

自由层磁性交换偏置效应调控隧穿磁电阻 磁传感单元性能*

丰家峰^{1)2)†} 陈星³⁾ 魏红祥¹⁾ 陈鹏¹⁾ 兰贵彬¹⁾
刘要稳³⁾ 郭经红⁴⁾ 黄辉⁴⁾ 韩秀峰¹⁾

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

3) (同济大学物理科学与工程学院, 上海 200082)

4) (国网智能电网研究院有限公司, 北京 102209)

(2023年6月17日收到; 2023年8月7日收到修改稿)

优化样品结构参数、磁场退火热处理、串并联桥式设计、施加电流热效应以及额外偏置磁场等是调控隧穿磁电阻 (tunnel magnetoresistance, TMR) 磁传感性能的常用方法. 借助这些方法可以提高 TMR 磁传感的灵敏度、抗噪声指数、线性度和线性磁场范围等关键性能参数. 其中, 通过改变 TMR 磁传感单元的钉扎层、自由层以及势垒层材料和厚度等样品结构参数能够改变交换偏置场, 进而提升 TMR 磁传感性能参数. 本文基于微磁学仿真和实验测量发现, 通过改变自由层 CoFeB/Ru/NiFe/IrMn 中的交换耦合作用, 可以调制 TMR 自由层的交换偏置场大小和提升 TMR 磁传感单元的性能. 当逐步增强 IrMn 钉扎效果时, TMR 磁传感单元的线性磁场范围随之增大, 但是磁场灵敏度降低; 在 ± 0.5 倍自由层 (主要是 CoFeB 层) 磁矩变化范围内所有 TMR 磁传感单元的线性度最佳.

关键词: 交换偏置效应, 磁性隧道结, 隧穿磁电阻线性传感单元, 磁传感器件

PACS: 71.70.Gm, 85.75.Mm, 85.70.Kh, 85.75.Ss

DOI: 10.7498/aps.72.20231003

1 引言

磁传感器的发展经历了从最初的霍尔传感器到各向异性磁电阻传感器、巨磁电阻传感器, 再到隧穿磁电阻 (tunnel magnetoresistance, TMR) 传感器这样一个过程^[1]. 后三类磁电阻传感器具有微型化、高灵敏度、低功耗、低成本、快速响应等特点, 在汽车检测、无损检测及电网、新能源汽车等领域占据了重要地位. 近年来, 特别是随着人工智能和万物互联的快速发展, 这三类磁电阻传感器正

凭借其优异性能拓宽到更广阔的应用市场.

交换耦合现象是自旋电子学中的重要研究领域之一, 通常发生在铁磁层/反铁磁层双层薄膜结构 (简称为反铁磁基双层薄膜结构)^[2-5] 或者软磁/硬磁耦合体系^[6,7] 中. 在反铁磁基双层薄膜结构中, 如果反铁磁层的自旋未被补偿, 则交换耦合作用来源于“铁磁层/反铁磁层”中相邻界面处原子层之间的磁性交换耦合. 迄今为止, 旨在优化交换偏置的大多数研究早期主要集中在反铁磁基双层薄膜结构中的铁磁层, 例如, 建立了铁磁层厚度和温度对交换偏置强度的依赖关系^[4,8-13]. 众所周知,

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB3201800, 2021YFB3201801) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiafengfeng@iphy.ac.cn

交换偏置效应在自旋电子学元器件中扮演着不可或缺的角色. 自旋阀和磁性隧道结 (magnetic tunnel junctions, MTJ) 等核心结构中都采用了具有交换偏置效应的反铁磁基双层薄膜结构^[14]. 这些器件已经成功应用于磁读头、磁存储、磁传感等领域, 产生了巨大商业价值. 由于交换偏置效应的存在, 以 TMR 为存储单元的磁存储器件在零磁场附近出现了明显的高低电阻态, 以实现“0”和“1”的存储功能. 与此类似, 磁传感器利用交换偏置效应可以有效调节灵敏度、线性磁场范围等, 从而优化和提升磁传感器的关键性能参数. 例如, 一种无交换偏置的磁性多层膜 (如 Fe/Cr/Fe)^[15] 在仅具有层间交换耦合的情况下, 会导致该类型多层膜自身具有较高的饱和磁场, 这对基于该类型磁性多层膜的磁传感器的应用不利.

因此, 通过合理利用交换偏置效应, 可以设计并制造出具有优越性能的磁传感器, 满足不同应用场景对于灵敏度、线性范围等方面的要求. 这对于磁传感技术的发展具有重要意义, 并推动磁性材料和器件的研究与应用. 本文以 TMR 磁传感器为例, 讨论了影响 TMR 磁传感性能的主要因素和样品结构参数对 TMR 磁传感性能的影响. 在此基础上, 结合实验和微磁学仿真技术, 揭示 TMR 磁传感单元的样品结构参数如何通过交换偏置效应影响磁传感性能参数的物理机理^[16].

2 TMR 磁传感关键性能的影响因素

TMR 磁传感关键性能参数包括灵敏度、线性度、线性磁场范围、低频噪声指数. 此外, 还包括 TMR 磁传感单元自身的低功耗、高 TMR 比值、快速响应能力, 以及在实际应用场景 (表 1) 中关注的性能参数. 在智能电网领域, 针对负荷测量、设备电气状态监测和设备机械状态等应用场景, 磁传感器需要具有抗大电流、大感生磁场冲击、防静电击穿、瞬时脉冲信号响应、高寒高热高湿以及兼容复杂电磁环境等性能. 例如, 针对高压输配电线路上的电流检测应用场景, 采用带有聚磁环的 TMR 磁传感器进行非接触式电流监测的结构布局, 即将被测电流导线穿过磁环、TMR 磁传感芯片置于磁环气隙中央. 这样, 在解决了温漂等多种因素对测量精度的影响后, 可满足对输配电线路的电流精准检测需求. 在新能源汽车领域, 针对其动

力、车身、座椅和辅助驾驶等应用场景, 磁传感器需要具有超大量程、宽动态范围、全温区 ($-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高精度保障等苛刻特性. 而在航空航天领域, 磁传感器需要能够在外太空环境经受太阳风等高强度等离子体的冲击, 以及复杂的电磁场环境. 综上所述, 磁传感器除了具备上述基本性能外, 不同应用场景还会有特定的需求和优化要求. 因此, 在设计和优化磁传感器时, 需要针对具体的应用场景进行调控.

表 1 智能电网和新能源汽车领域磁传感器的潜在应用场景

Table 1. Potential application scenarios of magnetic sensing devices in the fields of smart grids and new energy vehicles.

智能电网领域	新能源汽车领域
负荷测量磁传感	动力磁传感
设备电气状态监测磁传感	车身、座椅磁传感
设备机械状态监测磁传感	辅助驾驶磁传感

图 1 展示了调控 TMR 磁传感关键性能参数的主要方法. 这些方法包括改变样品结构参数 (本文主要讨论内容)、外加磁场退火热处理^[17]、串并联桥式结构设计^[18]、施加电流焦耳热^[16,19]以及额外偏置磁场方式 (通过人为外加偏置磁场^[19]或永磁材料^[20]提供). 其中, 串并联桥式结构与集成的调控方法可以降低 TMR 磁传感器的噪声指数, 提高稳定性, 降低外部复杂环境的影响. 另外, 通过施加额外永磁体提供偏置磁场的方式

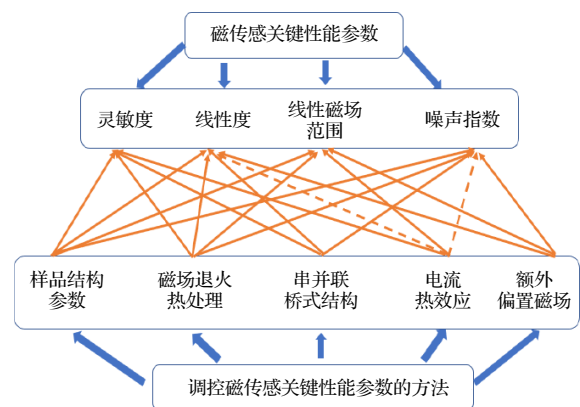


图 1 磁传感关键性能参数以及调控磁传感关键性能参数的主要方法 (黄色虚线代表需进一步的实验结果来佐证)

Fig. 1. Key performance parameters of magnetoresistive sensing and main methods for modulating them (Yellow dashed lines indicate that further experimental results are needed).

已经应用到磁读头中,大大提高了磁盘的记录密度^[21].除此之外,磁通聚集器的方式可显著提高磁传感器性能,如灵敏度等^[22].通过这些调控磁传感性能的方法,可以综合调控和改善 TMR 磁传感单元和磁传感器的性能参数^[16],为多种应用场景开发高性能的磁传感器奠定坚实基础.

TMR 磁传感单元是 TMR 磁传感器的核心组成部分,其性能参数对整个磁传感器的性能起着至关重要的作用. TMR 磁传感单元是由 MTJ 构成,其基本构成是“反铁磁性层/铁磁性层 1/势垒层/铁磁性层 2”.其中反铁磁性层/铁磁性层 1 被称为钉扎层结构,铁磁性层 2 被称为自由层结构,如图 2(a) 所示.通过优化 MTJ 结构和相关参数,可以实现高性能的 TMR 磁传感器的设计与制造.磁性隧道的相关参数有非易失性(也称非挥发性,主要针对磁存储)、高 TMR 比值、低噪声指数、低功耗和快速响应能力等.其中,高 TMR 比值主要是在以单晶 MgO 为势垒层的 MTJ 中被观察到,其室温 TMR 比值可达 200% 以上^[17].

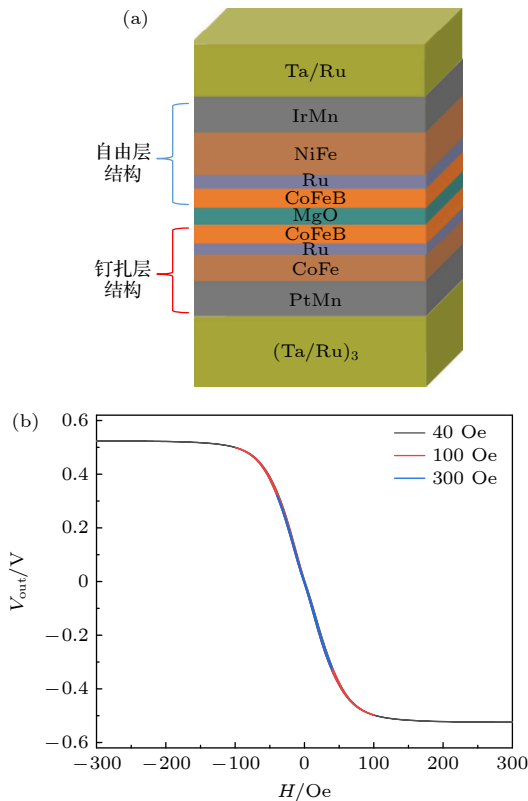


图 2 (a) TMR 磁传感单元实验结构; (b) TMR 磁传感单元的线性输出特性曲线

Fig. 2. (a) Experimental structure of TMR magnetoresistive sensing unit; (b) linear output curve of TMR magnetoresistive sensing unit.

3 模拟结果与讨论

在 TMR 磁传感单元中,除了钉扎层自身的交换偏置效应外^[14,23–26],基于磁性间接双交换耦合结构的自由层中的交换偏置效应同样重要.这是因为自由层中的交换偏置大小可直接影响 TMR 磁传感的灵敏度和线性磁场范围等.本文模拟结果显示,自由层中的交换偏置效应可以改变线性磁场范围内磁电阻随外加磁场的变化,进而影响 TMR 磁传感单元的磁传感性能.

3.1 实验样品和微磁学模型

图 2(a) 展示了具有磁性间接双交换耦合作用的 MgO 型 MTJ 样品.在该隧道结中,钉扎层的结构为 PtMn/CoFe/Ru/CoFeB,自由层结构为 CoFeB/Ru/NiFe/IrMn,更多实验细节可参考文献^[18].经过两次外磁场下退火热处理后,在无外场时,自由层结构的磁矩沿 y 轴(短轴)方向,钉扎层结构的磁矩沿 x 轴(长轴)方向.同时,通过施加外加偏压(0.1 V)和磁场,在 ± 40 Oe 的磁场范围内获得的典型线性 TMR 磁电阻曲线见图 2(b).

微磁学仿真模型采用了实际 TMR 磁传感单元的椭圆形形状.在数值计算中,采用有限差分方法进行样品离散化(图 3),其中自由层在 x - y 薄膜平面内采用 $10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$ 的尺寸进行离散,在 z 方向上按照薄膜厚度 t 进行离散.外磁场沿 x 轴方向施加,自由层结构的磁矩在磁场作用下发生转动,而钉扎层中 CoFe 层和 PtMn 层之间的强交换耦合作用使 CoFe 层磁矩被牢牢钉扎在 x 方向.本文模拟的重点是研究自由层的磁场感应曲线,

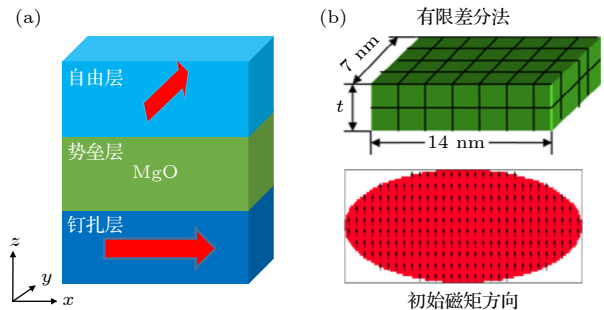


图 3 (a) TMR 磁传感单元主要结构示意图; (b) 微磁学模型建立细节

Fig. 3. (a) Schematic diagram of TMR magnetoresistive sensing unit; (b) establishment details of micromagnetic simulation model.

并综合考虑钉扎层对其特性的影响, 以获得最优 MTJ 结构, 从而实现对 TMR 磁传感单元的优化目标.

选取长 $14\ \mu\text{m}$, 宽 $7\ \mu\text{m}$, 厚度为 $5\ \text{nm}$ 的椭圆柱为自由层结构, 其中铁磁层 CoFeB 参数选取包括饱和磁化强度 $M_s = 1 \times 10^6\ \text{A/m}$, 交换常数 $A = 2 \times 10^{-11}\ \text{J/m}$, 磁晶各向异性常数 $K_u = 20\ \text{J/m}^3$, 方向沿 x 轴. 有限差分的格子大小: $5\ \text{nm} \times 5\ \text{nm} \times 5\ \text{nm}$. 本文中, 钉扎层中 CoFe 与 CoFeB 由于层间交换耦合作用使其磁矩保持反平行排列, 钉扎层作为一个整体其剩余磁矩很小. 因此, 钉扎层磁矩对自由层的散磁场作用较弱. 在微磁学模拟中, 通过测试发现, 当考虑 $0.1\ \text{Oe}$ 大小的散磁场时, 模拟的 MTJ 磁化曲线及其灵敏度与实验结果接近^[18]. 另外, 实验中通过两次退火过程之后, 自由层上方的 IrMn 钉扎层会产生一个 y 方向的交换偏置场 (H_{bias}) 作用于自由层 (图 3(b)). 上述 TMR 磁传感单元的这些物性参数保证了自由层和钉扎层的磁矩形成一个相互垂直的磁性结构, 从而具备了线性磁传感输出功能. 通过微磁学模拟方法, 本文深入探讨了自由层结构的交换偏置场 H_{bias} 的强弱对

TMR 磁传感单元中线性磁传感输出曲线的影响 (图 4).

3.2 微磁学模拟结果及讨论

图 4 展示了 TMR 随外磁场变化的磁矩响应仿真曲线. 发现, 无论自由层 (CoFeB/Ru/NiFe/IrMn) 中 IrMn 的钉扎场 H_{bias} 怎么变化, 都能够一定磁场范围内获得线性度较好的 TMR 磁电阻曲线. 此外, 这种具有磁性间接双交换耦合作用的 TMR 磁传感单元, 其饱和磁场、线性灵敏度和磁场工作区间均与自由层中 IrMn 产生的钉扎场 H_{bias} 大小密切相关. 随着钉扎场从 $10\ \text{Oe}$ 上升到 $100\ \text{Oe}$, TMR 磁传感单元的线性响应范围 (linear field range, LFR) 逐渐增大, 但 (近似) 灵敏度 S ($\pm 0.5 m_x$ 范围内 Δm_x 的变化量与线性磁场范围的比值) 不断下降 (图 5). H_{bias} 为 $100\ \text{Oe}$ (图 4(d)) 时获得的 TMR 磁传感单元线性输出曲线与图 2(b) 所示的 TMR 磁电阻单元实测曲线在线性工作磁场区间方面较为接近.

微磁学模拟中自由层中的钉扎场 H_{bias} 即对应于实验中测得的交换偏置场^[17]. 实验中通过调节

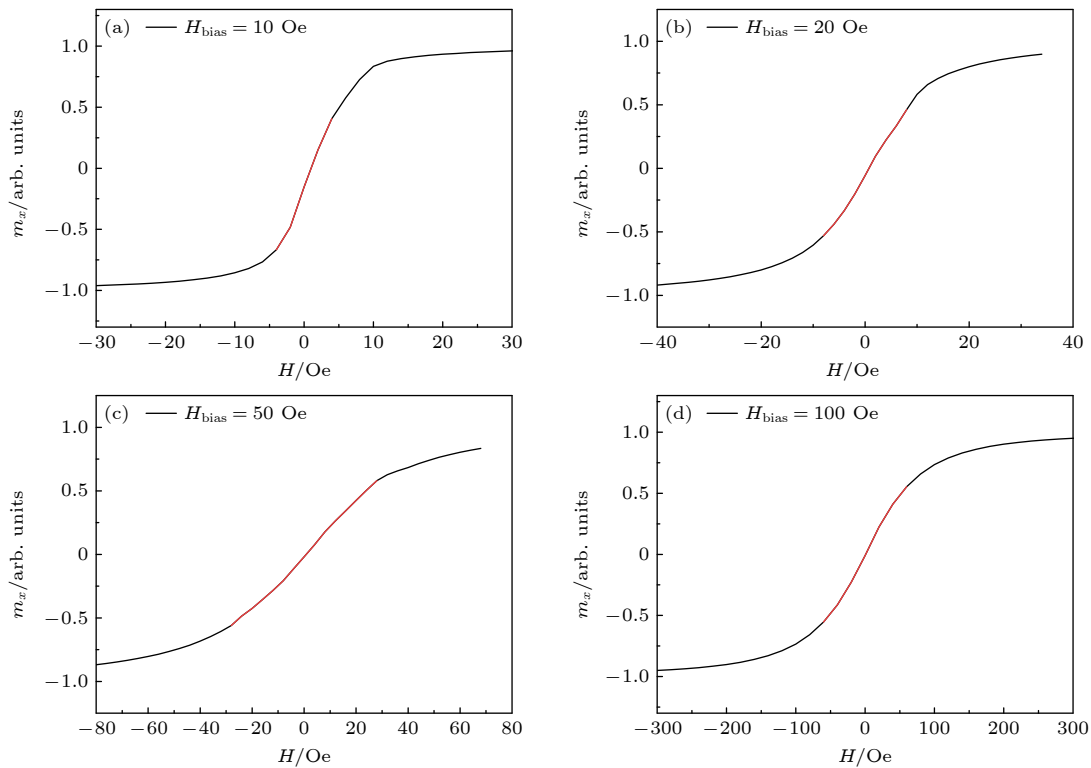


图 4 不同交换偏置场作用下的磁矩对外磁场的变化曲线 (红色实线代表 ± 0.5 倍自由层磁矩范围内线性输出曲线) (a) $10\ \text{Oe}$; (b) $20\ \text{Oe}$; (c) $50\ \text{Oe}$; (d) $100\ \text{Oe}$

Fig. 4. Linear output simulation curves under different exchange-biased fields of the free layer (Solid red lines represents linear output curves within the range of ± 0.5 times the magnetic moment of the free layer): (a) $10\ \text{Oe}$; (b) $20\ \text{Oe}$; (c) $50\ \text{Oe}$; (d) $100\ \text{Oe}$.

Ru 层厚度可以改变自由层 CoFeB/Ru/NiFe/IrMn 中交换偏置场的大小. 随着 Ru 层厚度的增大, 交换耦合作用减弱, 交换偏置场降低, 导致线性磁场范围减小, 如图 5(a) 所示. 另外发现, ± 0.5 倍自由层磁矩 (主要来自 CoFeB 层的贡献) 范围内线性度较好 (图 4 中红色实线所示曲线范围). 基于此, 本文提取了不同 H_{bias} 情况下 $\pm 0.5m_x$ 范围内的 (近似) 灵敏度 S , 如图 5(b) 所示. 发现, 随着 H_{bias} 增大, (近似) 灵敏度 S 降低, 该结论和实验结果一致^[17,19]. 因此, TMR 磁传感单元中自由层的交换偏置场大小直接影响传感器的灵敏度、线性磁场范围以及线性度等性能参数.

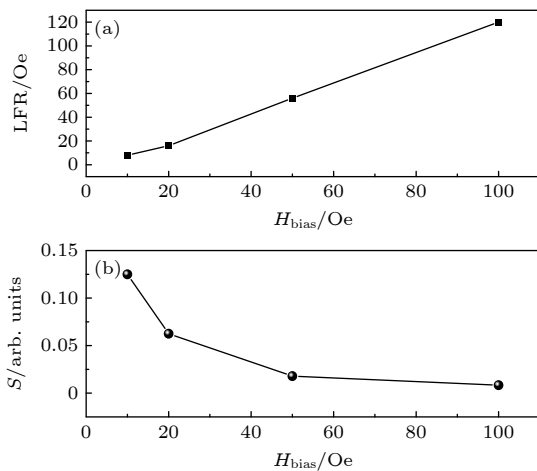


图 5 微磁学仿真得到的 TMR 磁传感单元线性磁场范围 (a) 和 (近似) 灵敏度 (b) 随着自由层交换偏置作用的变化关系

Fig. 5. Relationship between the linear magnetic field range (a) and sensitivity (b) of TMR magnetoresistive sensing unit obtained by the micromagnetic simulation method and the exchange-biased field of the free layer.

综上所述, 自由层结构中的交换偏置效应在 TMR 磁传感单元的设计和 optimization 中具有重要作用. 除交换偏置效应外, 在 TMR 磁传感器件的研究和应用中还应该考虑其他调控磁传感性能的方法, 如外加磁场退火热处理、施加额外偏置磁场或采用磁通聚集等. 通过综合考虑多种调控磁传感性能的方法, 可以进一步优化和提升 TMR 磁传感单元的整体性能. 因此, TMR 磁传感单元的设计优化是一个多方面的问题, 不能局限于单一的优化调控方法.

4 结 论

通过综合分析磁传感器件的应用场景和性能

指标, 以及调控这些指标的方法, 重点讨论了 TMR 磁传感单元的样品结构参数对其磁传感性能的影响, 并特别关注了交换偏置效应的调控. 不同于通常改变钉扎层中交换偏置效应的方法, 本文基于微磁学模拟研究了具有双交换耦合作用的 TMR 磁传感单元中自由层的交换偏置效应对灵敏度、线性磁场范围等性能指标的影响. 研究表明, 微磁学模拟和实验结果具有一致性, 自由层结构中的交换偏置效应是影响 TMR 磁传感单元性能的重要因素之一. 本文不仅为 TMR 磁传感器件的性能设计和优化提供了新思路, 还丰富了磁传感性能调控的维度.

参考文献

- [1] Zhou Z T, Yan S H, Zhao W S, Leng Q W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 058504 (in Chinese) [周子童, 闫韶华, 赵巍胜, 冷群文 2022 *物理学报* **71** 058504]
- [2] Meiklejohn W H, Bean C P 1956 *Phys. Rev.* **102** 1413
- [3] Stamps R L 2000 *J. Phys. D* **33** R247
- [4] Nogués J, Schuller I K 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **192** 203
- [5] Nogués J, Sort J, Langlais V, Skumryev V, Suriñach S, Muñoz J S, Baró M D 2005 *Phys. Rep.* **422** 65
- [6] Binek C, Polisetty S, He X, Berger A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 067201
- [7] Tang M H, Zhang Z Z, Tian S Y, Wang J, Ma B, Jin Q Y 2015 *Sci. Rep.* **5** 10863
- [8] Zhou S M, Liu K, Chien C L 1998 *Phys. Rev. B* **58** R14717
- [9] Zhou S M, Liu K, Chien C L 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 6659
- [10] Berkowitz A E, Takano K 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **200** 552
- [11] Morales R, Basaran A C, Villegas J E, Navas D, Soriano N, Mora B, Redondo C, Batlle X, Schuller I K 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 097202
- [12] Malozemoff A M 1987 *Phys. Rev. B* **35** 3679
- [13] Feng J F, Liu H F, Wei H X, Zhang X G, Ren Y, Li X, Wang Y, Wang J P, Han X F 2017 *Phys. Rev. Appl.* **7** 054005
- [14] 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]
- [15] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, Zinn W 1989 *Phys. Rev. B* **39** 4828
- [16] Feng J F, Wei H X, Yu G Q, Huang H, Guo J H, Han X F 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 018501 (in Chinese) [丰家峰, 魏红祥, 于国强, 黄辉, 郭经红, 韩秀峰 2023 *物理学报* **72** 018501]
- [17] Chen J Y, Feng J F, Coey J M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 142407
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Chaves R C, Cardoso S, Ferreira R, Freitas P P 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 07E506
- [21] Freitas P P, Ferreira R, Cardoso S, Cardoso F 2007 *J. Phys. Cond. Mat.* **19** 165221
- [22] 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
- [23] Han X F, Oogane M, Kubota H, Ando Y, Miyazaki T 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 283
- [24] Parkin S S P, Kaiser C, Panchula A, Rice P M, Hughes B, Samant M, Yang S H 2004 *Nat. Mater.* **3** 862
- [25] Han X F, Wei H X, Peng Z L, Yang H D, Feng J F, Du G X, Sun Z B, Jiang L X, Ma M, Wang Y, Wen Z C, Liu D P, Zhan W S 2007 *J. Mater. Sci. Tech.* **23** 304
- [26] Feng J F, Feng G, Coey J M D, Han X F, Zhan W S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 102505

Key performance of tunneling magnetoresistance sensing unit modulated by exchange bias of free layer*

Feng Jia-Feng^{1)2)†} Chen Xing³⁾ Wei Hong-Xiang¹⁾ Chen Peng¹⁾

Lan Gui-Bin¹⁾ Liu Yao-Wen³⁾ Guo Jing-Hong⁴⁾

Huang Hui⁴⁾ Han Xiu-Feng¹⁾

1) (*Beijing National Laboratory of Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200082, China*)

4) (*State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China*)

(Received 17 June 2023; revised manuscript received 7 August 2023)

Abstract

Optimizing sample structural parameters, magnetic field annealing, series-parallel bridge design, current thermal effect, and additional bias magnetic field are common methods used for controlling the tunneling magnetoresistance (TMR) magnetic sensing performance. By employing these methods, key performance parameters of TMR sensors such as sensitivity, noise resistance index, linearity, and linear magnetic field range can be optimized and improved. Changing the sample structural parameters, such as the pinning layer, free layer, and barrier layer materials and thickness of the TMR magnetic sensing unit, can change the exchange bias field and thus enhance the TMR magnetic sensing performance parameters. In this study, through micromagnetic simulation and experimental measurements, it is discovered that by modifying the exchange coupling in the free layer CoFeB/Ru/NiFe/IrMn, the exchange bias field magnitude of the TMR free layer can be modulated, leading to improved performance of the TMR magnetic sensing unit. As the IrMn pinning effect is gradually enhanced, the linear magnetic field range of the TMR magnetic sensing unit increases, but the magnetic field sensitivity decreases. It is further found that the linearity of the TMR magnetic sensor is optimal within a range of ± 0.5 times the magnetic moment variation of the free layer (primarily the CoFeB layer). Through our work, the effect of exchange bias field (caused by the pinning IrMn of the free layer) on the magnetic sensing performance is verified in the TMR magnetic sensing unit. Our work demonstrates more possibilities for designing and optimizing TMR magnetic sensors, enriching the dimensions of magnetic sensing performance modulation.

Keywords: exchange bias effect, magnetic tunnel junctions, tunneling magnetoresistance linear sensing unit, magnetoresistive sensors

PACS: 71.70.Gm, 85.75.Mm, 85.70.Kh, 85.75.Ss

DOI: 10.7498/aps.72.20231003

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2021YFB3201800, 2021YFB3201801).

† Corresponding author. E-mail: jiafengfeng@iphy.ac.cn



自由层磁性交换偏置效应调控隧穿磁电阻磁传感单元性能

丰家峰 陈星 魏红祥 陈鹏 兰贵彬 刘要稳 郭经红 黄辉 韩秀峰

Key performance of tunneling magnetoresistance sensing unit modulated by exchange bias of free layer

Feng Jia-Feng Chen Xing Wei Hong-Xiang Chen Peng Lan Gui-Bin Liu Yao-Wen Guo Jing-Hong
Huang Hui Han Xiu-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 197103 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231003>

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

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>

MgO基磁性隧道结温度-偏压相图的理论研究

Theoretical study on temperature-bias phase diagram of MgO-based magnetic tunnel junctions

物理学报. 2021, 70(10): 107302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201905>

Heusler合金 $Mn_{50x}Cr_xNi_{42}Sn_8$ 的相变、磁性与交换偏置效应

Phase transformation, magnetic properties, and exchange bias of Heusler alloy $Mn_{50x}Cr_xNi_{42}Sn_8$

物理学报. 2020, 69(5): 058102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191551>

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>

基于磁性隧道结的群体编码实现无监督聚类

Implementation of unsupervised clustering based on population coding of magnetic tunnel junctions

物理学报. 2022, 71(14): 148506 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220252>

EuS/Ta异质结的极大磁电阻效应

Infinite magnetoresistance of EuS/Ta heterostructure

物理学报. 2021, 70(4): 047401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201213>