux concentrators, MFC), 从而显著地增强对外部磁场的响应能力, 是目前主流的 TMR 磁传感技术方案. 此外, 依据磁各向异性的方向, MTJ 又可分为面内各向异性 (in-plane magnetic anisotropy, IMA) 和垂直各向异性 (perpendicular magnetic anisotropy, PMA) 两类^[12], 如图 1(b) 所示: IMA-MTJ 主要依靠器件长宽比产生的形状各向异性稳定磁化方向, 兼具高 TMR 值和低噪声特性, 广泛应用于高灵敏磁场传感器; 而 PMA-MTJ 则通过特定材料体系 (如 $L1_0$ 相 FePt, CoPt 合金) 或强界面效应 (如 CoFeB/MgO 界面) 诱导磁化方向垂直于膜面, 能够实现更宽的线性磁场范围和更低的非线性度, 同时具有更优的尺寸缩放能力和热

稳定性, 使其特别适用于高温稳定性、宽量程的磁传感器. 这两大类构型及其变体构成了现代 TMR 器件的基础, 其性能可通过材料选择、后处理工艺和结构设计等方式进行精细调控, 以满足不同应用场景的需求.

3 性能优化

3.1 性能指标

TMR 磁传感器的性能由多维度指标共同衡量, 各指标的物理定义、形成机制与优化路径需结合 MTJ 的磁敏机理、材料特性及制备工艺等方面综合分析^[13-15]. 图 2 所示是 TMR 磁传感器的磁阻响应曲线及噪声频谱密度曲线, 曲线中反映了 TMR 磁传感器的一些性能指标, 具体包括以下方面.

1) 量程: 指 TMR 磁传感器能够感受并准确测量的外磁场变化范围, 理想的 TMR 量程为对应 MTJ 单元达到平行态和反平行态的磁场强度差值. 根据 MTJ 的自由能分析, 自由层的等效各向异性场 H_k 是决定量程的关键, H_k 越大, 自由层磁矩克服各向异性实现翻转所需的外磁场越强, 量程越宽. 因此, 优化量程通常围绕各向异性场调控展开.

2) 灵敏度: 灵敏度是衡量传感器对外部磁场响应能力的核心参数, 通常定义为量程线性区间内单位磁场变化引起的电阻相对变化率, 其物理本质是自由层磁矩在外磁场作用下的可逆转动程度与隧穿磁阻效应的综合体现. 从机理上看, MTJ 阻值大小随自由层与参考层磁矩夹角变化, 当外磁场驱

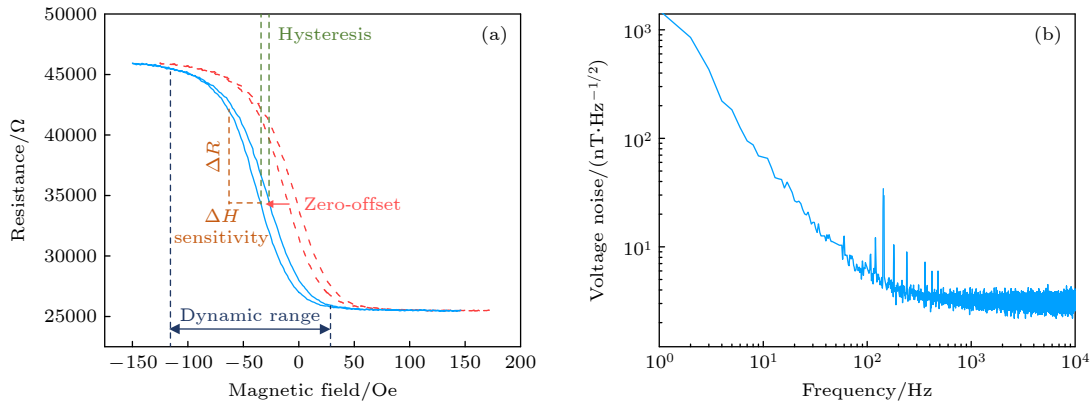


图 2 性能指标示意图 (a) 磁阻响应曲线; (b) 噪声频谱密度曲线

Fig. 2. Schematic diagram of performance indicators: (a) Magnetoresistance response curve; (b) Noise spectral density curve.

动自由层磁矩转动时, 磁矩夹角改变导致隧穿电阻变化, 而 TMR 值越高、等效各向异性场越小, 单位磁场引发的电阻变化越显著, 灵敏度越高. 在优化手段上, 高 TMR 值的材料体系和优化的磁各向异性设计可显著地提升灵敏度. 此外, 引入磁通聚集器或采用多结串联等结构设计亦能有效增强灵敏度. 然而, 灵敏度的提升需与量程、磁滞等指标进行权衡, 过高的灵敏度可能导致饱和场过小, 限制动态测量范围.

3) 磁滞: 磁滞表现为磁场增强与减弱过程中磁阻响应曲线的不重合程度, 使用矫顽力指标来衡量 MTJ 的磁滞水平. 磁滞主要源于自由层磁化过程的不可逆性, 包括材料内部的畴壁钉扎位、各向异性不均导致的磁畴分裂以及参考层与自由层之间的奈尔耦合等不可逆磁化过程. 磁滞的存在会引入测量误差, 尤其在弱场和交变磁场检测中严重影响精度. 抑制磁滞需从磁化可逆性入手, 如优化材料软磁性能、引入交换偏置场稳定磁矩取向及增强内部单轴各向异性等.

4) 零偏: 零偏指磁敏感体响应曲线的线性区间偏离零磁场的程度, 定义为量程范围内的磁场中值点. 对于单个 MTJ 单元, 零偏主要源于内部单向各向异性场的不对称, 包括参考层与自由层间的奈尔耦合场及二次退火后反铁磁层对自由层的交换偏置场方向偏差影响等. 此外, 传感器组成电桥结构时四个桥臂 MTJ 的不一致性也会进一步加剧零偏指标的恶化, 导致零场附近灵敏度衰减, 影响弱场测量精度. 因此, 零偏指标的性能优化可以从补偿 MTJ 内部偏置场和提升电桥结构中器件的一致性等方面着手.

5) 噪声: 噪声指传感器输出信号中与被测物理量无关的随机信号, 是限制传感器探测精度极限的关键因素. 作为一种隧穿电子器件, MTJ 的噪声不仅包括电子器件因材料缺陷、热扰动导致的电噪声, 还包括因磁矩的热波动引起的磁相关噪声. 通常根据频域的特征将 TMR 本底噪声分为不随频率变化的白噪声和频率相关的 $1/f$ 噪声.

6) 分辨力: 分辨力作为反映传感器最小可探测磁场变化的综合指标, 理论定义为

$$D = \frac{\sqrt{S_V}}{SV}, \quad (2)$$

式中, $\sqrt{S_V}$ 为噪声的电压谱密度, S 为灵敏度, V 为工作电压. D 单位通常为 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 其性能上限不仅取决于灵敏度与噪声的协同优化, 还受磁滞、零偏等非线性因素的间接影响: 磁滞过大会导致磁场升降过程中输出不一致, 零偏偏移会削弱弱场附近的有效灵敏度, 二者均会降低实际分辨能力. 因此, 分辨力体现了 TMR 传感器的综合性能, 是衡量 TMR 传感器水平的关键指标, 在性能优化时需要协同考虑多方面因素.

表 2 总结了各研究团队所研制 TMR 传感器的核心性能指标^[16-22]. 除了上述核心指标外, 频响和热稳定性也是衡量 TMR 磁传感器综合性能的重要指标. 频响表征 TMR 传感器对交变磁场的响应能力, 其上限主要受限于 MTJ 自身材料的铁磁共振频率以及读出电路中寄生电容与电感形成的分布参数^[23], 这些因素共同决定了传感器的高频截止点. 优化频响需从材料与结构两方面着手, 例如采用高各向异性场材料以提升本征共振频率, 或通过微缩结区尺寸、优化电极布局来减小寄生效应.

表 2 各研究团队 TMR 传感器性能指标对比
Table 2. Comparison of TMR sensor performance indicators among various research teams.

研究团队	量程/Oe	灵敏度/(mV·V ⁻¹ ·Oe ⁻¹)	磁滞/Oe	噪声/(nV·Hz ^{-1/2})	分辨力/(pT·Hz ^{-1/2})
日本东北大学 ^[16]	/	1150	1	/	0.94(@1 Hz)
美国布朗大学 ^[17]	±20	28	~0	/	/
葡萄牙INESC MN ^[18]	/	1860	/	6.24(@10 Hz)	49(@10 Hz)
北京航空航天大学 ^[19]	100	1.57	/	/	29.3×10 ³ (@10 Hz)
中国科学院大学 ^[20]	/	22.29	/	6.3	300(@1 kHz)
中国科学院物理研究所 ^[21]	50	10.7	/	/	10×10 ³ (@1 Hz)
国防科技大学	±15	16.38	0.006	121.97	740
西安交通大学 ^[22]	±20	6	~0	/	/

热稳定性则反映了传感器性能参数随环境温度变化的保持能力,其根源在于构成隧道结的铁磁层与势垒层材料具有与温度相关的本征磁特性,如饱和磁化强度、各向异性常数等,同时界面原子扩散、热应力等因素也会在温度循环中引发不可逆的漂移.提升热稳定性的策略包括选用温度系数更优的磁性材料体系,以及在电路层面引入温度补偿机制,从而在宽温域内维持传感器性能的稳定.

3.2 薄膜材料体系优化

3.2.1 高灵敏 TMR 材料体系

高灵敏 TMR 材料体系的发展始于微弱磁场探测需求,其发展脉络主要体现在两大方向的优化,如图 3 所示:一是针对势垒层的优化,旨在提高隧穿磁阻变化率,从而提升器件灵敏度;二是针对自由层的优化,致力于实现快速、低损耗的磁场响应,并有效抑制线性工作区内的器件噪声.

1) 势垒层材料优化

针对势垒层的优化,主要是为了提升自旋相关的电子隧穿概率,实现量级上的 TMR 值突破,从而获得超高灵敏度.1975 年,Juliere^[3]首次在低温 Fe/GeO/Co 结中观测到 TMR 效应,但受限于当时技术条件,该现象长期未能复现.直到 1990 年代末,室温 TMR 才在非晶 Al-O 基磁隧道结中被重新发现,引发广泛关注^[24,25].然而,尽管工艺不断优化,非晶 Al-O 体系的室温 TMR 值始终徘徊在 80% 左右,难以满足高灵敏传感需求.

2001 年,Butler 等^[26]通过第一性原理计算预言,在 (001) 取向 MgO 势垒的磁隧道结中,TMR 值可超 1000%.这一结果大大增强了研究人员对 MgO 基隧道结的信心.2004 年,Yuasa 等^[27]采用分子束外延成功制备 MgO 基 MTJ,实现室温 180% 的 TMR;同年,IBM 报道了高达 410% 的 TMR 值^[28],标志着 MgO 基体系正式崛起.2008 年,Ikeda 等^[29]

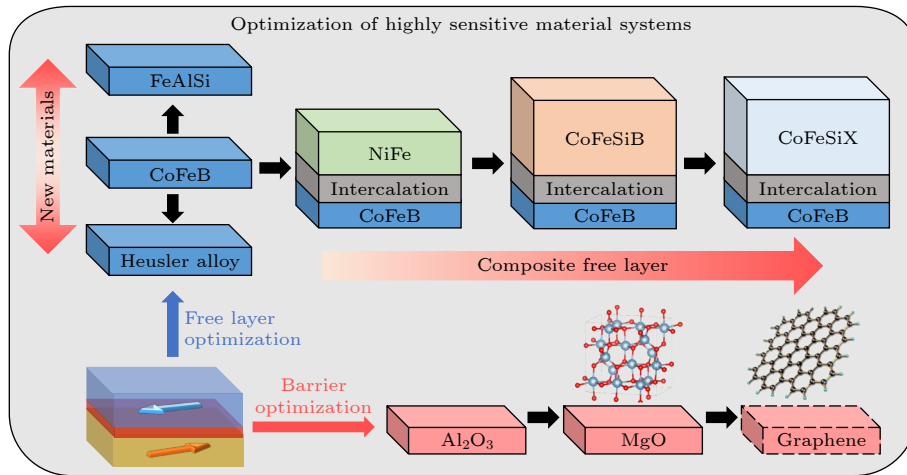


图 3 自由层材料优化途径

Fig. 3. Optimization approaches for free-layer materials.

在 CoFeB/MgO/CoFeB 结构中通过高温退火获得室温 604% 的 TMR 值, 充分验证了 MgO 相对于 Al-O 的显著优势. 2023 年, 日本国立材料研究所 Scheike 等^[30]通过 CoFe/Mg 界面插层技术, 将室温 TMR 推至 631%, 达到世界最高水平. 然而, 超高 TMR 材料因磁性能匹配等问题尚未大规模用于传感器, 当前实用化 MTJ 的 TMR 值多维持在 150%—240% 区间, MgO 体系性能提升已近瓶颈.

在此背景下, 探索新型势垒层材料成为新方向. 石墨烯以其原子级平整、超高载流子迁移率及长自旋扩散长度等特性^[31], 被视为极具潜力的候选材料. 荷兰特文特大学的 Karpan 等^[32]和国防科技大学潘孟春课题组^[33]采用第一性原理计算分析了石墨烯基隧道结的可行性, 发现铁磁/石墨烯界面会产生完美的自旋过滤效应, 从而获得极高的磁阻变化率. 此外, 六方氮化硼、过渡金属硫化物等二维材料也因范德瓦耳斯界面可有效地抑制晶格失配和界面散射, 显著地提升隧穿效率^[34,35]. 尽管石墨烯等新材料在制备工艺与界面调控方面仍面临挑战, 其独特的物理特性与巨大的性能优化空间, 使之成为未来高 TMR 器件中势垒层的重要发展方向.

2) 自由层材料优化

现阶段, 通过势垒层优化实现材料体系 TMR 值提升的幅度有限, 而从优化磁性材料的软磁性能入手, 降低敏感体的饱和场, 更有可能实现灵敏度的大幅提升. 2012 年, 日本东北大学 Fujiwara 等^[36]采用 CoFeB/Ru/NiFe 结构的复合自由层, 利用各向异性场更低的 NiFe 层带动 CoFeB 层的磁矩旋转, 降低自由层整体的饱和磁场. 通过采用更厚的 NiFe(70 nm) 在长宽比为 2 的器件中实现了 25.3%/Oe 的灵敏度, 已经可以作为高灵敏的磁场传感器使用. 2013 年, 该团队将复合自由层生长在氧化镁下方以保证制备 MTJ 时自由层更加完整, 从而减小自由层等效各向异性以提升灵敏度, 并通过增加自由层面积来降低噪声^[11]. 此外, 他们还尝试采用新的软磁材料 CoFeSiB 组成复合自由层, 通过 CoFeSiB 的低矫顽力和高结晶温度来提高退火后器件的软磁性能, 实现了 40%/Oe 的最大灵敏度^[11]. 同时, 非晶态的 CoFeSiB 因为没有晶界能够获得更平坦的表面, 在不影响 CoFeB 与 MgO 的晶格匹配的同时显著地降低 $1/f$ 噪声^[37]. 自 2015 年以来, 日本东北大学和中国科学院物理研究所合作, 在

厚 NiFe 或 CoFeSiB 自由层的基础上不断优化, 通过改变自由层的厚度、插层材料、反铁磁层厚度等影响因素, 探究灵敏度最佳的自由层设计方案, 设计出了分别具有 70 nm 厚 NiFe 与 140 nm CoFeSiB 的两种高灵敏 TMR 材料, 其中 CoFeSiB 自由层 TMR 薄膜制备的器件灵敏度高达 1150%/mT, 达到世界最高水平^[38-42]. 2023 年, Matos 等^[43]通过调整复合自由层中间插层的厚度和材料, 对比 CoFeBTa 和 CoFeSiB 等自由层材料的磁性能, 并增加退火温度进一步优化薄膜的软磁性能和 TMR 值. 具有厚的软磁材料的复合自由层是高灵敏 TMR 薄膜的重要发展趋势, 但厚自由层同样会引入多畴化、磁滞等问题, 使 MTJ 的传感性能恶化, 需要进一步优化复合自由层材料设计以实现性能突破.

除了对与 CoFeB 复合的软磁材料进行优化, 研究人员也尝试将 CoFeB 替换为其他具有高 TMR 值潜力与优良软磁性能的材料, 在保证势垒层界面质量的情况下获得更好的磁性能. 例如, 尝试将新的材料如 FeAlSi 和 Heusler 合金等引入自由层来寻求新的突破. FeAlSi 本身的有序结构使磁晶各向异性趋近于 0, 各向异性很低, 可以用作高灵敏自由层材料. 但是该材料对沉积工艺要求非常高, 很容易被 MgO 氧化^[44,45]. 此外, 采用自旋极化率极高的 Heusler 合金也是一种方案. 但是要想在 TMR 薄膜体系中实现高度有序的结构, 面临着复杂的生长工艺难题, MgO 的界面也会破坏其半金属性^[46,47]. 这些新型材料所制备的磁隧道结 TMR 值最高也仅有 121%^[45], 仍有很大的提升空间, 并且面临的工艺难题复杂, 短期内难以实现对高灵敏 TMR 材料体系的革新.

3.2.2 宽量程 TMR 材料体系

宽量程 TMR 材料体系的发展源于智能电网、新能源汽车及工业自动化等领域对大范围、强磁场环境下高精度磁测量的需求, 其核心目标在于从材料体系层面着手实现 TMR 传感器线性测量范围的大幅扩展. 该材料体系以磁各向异性静态调控为主要路径, 延伸发展出应变调制、电场调制等动态量程扩展方法, 如图 4 所示.

基于垂直各向异性的宽量程材料体系是当前主流技术, 通过构建垂直磁各向异性 PMA-MTJ, 使参考层磁矩垂直于薄膜平面取向. PMA 的产生主要依赖两种机制: 一是本征晶体各向异性, 如采

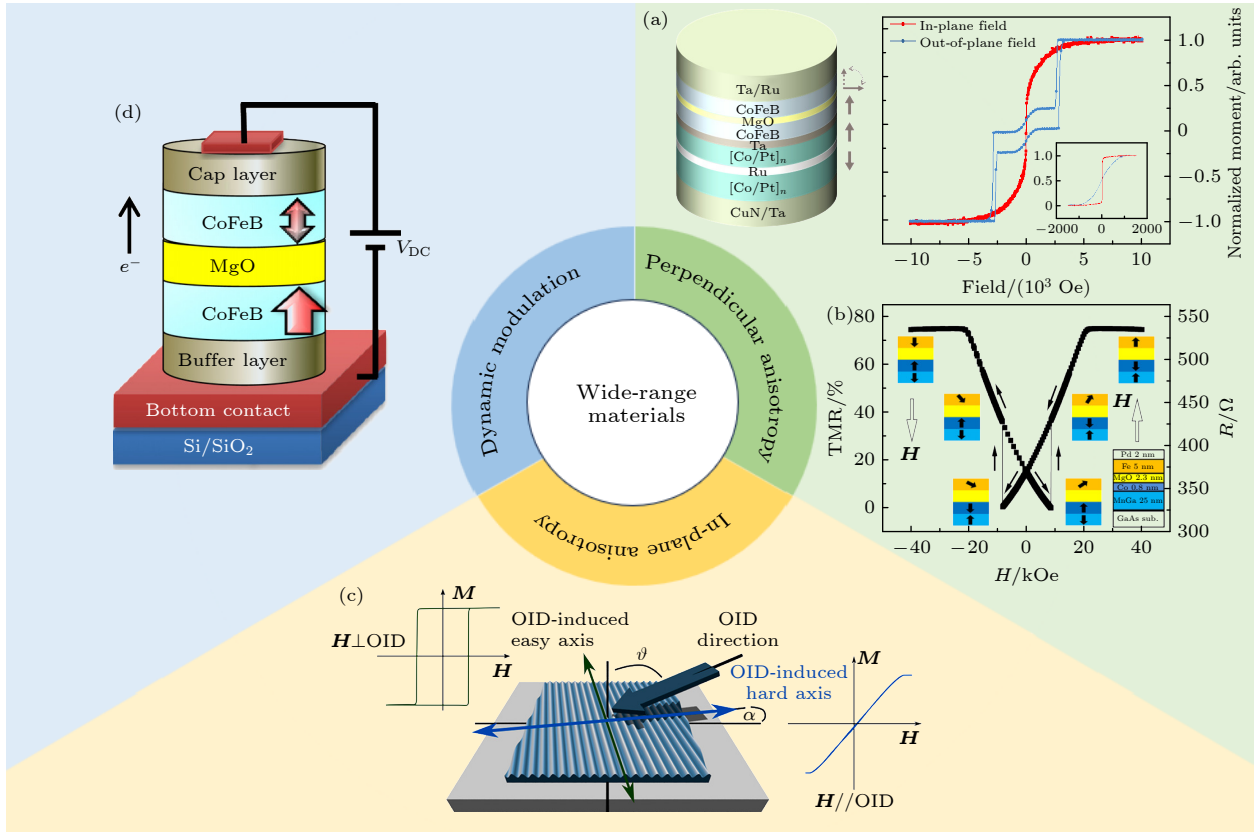


图4 宽量程薄膜材料体系发展方向示意图 (a) 界面诱导各向异性 PMA-MTJ 及其面内/面外磁阻响应曲线^[58]; (b) 本征晶体各向异性 PMA-MTJ 及其面外磁阻响应曲线^[48]; (c) 倾斜溅射沉积引入面内单轴各向异性实现量程拓展^[53]; (d) 电场可调动态量程 TMR 磁传感器^[56]

Fig. 4. Schematic diagram of the development direction of wide-range thin film material systems: (a) Interfacial induced anisotropic PMA-MTJ and its in-plane/out-of-plane magnetoresistance response curves^[58]; (b) intrinsic crystal anisotropic PMA-MTJ and its out-of-plane magnetoresistance response curve^[48]; (c) inclined sputtering deposition introduces in-plane uniaxial anisotropy to achieve range expansion^[53]; (d) electric field adjustable dynamic range TMR magnetic sensor^[56].

用 $L1_0$ 相 FePt 和 CoPt 合金作为自由层, 其固有 PMA 强度高, 线性区间可拓宽至 kOe 量级. 2017 年, Zhao 等^[48] 采用垂直磁化的 $L1_0$ -MnGa 合金作为参考层, 实现了室温下高达 27.4% 的 TMR 值和高达 5600 Oe 的极宽动态范围, 充分展示了 $L1_0$ 相合金在宽量程 TMR 器件中的应用潜力. 二是界面诱导各向异性, 典型代表为 CoFeB/MgO/CoFeB 体系, 通过超薄 CoFeB 层与 MgO 势垒之间的自旋轨道耦合效应, 结合人工合成反铁磁结构 (artificially synthesized antiferromagnet, SAF) 等设计, 在界面处产生显著的 PMA. 2012 年, Zeng 等^[49] 采用具有界面垂直各向异性的 CoFeB 材料作为自由层, 与面内磁化参考层构建了纳米尺度磁隧道结传感器, 实现了可达 0.0017%/Oe 的磁场灵敏度和超过 600 Oe 的宽线性测量范围, 充分展示了垂直各向异性 CoFeB 在纳米尺度、高灵敏度、低功耗磁性传感器中的应用潜力. 在此基础上, 日本东北大

学 Nakano 团队围绕 CoFeB/MgO 基 PMA-MTJ 开展了系统性研究, 进一步揭示了该材料体系下灵敏度与非线性之间的内在权衡关系, 并通过材料体系设计显著拓展了器件的动态范围. 2015 年, 该团队^[50] 基于 Stoner-Wohlfarth 模型, 对具有垂直磁各向异性 CoFeB 自由层的 MTJ 进行了系统的参数调控, 通过改变 CoFeB 自由层的厚度和 Fe 元素含量, 实现了对各向异性场 H_k 的有效调制. 实验结果明确验证了灵敏度与非线性之间存在由 H_k 主导的制约关系: H_k 越小, 灵敏度越高但非线性越大, 反之亦然. 在优化条件下, 他们在 ± 400 Oe 线性传感范围内分别获得了高达 0.048%/Oe 的灵敏度 (对应非线性为 5.5%FS) 以及低至 0.4%FS 的非线性 (对应灵敏度为 0.004%/Oe). 为进一步突破动态范围限制, 该团队^[51] 于 2017 年将参考层升级为基于 [Co/Pd] 的垂直合成反铁磁 (p-SAF) 结构, 利用其强反铁磁耦合产生的交换偏置场, 成功将线

性响应范围扩展至 ± 2 kOe 以上, 为 CoFeB/MgO 基 PMA-MTJ 材料体系设计提供了切实可行的技术路径. PMA 结构的核心优势在于显著增强的磁各向异性, 使得自由层磁矩翻转过程更加平缓, 从而大幅拓宽线性响应区间; 同时, 其热激活能垒更高, 有效地提升了器件在 -40 — 150 °C 宽温域内的热稳定性, 满足严苛工业环境的应用需求^[52]. 然而, PMA-MTJ 在实际应用过程中仍存在两点关键缺陷: 一是在实现宽动态范围的同时往往伴随灵敏度的大幅下降, 需通过精细调控自由层的有效各向异性场、势垒层质量及 TMR 值等参数进行综合权衡与优化设计; 二是基于垂直各向异性的参考层磁矩取向无法通过反铁磁耦合实现稳定钉扎, 当外界强磁场干扰超过一定范围时, 参考层磁矩将发生翻转, 无法准确实现外磁场的测量.

相比之下, 面内各向异性的宽量程材料体系虽然量程拓展范围有限, 但保持了较高灵敏度水平, 且能够通过反铁磁耦合实现参考层磁矩的稳定钉扎, 具有较强的抗干扰能力. 面内各向异性材料体系拓宽量程的典型策略包括: 通过精确调控 CoFeB 自由层厚度及其有效各向异性场, 从而灵活设定线性工作区间; 采用倾斜溅射沉积引入面内单轴各向异性^[53]; 或利用人工缺陷工程等手段抑制突变式磁翻转, 延长线性响应范围^[54]. 这类方法适用于中高量程、成本敏感的工业传感场景, 在保持较高灵敏度的同时实现一定程度的量程扩展.

除了上述静态量程调控方法, 动态量程调节技术近年来取得重要进展, 显著地提升了 TMR 传感器的适应性与智能化水平. 动态量程调节技术主要包括电场调控和应力调控两种方式. 电场调控通过在薄膜材料体系中引入 VCMA 等效应, 利用介电栅极施加垂直电场, 电压控制界面 PMA 强度, 实现对自由层翻转行为的实时调节^[55]. 2014 年, 新加坡数据存储研究所 Naik 等^[56] 在基于界面 PMA 的 CoFeB/MgO 磁隧道结中实现了室温下灵敏度高达 $80.8 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1}$ 的电场可调磁传感器, 其灵敏度可通过施加电场的强度和极性进行精确调控. 该方法功耗低, 响应速度快, 适合构建可重构、自适应磁传感器. 应变调控则是将 MTJ 集成于压电基底上, 通过外加电压诱导基底应变, 进而调制铁磁层的磁各向异性, 实现动态线性区偏移与增益调节. 2018 年, 日本东京大学 Ota 等^[57] 通过在柔性衬底上施加应变, 成功地实现了对钴层磁各向异性的

有效调控, 并据此构建出可探测应变方向的 GMR 器件, 为实现通过应变调控 TMR 传感器线性量程提供了全新的思路. 虽然上述方法为量程调控提供了新的思路, 但现阶段仍存在工艺复杂度高、实时性和可靠性差、噪声水平恶化等问题有待进一步研究和完善.

3.3 结构优化

薄膜材料体系奠定了 TMR 传感器的性能基础, 而敏感结构的优化设计则是实现性能突破的关键手段, 通过 MTJ 结构、磁敏感体集成与调制技术的协同创新, 可进一步提升灵敏度、拓宽线性区间并抑制噪声.

3.3.1 MTJ 结构优化

针对磁性隧道结 (MTJ) 单个结的结构优化中, 几何形状设计是调控磁各向异性与退磁场分布的关键手段之一. 传统矩形 MTJ 通过调节长宽比来引入面内形状各向异性, 引导自由层磁矩沿长轴方向优先取向, 从而影响器件的磁阻比与灵敏度. 然而, 其尖锐的角部易导致磁荷局域聚集, 形成强局部退磁场, 诱发非均匀磁化翻转过程, 常伴随显著的磁滞与非线性响应, 限制了其在高精度传感中的应用. 为克服上述问题, 椭圆形及圆角矩形等平滑轮廓结构被广泛引入. 这类设计通过优化边缘曲率, 使表面磁荷分布更加均匀, 有效地缓解了角部退磁场集中效应, 抑制了局部磁畴成核与钉扎行为. 由此, 自由层磁化翻转过程趋于连续和平滑, 显著地提升了磁响应的线性度, 降低了磁滞误差.

为进一步突破线性范围与动态性能的瓶颈, 磁涡旋态 (magnetic vortex state) 结构被引入 MTJ 当中. 当 MTJ 自由层的横向尺寸超过材料的交换长度, 且具有适当的纵横比时, 系统倾向于形成能量稳定的闭合通量结构——即磁涡旋态, 如图 5(b) 所示. 在此状态下, 面内磁矩围绕中心涡核呈旋转闭合排列, 显著地降低退磁能, 并在外加磁场下通过涡核的连续偏移实现对外场的响应, 而非传统 MTJ 中磁矩的整体翻转. 该机制避免了突变式磁化切换, 实现了高度线性、近乎无磁滞的输出特性^[59,60]. 美国布朗大学 Xiao 团队^[61] 制备的涡旋态 MTJ 可在高达 100 Oe 的磁场范围内保持优于 0.5% 的非线性度, 1 Hz 频率下分辨力可达 $18 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 且因其内部磁通闭合特性, 单元间磁偶极耦合被有

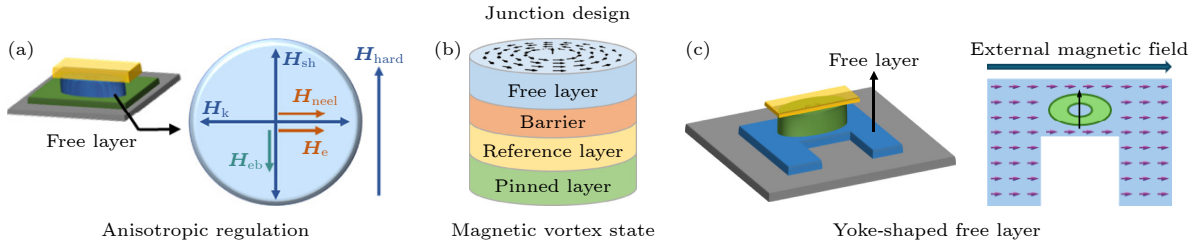


图 5 MTJ 结构优化示意图 (a) 各向异性调控 (包括几何形状设计和退火工艺); (b) 磁涡旋态结构设计; (c) 磁轭结构设计
 Fig. 5. Schematic diagram of MTJ structure optimization: (a) Anisotropic regulation (including geometric shape design and annealing process); (b) magnetic vortex state structure design; (c) magnetic yoke structure design.

效抑制, 有利于实现高密度阵列集成与低串扰运行, 为高精度、宽动态范围磁传感器提供了理想结构基础. 2025 年, 该团队^[17]为进一步优化磁涡旋态 MTJ 的灵敏度指标, 将 MTJ 自由层直径扩展至 $40\ \mu\text{m}$. 相关测试结果表明, 大尺寸涡旋态 MTJ 直流灵敏度可达 $2.80\%/Oe$, 相较于传统小直径涡旋器件实现了约 8 倍的提升. 该器件在整个线性工作区间内保持了近乎无磁滞的响应特性, 验证了大直径涡旋态在维持优良线性度的同时实现超高灵敏度的可行性. 此外, 磁涡旋态还具备优异的抗磁场冲击能力, Liu 等^[22]研究表明涡旋态 TMR 传感器在 $\pm 1\ \text{kOe}$ 多方向磁场冲击后输出特性保持稳定, 非线性度仅从 0.3% 上升至 0.5% , 作为对比传统 TMR 传感器则出现了磁滞的显著恶化, 展现了磁涡旋态结构在强电磁干扰环境下的独特优势.

另一方面, 磁轭结构 (magnetic yoke) 设计通过引入延伸的软磁电极层, 重构自由层的磁化演化路径, 如图 5(c) 所示, 进一步提升器件的灵敏度与信噪比. 磁轭通常由高磁导率、低矫顽力的软磁材料构成, 其长臂部分可引导磁通集中并均匀化自由层内的磁化分布, 促使磁矩在外场作用下发生一致旋转, 抑制边缘区域的无序翻转与局部钉扎. 这种受控的磁化转动机制显著增强了磁响应的可重复性, 同时降低了低频磁噪声. Chen 等^[62]研究表明基于磁轭结构的 MTJ 传感器灵敏度可达 $27\%/mT$ 以上, 且其 $1/f$ 低频噪声水平较传统结构降低近一个数量级, 展现出在生物磁信号、微电流监测等弱磁场探测场景中的巨大潜力.

除了上述针对几何形状的优化, 退火后处理技术也对单个 MTJ 的性能起到关键调控作用. 其中, 双步退火工艺是实现参考层与自由层磁矩正交排列、获得线性磁响应曲线的关键技术. 通过设计双钉扎薄膜材料体系中两层反铁磁钉扎层的不同阻

断温度 (blocking temperature), 可在第一次高温退火中初始化参考层磁矩并促进 CoFeB/MgO 界面的有序结晶, 从而大幅提升 TMR 比率; 随后在第二次低温退火中施加特定方向的外磁场, 选择性地重定向自由层的交换偏置方向, 而保持参考层方向不变, 最终实现两层磁矩的初始正交配置. 传统的两步正交退火虽可实现磁矩正交, 但常因奈尔耦合效应导致自由层中出现残余偏置场, 导致零偏加剧. 为解决这一问题, 国防科技大学 Zhang 等^[63]研究提出了非正交双步退火法 (non-orthogonal annealing, NOA), 通过将第二次退火的冷却磁场方向设置为与初始易轴呈非正交角度, 巧妙引入一个与奈尔耦合场方向相反的有效补偿场分量. 实验结果表明, 采用 120° 非正交退火的 MTJ 器件, 其零偏可降低至小于 $1\ Oe$, 显著优于正交退火下的典型值, 同时线性响应区间向弱场区域扩展, 零场附近灵敏度提升超过一倍. 此外, 为进一步提升磁响应的对称性与线性度, 北京航空航天大学 Sun 等^[19]提出并验证了一种三步退火工艺. 该工艺在双步退火基础上增加第三步中低温退火, 在较小磁场或特定方向下进行微调, 以精细校准自由层的磁各向异性轴与交换偏置方向. 该步骤可有效地缓解前两步退火中可能引入的各向异性畸变或残余应力, 进一步降低磁滞与非线性误差, 实现了 $1.57\ \text{mV}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$ 灵敏度和 $29.3\ \text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}@10\ \text{Hz}$ 分辨力的高性能指标.

3.3.2 磁敏感体结构优化

在 TMR 磁敏感体的结构优化中, MTJ 的串并联集成与惠斯通电桥构型是提升传感器整体性能的基础技术路径, 如图 6(a) 所示. 通过将多个 MTJ 单元以串联或并联方式连接, 不仅能够有效分摊工作电压, 降低单个结因局部电场集中而导致的静电击穿风险, 提高器件的可靠性与寿命, 还能

利用多结集成带来的统计平均效应, 显著抑制低频 $1/f$ 噪声. 日本东北大学 Fujiwara 等^[11] 研究表明, 当多个 MTJ 单元串联时, 其总噪声水平可随单元数量的增加而降低, 团队通过将 100×100 个 MTJ 串联, 使噪声水平下降至单个结的约 $1/30$, 从而大幅提升信噪比和磁场探测分辨力. 此外, 将 MTJ 单元构建成惠斯通电桥结构, 是实现高灵敏度、低噪声和温度漂移抑制的常用方法. 在传统设计中, 电桥通常由四个特性匹配、一致性较高的 MTJ 组成, 通过差分输出抵消共模干扰, 增强对磁场变化的响应灵敏度. 然而, 制备四个完全一致的 MTJ 单元在工艺上极具挑战, 且桥臂间的不匹配会导致零偏和非理想线性输出, 影响传感器的精度与稳定性, 因此未来需要进一步探索局部退火、分区域光刻等片上组桥方式以提高组桥器件的一致性.

磁通聚集器 MFC 是从结构层面提升 TMR 磁传感器灵敏度的主要手段之一, 通过放大待测的微弱磁场并屏蔽来自其他方向的干扰磁场, 能够大幅提高传感器的信噪比和灵敏度, 如图 6(b) 所示. 在传统 MFC 的优化方面, 需从材料、间隙、形状及制备工艺等多个维度进行协同设计, 以实现最佳的磁场增强效果. 材料选择上, 通常采用具有高磁导率和低磁致伸缩系数的 NiFe 合金^[64], 通过电化学沉积技术在晶圆级上实现可重复、大面积的成型, 确保

其具备优异的软磁性能与低矫顽力, 从而减少非线性响应和磁滞损耗. 间隙设计是 MFC 优化的关键因素, 狭窄的空气间隙能够显著增强磁场的局域聚集效应, 提升 MTJ 结所在区域的磁场强度. Manceau 等^[65] 研究表明, 当 MFC 与 TMR 传感器之间的空气间隙控制在 $5-7 \mu\text{m}$ 时, 能够实现高达 440 倍的磁场增益, 理论上可以使 TMR 传感器的灵敏度从 $3.6\%/m\text{T}$ 提升至 $1580\%/m\text{T}$. 然而, 这种狭窄间隙对制造工艺提出了极高要求, 需要精确控制 TMR 传感器在间隙中的位置, 避免因偏移导致磁场分布不对称, 进而影响传感器的线性度和灵敏度一致性. 在几何构型方面, 其优化工作主要集中在通过有限元仿真与实验验证, 系统研究不同形状及其尺寸比例对磁增益和线性工作范围的影响^[66,67]. 清华大学 Bi 等^[68] 系统地研究了梯形、三角形、楔形、喇叭形等几何构型对 MFC 的性能影响, 发现楔形 MFC 具有最高的磁路增益, 且磁路增益仅由其几何参数的比例关系决定, 与参数绝对数值无关. 然而, MFC 的引入也带来了新的挑战, 主要包括额外的磁噪声与磁滞现象, 这些主要源于薄膜沉积过程中产生的残余机械应力, 可能导致自由层磁化翻转不稳定或引入低频噪声. 通过精确调控电沉积过程中的电流密度, 可以优化 NiFe 合金的成分比例与内部应力状态, 从而有效地抑制磁滞效应; 但 MFC 本身在低频段可能诱发的磁噪声仍难以

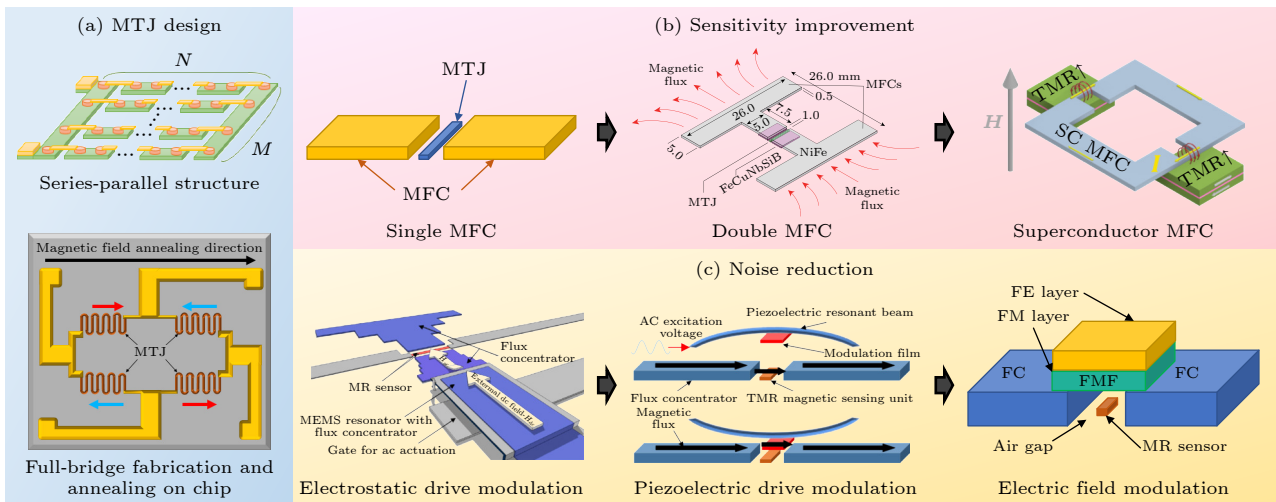


图 6 磁敏感体结构优化示意图 (a) 串并联设计和片上集成退火; (b) 灵敏度提升方法: 单层磁通聚集器、双层磁通聚集器^[82]、超导磁通聚集器; (c) 噪声抑制方法: 静电驱动调制^[83]、压电驱动调制^[84]、电场调制

Fig. 6. Schematic diagram of optimization of magnetosensitive body structure: (a) Series-parallel design and on-chip integrated annealing; (b) sensitivity enhancement methods: single-layer flux aggregators, double-layer flux aggregators^[82], superconducting flux aggregators; (c) noise suppression methods: electrostatic drive modulation^[83], piezoelectric drive modulation^[84], electric field modulation.

完全消除,需在后续信号调理电路与系统级噪声抑制策略中予以综合考虑.

为进一步突破单层 MFC 的增益极限,双层乃至多层磁通聚集器结构被提出并逐步开展研究. 这类设计通过嵌套或级联的方式构建多级磁路,在相同外部磁场激励下实现更高效的磁场压缩与逐级放大. 2018 年, He 等^[69]采用双层 MFC 结构并通过精细匹配各层之间的几何参数与间隙耦合关系,在不显著增加器件面积的前提下,获得了比单层 MFC 结构更高的局部场增强效果, MFC 总增益可达 516.9 倍,使 MTJ 传感器的灵敏度达到 775.4%/Oe,探测极限达到 $30 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$.

超导 MFC 则代表了磁场放大技术的前沿,其超高放大倍数和极低的磁场探测能力使其在超高灵敏度检测领域具有独特优势. 超导 MFC 由超导薄膜构成的闭合环路组成,环路中包含一段宽度狭窄区域,当外部磁场垂直穿过超导环路时,由于迈斯纳效应产生屏蔽电流,狭窄区域处的电流密度显著增大,从而形成局域磁场增强^[70-72]. 2022 年,国防科技大学 Yang 等^[73]在 77 K 超导状态下,使用 $5 \mu\text{m}$ 宽收缩区的超导 MFC,最大实现了 262 倍的磁场放大倍数. 理论计算表明,当 TMR 与超导 MFC 间距降低至 $0.5 \mu\text{m}$ 以内时,磁场放大倍数可接近 1000 倍. 然而,超导 MFC 需要在低温环境下工作,这限制了其在常规应用场景中的应用,且由于需要制冷装置,无法实现芯片化集成,使其在便携式和低成本磁传感器应用中面临严峻挑战. 尽管如此,超导 MFC 在生物医学成像、地球物理探测等对灵敏度要求极高的领域仍具有重要应用价值.

3.3.3 噪声调制技术

TMR 传感器的 $1/f$ 噪声在低频段尤为显著,严重限制了其对微弱磁场的探测能力. 为了克服这一问题,噪声调制技术被广泛采用,如图 6(c) 所示,其核心思想是通过外部驱动将待测的低频磁场信号调制到高频区域,从而避开 $1/f$ 噪声主导的频段,再通过解调还原信号,有效地提升信噪比^[74]. 2002 年, Edelstein 和 Fischer^[75]首次提出了一种基于微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 的扭转式磁通聚集器概念,通过静电驱动使其围绕扭臂轴进行周期性旋转,将磁传感器敏感区域的磁场调制至 29 kHz 处的高频段,初步验证了该技术的可行性. 2008 年,葡萄牙 INESC-MN

研究所 Guedes 等^[76]采用静电驱动的悬臂梁结构带动磁通聚集器谐振,将 GMR 自旋阀处的磁场调制频率提高至 460 kHz,实现了 0.11% 的调制效率;随后通过结构优化,采用微扭转器替代悬臂梁,将调制效率提升至 11%^[77]. 然而,这类基于静电驱动的 MEMS 调制系统结构复杂、加工难度大,且调制效率仍有待提高.

在磁通调制结构优化方面,垂动调制 (vertical motion flux modulation, VMFM) 和磁通电调制 (magnetic flux electric modulation, MFEM) 是两种具有代表性的技术路径. VMFM 是一种基于 MEMS 的机械调制方式. 2012 年,国防科技大学 Hu 等^[78]提出基于压电驱动悬臂梁的 VMFM 结构,实验表明其场调制效率达 18.8%,噪声水平降至约 $0.44 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$. 该方法采用压电驱动的悬臂梁结构,带动磁通调制薄膜 (flux modulation film, FMF) 在垂直方向周期性振动,通过改变磁通路径实现对磁通量的调制. 当磁通调制薄膜靠近空气隙时,磁通会优先通过这片高磁导率的薄膜,导致隙中磁场减弱;而当 FMF 膜远离时,隙中磁场则得以恢复. 这种周期性变化将低频待测磁场转换为高频交流信号,进而抑制 $1/f$ 噪声. 为进一步提高性能,2019 年 Du 等^[79]在此基础上提出了一种带有振幅反馈功能的压电驱动双固支梁调制结构,通过优化调制膜初始高度、振动幅度及材料属性,将调制效率显著提升至 68.7%,探测能力提升约 43 倍. 尽管如此,VMFM 技术仍依赖机械振动,存在驱动电压较高、功耗较大、调制频率受机械共振限制等问题,且机械振动可能导致结构不稳定和输出漂移,影响传感器的长期可靠性.

为克服机械调制的局限性, Pan 等^[80]提出了一种基于 FeSiBPC/PMN-PT 多铁异质结构的 MFEM 方法,实现了高达 150 倍的磁化率调控能力. 在驱动电压为 10 V、铁电层厚度为 $50 \mu\text{m}$ 的条件下,理论调制效率可达 73%. 该方法利用铁电/铁磁 (FE/FM) 多铁异质结构的磁电耦合效应,通过电压控制实现磁导率的非机械式调制. 具体而言,在 FE/FM 异质结构中,铁电层在外部电压作用下产生各向异性应变,该应变通过界面传递至铁磁层,进而通过磁致伸缩效应调节铁磁层的磁导率,从而实现对磁通量的有效调控. 这种方法的优势在于无需机械运动,调制频率可理论达到百兆赫兹,远高于机械共振频率限制. 此外,由于避免了机械振

动, 该系统结构更稳定, 功耗更低, 且易于与集成电路工艺兼容, 为高频、高精度磁传感提供了新途径^[81].

4 应用场景

隧道磁阻 (TMR) 磁传感器凭借其高灵敏、高频响、低功耗、小体积以及与 CMOS 工艺兼容等核心优势, 已在生物医疗、智能电网等多个前沿领域展现出广泛的应用前景.

4.1 生物医疗

心磁、脑磁等生物磁场信号在传播过程中不受人体组织衰减, 具有高保真度、高空间分辨率和非接触测量等优势, 是实现无创生理监测的重要手段. 目前, 超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是主流的生物磁探测设备, 但其依赖液氦冷却, 系统体积大、成本高昂且难以便携化. TMR 传感器作为可在室温下工作的高灵敏度磁传感技术, 其磁场探测能力已进入亚皮特斯拉 (sub-pT) 量级^[42], 为发展低成本、小型化、可部署的生物磁测量系统提供了关键技术支撑. 近年来, TMR 传感器在材料结构与器件结构设计等方面取得显著突破, 探测灵敏度已提升至 $0.94 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$, 接近 SQUID 性能水平, 同时具备室温工作、低功耗与高集成度等优势. 在实际应用方面, Fujiwara 等^[41]于 2018 年首次在磁屏蔽室内利用优化后的 TMR 传感器实现了心磁信号的测量, 成功捕捉到 MCG 中的 R 波, 并通过信号平均清晰呈现 QRS 复合波, 验证了 TMR 技术在室温生物磁检测中的可行性; 2021 年, Oogane 等^[42]通过优化 TMR 传感器性能, 在无需信号平均的情况下即可清晰观测到 MCG 的 QRS 复合波, 展现出在实时、动态心磁监测方面的巨大潜力; 2023 年, Kurashima 等^[85]开发了一套无需磁屏蔽室的高精度 TMR 心磁检测系统. 该系统集成 288 个 TMR 传感器构成拱形阵列, 结合双级磁通聚集器、闭环反馈机制和信号空间分离算法, 在正常工作环境中实现了 $0.99 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的心磁场分辨力, 获得了与 SQUID 相媲美的高质量心磁图, 标志着 TMR 技术向临床实用化迈出了关键一步.

此外, 产业界也在积极推进 TMR 生物磁检测系统的实用化. 2016 年, 日本 TDK 公司与东京医科齿科大学合作展开研究并推出了基于 TMR 传

感器阵列的心磁图 (magnetocardiography, MCG) 检测系统, 实现了世界首例心磁场的测量与影像可视化, 其磁场分辨力可达数十 pT, 有望用于心脏病早期筛查与胎儿心磁监测; 2023 年, 英国初创公司 Neuramics 推出了可穿戴式 MCG 开发平台, 该平台能够检测 pT 级微弱磁信号, 并通过蓝牙无线传输将心脏磁信号实时传输至手机、平板等智能设备, 实现 24 h 全天候心脏健康监测. 国内企业如多维科技于 2024 年推出新型 3 pT 级紧凑型高精度低噪声线性 TMR 磁传感器, 并联合宁波大学科研团队共同完成了 TMR 传感器心磁信号检测联合测试, 测得的心磁波形能够明显分辨出 P, Q, R, S, T 和 U 等波形. 这些商业化进展表明, TMR 技术正加速从实验室走向临床应用, 推动生物磁检测向低成本、可穿戴化转型. 凭借卓越的探测性能、完善的系统集成与算法支持, TMR 技术有望将生物磁检测从大型设备延伸至可穿戴场景, 重塑生理功能成像与健康监测的技术格局^[4,86-88].

4.2 智能电网

随着可再生能源的大规模接入和“双碳”目标的推进, 智能电网对电流监测的精度、带宽、可靠性及实时性提出了更高要求. TMR 传感器凭借其高灵敏度、宽频响、低功耗、宽动态范围和良好的温度稳定性, 已成为智能电网建设中理想的非接触式电流传感解决方案^[74,89]. 实际应用中, 基于 TMR 的电流传感技术已实现多项关键突破: 鲁文帅等^[90]通过单片单轴 TMR 传感器设计, 成功开发出无需磁芯结构的非侵入式电流监测微系统, 测量范围 0—8 A 内最大相对误差仅为 1.5%, 达到国标 0.5 级精度标准; 在频带扩展方面, Ziegler 等^[91]融合 TMR 传感器与 Rogowski 线圈的优势提出一种混合宽频电流传感器, 凭借其从 DC 至 315 MHz 的超宽频带特性, 成功应用于快速开关电力电子中的换流电流测量; 在抗干扰方面, Liu 等^[92]提出一种基于双圆形 PCB 走线结构的 TMR 电流传感方案, 利用差分结构将外部干扰转化为共模信号, 显著提升抗干扰能力. 实验表明, 该方法在 2 mm 安装误差下灵敏度仍可达 0.5902 V/A , 且对传感器安装误差具有极强鲁棒性.

在商业领域, Allegro、TDK、希磁科技、多维科技等多家传感器公司都已布局 TMR 电流传感器. 2025 年, Allegro 旗下 XtremeSense 品牌推出

业界首款量产级 10 MHz 带宽磁性电流传感器, 响应时间低至 50 ns, 且在 10 MHz 全带宽下测量噪声仅 26 mA RMS, 为高压功率转换领域特别是宽禁带应用带来了全新的解决思路. 同年, 国内希磁科技也发布了 MHz 级高频电流传感器, 响应速度可达 200 ns, 且在 $\pm 1\%$ 高精度下实现 100—1000 A 宽量程覆盖, 具备行业领先水平. 此外, TDK、多维科技等公司也都推出了成熟产品系列, 带宽、量程、线性度等性能能够覆盖智能电网领域中各场景的使用需求, 有力支撑了智能电网状态感知的实时性与可靠性提升. 未来, TMR 电流传感器将成为电力系统智能化建设中不可或缺的关键组件.

4.3 其他应用

除了生物医疗和智能电网, TMR 传感器在消费电子、工业自动化及汽车电子等市场中也正加速渗透, 逐步取代传统的霍尔和其他 MR 传感器. 在消费电子领域, 智能手机中的电子罗盘是 TMR 传感器的重要应用. 相比于 AMR 方案, TMR 电子罗盘具有更低的功耗和更高的角度分辨率, 有助于提升导航与增强现实等使用体验. 此外, 在笔记本电脑的磁轴键盘、智能手机摄像头光学防抖 (optical image stabilization, OIS) 位置检测、高端游戏手柄的扳机键位检测中, TMR 线性传感器因其高灵敏、高精度和可靠性也得到了广泛应用. 在工业自动化领域, TMR 传感器为工业机器人和精密电机控制提供了关键的位置和角度反馈. 例如, 在机器人的关节处, TMR 角度传感器能够实现绝对位置测量, 具有抗干扰能力强、寿命长的优点. 在高速、高精度的伺服电机控制中, 基于 TMR 的旋转变压器替代方案, 能提供更精细的分辨率和更快的动态响应. 在汽车电子领域, TMR 的应用已超越早期的轮速传感, 向更核心的领域扩展. 除了用于电机控制的旋转变压器, TMR 电流传感器正广泛应用于电池管理系统和电机驱动单元中, 精确监测充放电电流和相电流, 其宽量程和高带宽特性完美契合电动汽车的需求. 此外, 用于变速箱档位检测和方向盘转角测量的 TMR 传感器, 因其在宽温范围内的稳定性而备受青睐. 主流汽车芯片供应商, 如恩智浦 (NXP)、英飞凌 (Infineon) 和 Allegro 等企业, 均已将 TMR 传感技术纳入其产品路线图, 展现出该技术巨大的应用前景.

5 总结与未来展望

隧道磁阻 (TMR) 传感器凭借其高灵敏度、低功耗、小型化、宽频响和良好的可集成性, 在现代传感技术中展现出巨大的应用前景. 从工业自动化中的位置与电流检测, 到生物医学领域的心磁图和神经信号监测, 再到无人机导航、地质勘探以及物联网终端的环境感知, TMR 传感器正逐步替代传统的霍尔、AMR 和 GMR 器件, 成为高精度磁场探测的首选方案. 其基于量子隧穿效应的物理机制赋予了器件远超其他磁阻技术的信噪比与分辨力, 尤其在弱磁场检测方面展现出接近 SQUID 的性能潜力, 同时无需低温工作环境, 具备更强的实用性和部署灵活性. 随着人工智能、可穿戴设备和边缘计算的快速发展, TMR 传感器不仅作为前端感知单元, 更逐步融入智能感知系统, 推动着新一代磁传感技术的范式变革.

当前 TMR 传感器的技术发展路径主要沿着材料优化、结构创新与系统集成三个方向并行推进. 展望未来, TMR 传感器的发展仍面临若干关键挑战与突破方向.

首先, 在材料体系的优化层面, 如何发展具有更高灵敏度和更宽量程的 TMR 薄膜材料体系是未来的主要发展方向. 一方面, 为了满足生物磁探测等更高精度的探测需求, 亟需通过开发新型势垒层材料、发展复合自由层等手段, 进一步提升器件的磁阻比与灵敏度, 降低其本征噪声, 从而实现更高的磁场探测分辨力以适应应用需求. 另一方面, 在汽车电子和智能电网等场景中, 又要求 TMR 传感器具备可达上千 Oe 量级的线性测量动态范围^[6,93], 这需要对自由层磁各向异性进行精确调控, 以平衡灵敏度与量程, 避免在强场下饱和失真. 与此同时, 增强热稳定性也是材料体系优化的重要环节. 为满足汽车、工业和航空航天等领域对高可靠性的严苛要求, 需要通过界面工程、势垒层优化以及设计磁性耦合体系等方式, 使器件在宽温域内保持磁敏特性的稳定, 防止因温度波动导致性能衰退或参数漂移. 此外, 面向生物可穿戴电子和柔性机器人的广阔前景, 发展高性能的柔性 TMR 传感器成为迫切需求. 为实现这一目标, 需要在柔性基底上实现 TMR 薄膜的高质量生长, 并确保器件在反复弯曲、拉伸等机械应力下, 仍能保持稳定可靠的磁敏

特性,这对材料和制备工艺提出了极高要求.

其次,实现高性能、小型化的三轴 TMR 磁矢量传感是当前的技术瓶颈. 三轴传感器能完整捕获磁场矢量信息,对于姿态判定、导航定位等应用至关重要^[94-97]. 然而,现有的主流集成方案均存在明显缺陷: 组装式三轴方案将三个单轴芯片正交贴装,体积大、正交精度难保证; 磁变轨式方案通过软磁材料引导磁场,虽实现单片集成,但引入了非线性、迟滞和额外噪声,且不同方向磁场解耦时计算量庞大; 斜面基底式方案则在倾斜的基底上制备传感器,工艺复杂,且不同方向上一致性差. 因此,未来需要进一步探索基于反常霍尔效应、磁电耦合材料、二维范德华材料等多物理效应融合的单体式小型化三轴 TMR 磁传感技术,从根本上解决三轴传感器在正交性精度、封装体积和 CMOS 工艺兼容性之间的固有矛盾.

最后,探索 TMR 传感器与人工智能的前沿融合,是解锁其未来发展潜力的关键. TMR 传感器中的 MTJ 本身具有非易失性、多阻态等特性^[98-101],展现出“感存算一体”的潜力,但如何将这种物理特性融入传感器设计,开发出专用的“感存算一体化”架构仍是当前面临的发展挑战. 一方面,可以在算法层面,利用深度学习处理 TMR 传感器阵列采集的复杂磁信号,进行模式识别、噪声抑制和目标分类,极大提升系统的感知智能. 更具革命性的方向是在硬件层面,直接利用 TMR 结的模拟阻变行为构建人工突触与神经元,将部分计算任务如脉冲神经网络处理等在传感端原位完成. 这不仅能实现数据处理的超低功耗与超高并行度,还能构建出真正意义上的感存算一体系统,为边缘智能和特定场景下的实时处理提供全新的解决方案.

综上所述, TMR 传感器正处于从单一功能器件向多功能、智能化、系统化感知平台演进的关键阶段. 尽管在材料创新、三维集成、柔性化与智能算法融合等方面仍面临诸多挑战,但随着跨学科技术的持续突破, TMR 传感器有望在下一代智能感知系统中扮演更加核心的角色,推动其在医疗健康、自动驾驶、工业物联网和空间探测等前沿领域的广泛应用与深度渗透.

参考文献

- [1] Zheng C, Zhu K, Cardoso De Freitas S, Chang J Y, Davies J E, Eames P, Freitas P P, Kazakova O, Kim C, Leung C W, Liou S H, Ognev A, Piramanayagam S N, Ripka P, Samardak A, Shin K H, Tong S Y, Tung M J, Wang S X, Xue S, Yin X, Pong P W T 2019 *IEEE Trans. Magn.* **55** 1
- [2] Yang S, Zhang J 2021 *Chemosensors* **9** 211
- [3] Julliere M 1975 *Phys. Lett. A* **54** 225
- [4] Oogane M 2024 *IEICE Trans. Electron. E* **107.C** 171
- [5] Yan S H, Zhou Z T, Yang Y D, Leng Q W, Zhao W S 2022 *Tsinghua Sci. Technol.* **27** 443
- [6] Leitao D C, Riel F J F V, Rasly M, Araujo P D R, Salvador M, Paz E, Koopmans B 2024 *Npj Spintronics* **2** 54
- [7] Malinowski G, Hehn M, Sajieddine M, Montaigne F, Jouguelet E, Canet F, Alnot M, Lacour D, Schuhl A 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4372
- [8] Negulescu B, Lacour D, Montaigne F, Gerken A, Paul J, Spetter V, Marien J, Duret C, Hehn M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 112502
- [9] Djayaprawira D D, Tsunekawa K, Nagai M, Machara H, Yamagata S, Watanabe N, Yuasa S, Suzuki Y, Ando K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 092502
- [10] Chen J Y, Feng J F, Coey J M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 142407
- [11] Fujiwara K, Oogane M, Nishikawa T, Naganuma H, Ando Y 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 04CM07
- [12] Han X F, Zhang Y, Feng J F, Chen C, Deng H, Huang H, Guo J H, Liang Y, Si W R, Jiang A F, Wei H X 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 238502 (in Chinese) [韩秀峰, 张雨, 丰家峰, 陈川, 邓辉, 黄辉, 郭经红, 梁云, 司文荣, 江安烽, 魏红祥 2022 *物理学报* **71** 238502]
- [13] Zhao W S, Zhang B Y, Peng S Z 2023 *Spintronic Science and Technology* (Beijing: Posts & Telecom Press) pp320-324 (in Chinese) [赵巍胜, 张博宇, 彭守仲 2023 *自旋电子科学与技术* (北京: 人民邮电出版社) 第 320—324 页]
- [14] Zhong Z Y 2015 *Magnetoresistive Sensors* (Beijing: Science Press) pp32-33 (in Chinese) [钟智勇 2015 *磁电阻传感器* (北京: 科学出版社) 第 32—33 页]
- [15] Ye X B 2022 *Sensors and Detection Technology* (Beijing: China Machine Press) pp84-86 (in Chinese) [叶湘滨 2022 *传感器与检测技术* (北京: 机械工业出版社) 第 84—86 页]
- [16] Nakano T, Fujiwara K, Oogane M 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 160503
- [17] Brown B J, Mitchell L K, Bheemarasetty V S, Cao H M, Kingsnorth J N, Sanes J N, Xiao G 2025 *Phys. Rev. Appl.* **24** 034063
- [18] Cardoso S, Leitao D C, Gameiro L, Cardoso F, Ferreira R, Paz E, Freitas P P 2014 *Microsyst. Technol.* **20** 793
- [19] Sun Y, Xia Q, Zhang D, Mou Q, Li Y, Xie L, Guang S, Cao Z, Zhu D, Zhao W 2024 *AIP Adv.* **14** 015304
- [20] Luo J, Xu Z, Jin Z, Wang M, Cai X, Chen J 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 31677
- [21] Han X F, Zhang Y, Wang Y Z, Huang L, Ma Q L, Liu H F, Wan C H, Feng J F, Yin L, Yu G Q, Yu T, Yan Y 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 128501
- [22] Liu J, Guan M, Gong Y, Ni F, Gao X, Su W, Wang Z, Jiang Z, Hu Z, Liu M 2024 *IEEE Electron Device Lett.* **45** 1289
- [23] Yao X P, Pan M C, Ji M H, Hu J F, Zhang Q, Li P S 2023 *Transducer Microsyst. Technol.* **42** 21 (in Chinese) [姚馨平, 潘孟春, 冀敏慧, 胡佳飞, 张琦, 李裴森 2023 *传感器与微系统* **42** 21]
- [24] Miyazaki T, Tezuka N 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **139** 231
- [25] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M, Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [26] Butler W H, Zhang X G, Schulthess T C, MacLaren J M 2001 *Phys. Rev. B* **63** 054416

- [27] Yuasa S, Nagahama T, Fukushima A, Suzuki Y, Ando K 2004 *Nat. Mater.* **3** 868
- [28] Parkin S S P, Kaiser C, Panchula A, Rice P M, Hughes B, Samant M, Yang S H 2004 *Nat. Mater.* **3** 862
- [29] Ikeda S, Hayakawa J, Ashizawa Y, Lee Y M, Miura K, Hasegawa H, Tsumoda M, Matsukura F, Ohno H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 082508
- [30] Scheike T, Wen Z, Sukegawa H, Mitani S 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 112404
- [31] Das Sarma S, Adam S, Hwang E H, Rossi E 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 407
- [32] Karpan V M, Khomyakov P A, Starikov A A, Giovannetti G, Zwierzycki M, Talanana M, Brocks G, van Den Brink J, Kelly P J 2008 *Phys. Rev. B* **78** 195419
- [33] Pan M C, Li P, Qiu W, Zhao J, Peng J, Hu J, Hu J, Tian W, Hu Y, Chen D, Wu X, Xu Z, Yuan X 2018 *J. Magn. Magn. Mater.* **453** 101
- [34] Thapa A, Sharma B 2025 *Adv Mater. Technol.* **10** e00133
- [35] Mi M, Xiao H, Yu L, Zhang Y, Wang Y, Cao Q, Wang Y 2023 *Materials Today Nano* **24** 100408
- [36] Fujiwara K, Oogane M, Yokota S, Nishikawa T, Naganuma H, Ando Y 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 07C710
- [37] Liu F, Zhou H, Yuan L, Cai Y 2023 *BMC Nurs* **22** 483
- [38] Yuan Z H, Huang L, Feng J F, Wen Z C, Li D L, Han X F, Nakano T, Yu T, Naganuma H 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 053904
- [39] Yuan Z H, Feng J F, Guo P, Wan C H, Wei H X, Ali S S, Han X F, Nakano T, Naganuma H, Ando Y 2016 *J. Magn. Magn. Mater.* **398** 215
- [40] Huang L, Yuan Z H, Tao B S, Wan C H, Guo P, Zhang Q T, Yin L, Feng J F, Nakano T, Naganuma H, Liu H F, Yan Y, Han X F 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 113903
- [41] Fujiwara K, Oogane M, Kanno A, Imada M, Jono J, Terauchi T, Okuno T, Aritomi Y, Morikawa M, Tsuchida M, Nakasato N, Ando Y 2018 *Appl. Phys. Express* **11** 023001
- [42] Oogane M, Fujiwara K, Kanno A, Nakano T, Wagatsuma H, Arimoto T, Mizukami S, Kumagai S, Matsuzaki H, Nakasato N, Ando Y 2021 *Appl. Phys. Express* **14** 123002
- [43] Matos F, Macedo R, Freitas P P, Cardoso S 2023 *AIP Adv.* **13** 025108
- [44] Akamatsu S, Oogane M, Tsumoda M, Ando Y 2020 *AIP Adv.* **10** 015302
- [45] Akamatsu S, Oogane M, Tsumoda M, Ando Y 2022 *AIP Adv.* **12** 075021
- [46] Roy T, Tsujikawa M, Kanemura T, Shirai M 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **498** 166092
- [47] Tsuchiya T, Roy T, Elphick K, Okabayashi J, Bainsla L, Ichinose T, Suzuki K Z, Tsujikawa M, Shirai M, Hirohata A, Mizukami S 2019 *Phys. Rev. Mater.* **3** 084403
- [48] Zhao X P, Lu J, Mao S W, Yu Z F, Wang H L, Wang X L, Wei D H, Zhao J H 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 285002
- [49] Zeng Z M, Khalili Amiri P, Katine J A, Langer J, Wang K L, Jiang H W 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 062412
- [50] Nakano T, Oogane M, Naganuma H, Ando Y 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 1
- [51] Nakano T, Oogane M, Furuichi T, Ando Y 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 012401
- [52] Santos P, Araujo P, Sørensen D, Matos F, Freitas P P, Cardoso S 2023 *IEEE Trans. Magn.* **59** 1
- [53] Willing S, Schlage K, Bocklage L, Ramin Moayed M M, Gurieva T, Meier G, Röhlshberger R 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 32343
- [54] Teixeira B M S, Timopheev A A, Caçoilo N, Cuchet L, Mondaud J, Childress J R, Magalhães S, Alves E, Sobolev N A 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 455003
- [55] Shao Y, Khalili Amiri P 2023 *Adv Mater. Technol.* **8** 2300676
- [56] Naik V B, Meng H, Liu R S, Luo P, Yap S, Han G C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 232401
- [57] Ota S, Ando A, Chiba D 2018 *Nat. Electron.* **1** 124
- [58] Yan S H, Zhou Z T, Cao Z Q, Yang Y D, Li Z, Chen W B, Leng Q W, Zhao W S 2021 *2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM) Chengdu, China, April 8–11, 2021* p1
- [59] Suess D, Bachleitner-Hofmann A, Satz A, Weitensfelder H, Vogler C, Bruckner F, Abert C, Prügl K, Zimmer J, Huber C, Luber S, Raberg W, Schrefl T, Brückl H 2018 *Nat. Electron.* **1** 362
- [60] Weitensfelder H, Brueckl H, Satz A, Pruegl K, Zimmer J, Luber S, Raberg W, Abert C, Bruckner F, Bachleitner-Hofmann A, Windl R, Suess D 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 054056
- [61] He G, Zhang Y, Xiao G 2020 *Phys. Rev. Appl.* **14** 034051
- [62] Chen J Y, Carroll N, Feng J F, Coey J M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 262402
- [63] Zhang X, Pan M, Lei S, Ji M, Hu Y, Hu J, Chen D, Peng J, Qiu W, Li P 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 052404
- [64] Choi J G, Hwang D G, Rhee J R, Lee S S 2010 *J. Magn. Magn. Mater.* **322** 2191
- [65] Manceau S, Brun T, Fischer J, Ducruet C, Sabon P, Cavoit C, Jannet G, Pinçon J L, Prejbeanu I L, Kretzschmar M, Baraduc C 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 082405
- [66] Zhang X, Bi Y, Chen G, Liu J, Li J, Feng K, Lv C, Wang W 2018 *AIP Adv.* **8** 125222
- [67] Feng Y, Chen J Y, Wu K, Wang J P 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **511** 166728
- [68] Bi R, Zhang H, Pan S, Liu X, Chen R, Wu S, Hu J 2025 *Sensors* **25** 4739
- [69] He G, Zhang Y, Qian L, Xiao G, Zhang Q, Santamarina J C, Patzek T W, Zhang X 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 242401
- [70] Wu Y, Xiao L, Hou S, Gao Z, Han L 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1
- [71] Han S, Wu Y, Wang Y, Chen J 2024 *Cryogenics* **138** 103803
- [72] Wu Y, Xiao L Y, Hou S Z 2019 *Physics* **48** 14 (in Chinese) [伍岳, 肖立业, 侯世中 2019 *物理* **48** 14]
- [73] Yang L, Sun K, Tao J, Zhang X, Huang D, Pan M, Hu J, Qiu W, Ji M, Hu Y, Li P, Chen D, Zhang Q, Peng J 2022 *Sens. Actuators, A* **342** 113658
- [74] Jiao Q, Jin Z, Zhang C, Chen J 2025 *Measurement* **242** 116143
- [75] Edelstein A S, Fischer G A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 7795
- [76] Guedes A, Patil S B, Cardoso S, Chu V, Conde J P, Freitas P P 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07E924
- [77] Guedes A, Patil S B, Wisniowski P, Chu V, Conde J P, Freitas P P 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 2554
- [78] Hu J, Pan M, Tian W, Chen D, Zhao J, Luo F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 244102
- [79] Du Q, Peng J, Qiu W, Ding Q, Pan M, Hu J, Sun K, Chen D, Pan L, Che Y, Zhang X, Li P, Zhang B 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 1824
- [80] Pan L, Pan M, Hu J, Hu Y, Che Y, Yu Y, Wang N, Qiu W, Li P, Peng J, Jiang J 2020 *Sensors* **20** 1440
- [81] Pan L, Hu J, Pan M, Che Y, Hu Y, Du Q, Sun K, Yu Y, Zhang Q, Peng J, Qiu W, Li P, Wang J 2021 *J. Magn. Magn. Mater.* **517** 167393
- [82] Kanno A, Nakasato N, Oogane M, Fujiwara K, Nakano T,

- Arimoto T, Matsuzaki H, Ando Y 2022 *Sci. Rep.* **12** 6106
- [83] Valadeiro J, Cardoso S, Macedo R, Guedes A, Gaspar J, Freitas P 2016 *Micromachines* **7** 88
- [84] Zhang J, Pan M, Du Q, Hu J, Sun K, Yu Y, Zhang X, Luo H 2021 *Micromachines* **12** 722
- [85] Kurashima K, Kataoka M, Nakano T, Fujiwara K, Kato S, Nakamura T, Yuzawa M, Masuda M, Ichimura K, Okatake S, Moriyasu Y, Sugiyama K, Oogane M, Ando Y, Kunagai S, Matsuzaki H, Mochizuki H 2023 *Sensors* **23** 646
- [86] Dey C, Yari P, Wu K 2023 *Nano Futures* **7** 012002
- [87] Murzin D, Mapps D J, Levada K, Belyaev V, Omelyanchik A, Panina L, Rodionova V 2020 *Sensors* **20** 1569
- [88] Su D, Wu K, Saha R, Peng C, Wang J P 2019 *Micromachines* **11** 34
- [89] An Z, Zhang L, Fan Y, Li Q, Li D 2025 *Sens. Actuators, A* **382** 116174
- [90] Lu W S, You R, Zhou Y, Yuan H Y, You Z 2020 *Chin. J. Sci. Instrum.* **41** 1 (in Chinese) [鲁文帅, 尤睿, 周扬, 袁宏永, 尤政 2020 *仪器仪表学报* **41** 1]
- [91] Ziegler P, Troster N, Schmidt D, Ruthardt J, Fischer M, Roth-Stielow J 2020 *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe) Lyon France, September 5-9, 2020* pP.1
- [92] Liu J, Lee C K, Pong P W T 2024 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **73** 1
- [93] Muehlenhoff C, Vogler C, Raberg W, Suess D, Albrecht M 2021 *IEEE Sensors J.* **21** 13176
- [94] Yang L, Sun K, Pan M, Zhang X, Peng J, Hu Y, Hu J, Qiu W, Li P 2023 *IEEE Sensors J.* **23** 240
- [95] Li R, Zhang S, Luo S, Guo Z, Xu Y, Ouyang J, Song M, Zou Q, Xi L, Yang X, Hong J, You L 2021 *Nat Electron* **4** 179
- [96] Xu Y, Yang Y, Zhang M, Luo Z, Wu Y 2018 *Adv Mater. Technol.* **3** 1800073
- [97] Shiogai J, Fujiwara K, Nojima T, Tsukazaki A 2021 *Commun. Mater.* **2** 102
- [98] Camsari K Y, Torumbalci M M, Borders W A, Ohno H, Fukami S 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 044049
- [99] Krizakova V, Perunkunnil M, Couet S, Gambardella P, Garello K 2022 *J. Magn. Magn. Mater.* **562** 169692
- [100] Finocchio G, Incorvia J A C, Friedman J S, Yang Q, Giordano A, Grollier J, Yang H, Ciubotaru F, Chumak A V, Naeemi A J, Cotofana S D, Tomasello R, Panagopoulos C, Carpentieri M, Lin P, Pan G, Yang J J, Todri-Saniai A, Boschetto G, Makasheva K, Sangwan V K, Trivedi A R, Hersam M C, Camsari K Y, McMahon P L, Datta S, Koiller B, Aguilar G H, Temporão G P, Rodrigues D R, Sunada S, Everschor-Sitte K, Tatsumura K, Goto H, Puliafito V, Åkerman J, Takesue H, Ventra M D, Pershin Y V, Mukhopadhyay S, Roy K, Ting Wang I-, Kang W, Zhu Y, Kaushik B K, Hasler J, Ganguly S, Ghosh A W, Levy W, Roychowdhury V, Bandyopadhyay S 2024 *Nano Futures* **8** 012001
- [101] Shao Q, Wang Z, Zhou Y, Fukami S, Querlioz D, Chua L O 2025 *Npj Spintronics* **3** 16

SPECIAL TOPIC — Applied magnetism

Research progress of performance optimization of tunnel magnetoresistive sensors*

LIU Yuanzhen¹⁾ LEI Shaoyu¹⁾ ZHANG Shiyi¹⁾ PAN Mengchun¹⁾²⁾
HU Yueguo¹⁾²⁾ HU Jiafei¹⁾²⁾ PENG Junping¹⁾²⁾ DU Qingfa¹⁾²⁾
ZHANG Qi¹⁾²⁾ LI Peisen^{1)2)†}

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

2) (*National Key Laboratory of Equipment State Sensing and Smart Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 24 November 2025; revised manuscript received 24 December 2025)

Abstract

Tunnel magnetoresistance (TMR) sensors have emerged as a leading technology in high-performance magnetic sensing due to their high sensitivity, low power consumption, and miniaturization. In order to meet the everchanging demands of cutting-edge applications such as biomagnetic imaging and smart grid monitoring, continuous performance enhancement is crucial. This paper systematically reviews the key strategies for optimizing TMR sensors, focusing on thin-film material engineering and sensitive microstructure design. Material advancements are dissected along two paths: developing high-sensitivity systems via MgO barriers and composite free layers, and creating wide-linear-range systems through anisotropy engineering, including both perpendicular (PMA) and in-plane (IMA) configurations, as well as dynamic methods such as electric-field and strain modulation. Structurally, we highlight innovations such as vortex-state magnetic tunnel junctions (MTJs) and magnetic flux concentrators to enhance linearity and sensitivity, as well as advanced noise modulation techniques that effectively suppress low-frequency $1/f$ noise. The practical effect of these optimizations is reflected in the fact that TMR sensors can now measure magnetocardiograms (MCG) outside shielded environments and provide high-accuracy current sensing in smart grids. The future development is directed toward novel material systems that pursue either enhanced sensitivity or an extended linear range, the realization of monolithic three-axis vector sensors, and the deep integration of TMR technology with artificial intelligence for smart sensing systems. This work provides a comprehensive reference for advancing TMR sensor technology and its applications in high-precision magnetic field detection.

Keywords: tunneling magnetoresistance magnetic sensor, performance optimization, thin film material, magnetic tunnel junction structure design

DOI: [10.7498/aps.75.20251597](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251597)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251597](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251597)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2023YFB2407700).

† Corresponding author. E-mail: lips13@163.com

隧道磁阻传感器性能优化研究进展

刘远臻 雷绍钰 张诗怡 潘孟春 胡悦国 胡佳飞 彭俊平 杜青法 张琦 李裴森

Research progress of performance optimization of tunnel magnetoresistive sensors

LIU Yuanzhen LEI Shaoyu ZHANG Shiyi PAN Mengchun HU Yueguo HU Jiafei PENG Junping
DU Qingfa ZHANG Qi LI Peisen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060803 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251597

CSTR: 32037.14.aps.75.20251597

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251597>

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

隧穿磁阻传感器研究进展

Research progress of tunneling magnetoresistance sensor

物理学报. 2022, 71(5): 058504 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211883>

基于MgO磁性隧道结的五种隧穿磁电阻线性传感单元性能比较

Comparison of performance among five types of tunneling magnetoresistance linear sensing units based on MgO magnetic tunnel junction

物理学报. 2022, 71(23): 238502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221278>

石墨烯谐振式力学量传感器研究进展

Research progress of electromechanical graphene resonant sensors

物理学报. 2022, 71(12): 126801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220215>

柱状和声学表面结构的压电超声换能器

Piezoelectric ultrasonic transducers with columnar and acoustic surface structures

物理学报. 2025, 74(21): 214304 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250901>

高温压电振动传感器及其压电材料研究进展

Research progress of high-temperature piezoelectric vibration sensors and piezoelectric materials

物理学报. 2025, 74(2): 027702 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20240906>

碳基分子磁隧道结的设计和自旋输运性质研究

Design and spin-dependent transport properties of carbon-based molecular magnetic tunnel junctions

物理学报. 2025, 74(21): 217201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250880>