

综述

# 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\*

韩秀峰<sup>1)†</sup> 张雨<sup>1)</sup> 丰家峰<sup>1)</sup> 陈川<sup>2)</sup> 邓辉<sup>2)</sup> 黄辉<sup>2)</sup>  
郭经红<sup>2)</sup> 梁云<sup>2)</sup> 司文荣<sup>3)</sup> 江安烽<sup>3)</sup> 魏红祥<sup>1)</sup>

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) (国网智能电网研究院有限公司, 北京 102209)

3) (国网上海市电力公司, 上海 200437)

(2022 年 6 月 30 日收到; 2022 年 8 月 4 日收到修改稿)

磁性隧道结经过结构优化和性能提升已成功应用于磁存储、磁传感、磁逻辑等多种自旋电子学器件中. 磁传感是利用磁性隧道结的自由层和钉扎层之间特殊的磁结构来实现隧穿磁电阻 (TMR) 随外加磁场变化而呈现的线性输出. 迄今为止, 人们基于 MgO 磁性隧道结已经研发出五种 TMR 线性传感单元, 分别是人工间接双交换耦合型、磁场偏置型、面内/面外垂直型、超顺磁型的 TMR 线性传感单元. 本文梳理了这五种 TMR 线性传感单元并对它们的磁传感性能进行了系统比较, 为人们探索和发现磁敏传感器的相关应用提供了帮助.

**关键词:** 磁性隧道结, 隧穿磁电阻线性传感单元, 磁敏传感器

**PACS:** 85.75.Mm, 85.70.Kh, 85.75.Ss

**DOI:** 10.7498/aps.71.20221278

## 1 引言

自从 1975 年自旋极化的隧穿磁电阻 (tunneling magnetoresistance, TMR) 效应发现以来, 磁性隧道结 (magnetic tunnel junction, MTJ) 的自旋输运研究逐步深入<sup>[1-8]</sup>. 首先是 1995 年在非晶  $\text{AlO}_x$  势垒的 MTJ 中首次发现了室温 TMR 效应<sup>[2,3]</sup>, 随后  $\text{AlO}_x$  势垒的 MTJ 制备技术被越来越多的课题组掌握, 并且室温 TMR 比值也越做越高<sup>[9,10]</sup>. 与此同时, 理论预测了单晶势垒的 MTJ 中有更大的 TMR 比值. 如 Oleinik 等<sup>[11]</sup> 根据第一性原理计算方法研究了  $\text{Co}(111)/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(0001)/\text{Co}$  三明治型 MTJ 的输运性质, 紧接着 Butler 等<sup>[5]</sup> 以及 Mathon 和 Umersky<sup>[6]</sup> 在单晶  $\text{Fe}(100)/\text{MgO}(100)/\text{Fe}(100)$

的 MTJ 中预言了超过 1000% 的 TMR 比值. 由此可知, 相比于非晶  $\text{AlO}_x$  势垒, 单晶势垒的 MTJ 具有更高的室温 TMR 比值<sup>[7,8]</sup>. 由此, MTJ 的自旋输运研究进入到单晶 MgO 为势垒的快车道, 在理论预言 7 年后, 日本课题组就在高温退火后的  $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$  这种赝自旋阀型 MTJ 中获得了室温超过 600%(1100%@5 K) 的 TMR 比值<sup>[12]</sup>. 随后, 具有高 TMR 的单晶 MgO 势垒的 MTJ 被更多的实验室做出来<sup>[13]</sup>. 紧接着, 在高 TMR 的 MTJ 材料体系中有更多类型的单晶势垒材料 (如  $\text{AB}_2\text{O}_4$  型尖晶石氧化物  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  等) 被预言<sup>[14]</sup> 并且被证实.

在利用磁控溅射制备技术制备出的  $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$  类型的 MTJ 中<sup>[7,12,13]</sup>,  $\text{CoFeB}$  在制备态是非晶的, 经过高温退火后在  $\text{CoFeB}/\text{MgO}$

\* 国家电网有限公司总部管理科技项目“新型高灵敏度、高可靠性磁敏传感机理研究及材料制备”(批准号: 5700-202058381A-0-0-00) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xfhan@iphy.ac.cn

界面处形成晶化的 CoFe/MgO<sup>[15]</sup>, 从而大幅度提高这类 MTJ 的 TMR 比值<sup>[12]</sup>. 另外, 在 CoFeB/MgO/CoFeB 的 MTJ 中铁磁性金属电极 CoFeB 随着厚度的降低能够从面内各向异性转变到垂直各向异性<sup>[16]</sup>; 在完全垂直的 CoFeB/MgO/CoFeB MTJ 中可以获得超过 120% 的室温 TMR 比值<sup>[17]</sup>. 因此, 如果能够制备出 CoFeB(面内各向异性)/MgO/CoFeB(垂直各向异性) 类型的 MTJ, 则可以实现 TMR 线性输出的磁传感功能<sup>[18]</sup>. 在单个 MgO MTJ 中, 除了上述获得磁传感的方法外, 还可以利用均具有面内各项异性的铁磁性电极和 MgO 势垒组成的 MTJ, 经过二次退火等工艺技术<sup>[19,20]</sup> 或利用铁磁性金属电极的形状各向异性<sup>[21]</sup> 后, 实现 TMR 线性输出的磁传感功能<sup>[19–22]</sup>.

MTJ 作为自旋电子学的一个重要研究方向, 在磁传感方面有着巨大的应用潜能<sup>[18–22]</sup>(我国智能传感器市场分析报告预计 2022 年磁传感器的全球商业市场达到 25 亿美元<sup>[23]</sup>). 截至目前, 磁敏传感器已广泛应用于包括工业、生物医学、地球物理、航空航天和汽车等多个领域. 鉴于磁敏传感器的广泛应用以及 MTJ 线性磁传感的重要性<sup>[24]</sup>, 本文主要针对五种基于单一 MgO MTJ 结构的 TMR 线性传感单元的性能进行了系统比较, 并且探讨了

TMR 线性传感单元的设计优化方向. 与文献<sup>[24]</sup> 中的结果相比, 本文专注于五种基于 MgO MTJ 的 TMR 线性传感单元的性能参数比对以及它们各自在应用时的可能表现. 可以发现, TMR 线性传感单元在应用时需要考虑到它的综合性能参数; 另外, 尽管每种类型的 TMR 线性传感单元的性能指标有差异, 但不同 TMR 线性传感单元可适用于不同类型的 TMR 磁敏传感器, 从而满足 TMR 磁敏传感器多样性的应用需求.

## 2 构成 TMR 线性传感单元的 MTJ 结构

截至目前, 人们研发出的以 MgO MTJ 结构为基础的 TMR 线性传感单元主要有五种, 分别是超顺磁型、面外垂直型、面内垂直型、人工间接双交换耦合型和磁场偏置型的 TMR 线性传感单元, 如图 1 和表 1 所示. 这五种 TMR 线性传感单元的探测层在面内磁场的作用下可输出线性磁传感信号. 下面在介绍这几种 TMR 线性传感单元的同时根据 TMR 磁敏传感器的主要性能参数 (TMR 比值、灵敏度、线性磁场范围、噪声指数、非线性度等) 来对它们的性能进行比较.

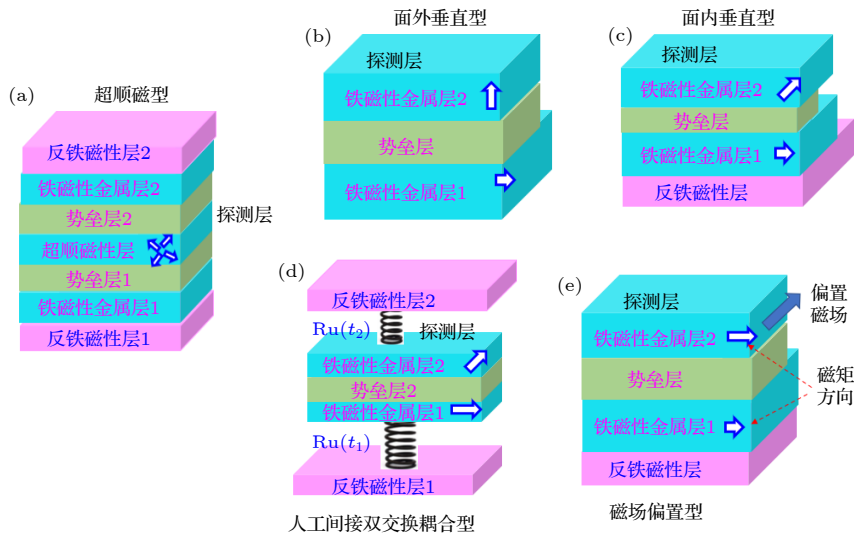


图 1 基于单一 MTJ 结构的五种 TMR 线性传感单元的示意图, 其中反铁磁性层、铁磁性金属层 (超顺磁性层)、势垒层是构成 MTJ 结构的主要材料层, (d) 图中的弹簧结构代表的是人工交换耦合结构的交换相互作用强度, 它决定了人工间接双交换耦合型的 TMR 线性传感单元的诸多性能参数

Fig. 1. Sketch of five TMR linear sensing units based on a single MTJ, the antiferromagnetic layer, ferromagnetic metal layer (superparamagnetic layer) and barrier layer are the main layers of an MTJ structure. The spring structure in Fig.(d) represents the exchange interaction strength of the synthetic exchange-coupling structure, which determines many performance parameters of the synthetic indirect-double-exchange-coupling TMR linear sensing unit.

表 1 基于单一 MgO MTJ 的五种 TMR 线性传感单元的性能参数  
Table 1. Performance parameters of five TMR linear sensing units based on a single MTJ.

TMR磁敏传感器	类型名称 (基于单一-MTJ)	TMR比值/%	灵敏度/ (%·Oe <sup>-1</sup> )	线性磁场 范围/Oe	噪声指数/ (nT@10 Hz)	非线性度	探测层厚度 $t_{\text{CoFe(Si)B}}$ /nm
种类I	超顺磁型	108	6.08	8	90	—	1 <sup>[27]</sup>
种类II	面外垂直型(含一垂直磁矩)	>52	0.02	600	—	<1%	1.36 <sup>[18]</sup>
种类III	面内垂直型	130	3—4	10	4.6	—	3 <sup>[21]</sup>
种类IV <sup>1</sup>	人工间接双交换耦合型	>200	2.6	~60	90	—	3 <sup>[19]</sup>
种类IV <sup>2</sup>	人工间接双交换耦合型	~200	3.9	~28	4.5	—	30 <sup>[26]</sup>
种类V	磁场偏置型@ $H_B=50$ Oe	~180	~1.3	~75	15	—	30 <sup>[26]</sup>

第一种超顺磁型 TMR 线性传感单元, 主要结构如图 1(a) 所示, 以超顺磁性材料作为双势垒 MTJ (反铁磁性层 1/铁磁性金属层 1/势垒层 1/超顺磁性层/势垒层 2/铁磁性金属层 2/反铁磁性层 2) 的自由层. 该自由层的磁矩随着外加磁场而改变, 是 TMR 线性传感单元的探测层<sup>[25]</sup>. 在这类超顺磁型的 TMR 线性传感单元中, 在改变自由层厚度的情况下, 可以实现 TMR 比值、灵敏度、线性磁场范围、噪声指数等性能参数的大范围调控. 因此, 随着自由层厚度的改变, 该类型的 TMR 线性传感单元不仅可以获得高灵敏度和窄线性磁场范围的结果, 也可以得到低灵敏度和宽线性磁场范围的结果.

第二种面外垂直型 TMR 线性传感单元, 主要结构如图 1(b) 所示, 以具有面内和垂直各向异性的铁磁性电极构成的 MTJ (垂直各向异性铁磁性电极/势垒层/面内各向异性铁磁性电极) 为基础的 TMR 线性磁传感结构<sup>[18,22]</sup>, 其中垂直各向异性铁磁性电极作为线性传感单元的探测层. 垂直各向异性的铁磁性电极能够在一定厚度范围内保持其垂直各向异性. 因此, 该类型的 TMR 线性传感单元的性能参数随着垂直各向异性铁磁性电极厚度的改变可实现性能参数大范围的调控. 不过, 由于探测层自身的垂直各向异性, 该类型的 TMR 线性传感单元的最小线性磁场范围依然很大.

第三种面内垂直型 TMR 线性传感单元, 主要结构如图 1(c) 所示, 以利用二次退火工艺技术实现两个面内各向异性铁磁性电极的磁矩相互垂直的 MTJ (反铁磁性层/铁磁性金属层 1/势垒层/铁磁性金属层 2) 作为 TMR 线性传感单元<sup>[21]</sup>, 其中铁磁性金属层 2 作为 TMR 线性传感单元的探测层. 该类型的 TMR 线性传感单元利用探测层的轭形 (Yoke shape) 形状及其尺寸变化来改变探测层的形状各向异性大小, 从而达到调控该类型 TMR

线性传感单元的灵敏度、线性磁场范围、噪声指数等性能参数的目的.

第四种人工间接双交换耦合型 TMR 线性传感单元, 主要结构如图 1(d) 所示, 以人工间接双钉扎磁性耦合结构构成的 MTJ(反铁磁性层 1/非磁性金属层 1/铁磁性金属层 1/势垒层 2/铁磁性金属层 2/非磁性金属层 2/反铁磁性层 2) 作为 TMR 线性传感单元<sup>[19,20,26]</sup>, 其中铁磁性金属层 2 作为 TMR 线性传感单元的探测层. 图 1(d) 中的 Ru( $t_1$ ) 和 Ru( $t_2$ ) 代表的是人工间接双交换耦合磁性结构中的非磁性金属层 Ru, 其厚度分别是  $t_1$  和  $t_2$ . 该类型的 TMR 磁敏传感器单元在经过两次退火工艺技术后两个面内各向异性的铁磁性电极 (铁磁性金属层 1 和 2) 的磁矩形成相互垂直的磁结构. 该类型的 TMR 线性传感单元的性能参数也是可以调控的, 主要通过改变非磁性金属层的厚度来实现.

第五种磁场偏置型 TMR 线性传感单元, 主要结构可以是上述第一到第四种 TMR 线性传感单元的任意一种<sup>[26]</sup>, 也可以是正常的 MgO MTJ<sup>[27]</sup>, 如图 1(e) 所示. 该类型的 TMR 线性传感单元的实现条件是在垂直于探测层易轴方向人为地施加一个偏置场 ( $H_B$ ), 并且可以通过改变  $H_B$  的大小来实现其性能参数的调控. 除了人为施加  $H_B$  的方法外, 也可以利用永磁材料来提供一个  $H_B$ <sup>[28]</sup>. 相比于永磁材料, 人为施加的  $H_B$  更具有优势, 可以大幅度调控传感器的性能参数. 另外, 磁场偏置型的 TMR 线性传感单元可以有效降低探测层的磁滞现象<sup>[26]</sup>, 这在 TMR 线性传感单元设计、优化中尤为重要.

### 3 五种 TMR 线性传感单元的性能比较

这五种 TMR 线性传感单元在磁传感性能上各有优缺点, 如表 1 所列. 除磁场偏置型外, 表 1

列出的其余四种 TMR 线性传感单元的性能参数是经过优化后的结果. 这五种 TMR 线性传感单元的 TMR 比值都很高, 除了面外垂直型, 其余四种 TMR 线性传感单元的 TMR 比值均超过 100%. 高的 TMR 比值是信噪比的基础. 而对于灵敏度而言, 超顺磁型、面内垂直型、人工间接双交换耦合型、磁场偏置型的 TMR 线性传感单元的最高灵敏度都比较大, 远远大于面外垂直型的 0.02%/Oe ( $1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m}$ ). 由于灵敏度和线性磁场范围是一对矛盾体, 因此, 虽然面外垂直型的 TMR 线性传感单元的灵敏度低, 但是其线性磁场范围很大, 可达到 600 Oe, 比其他四种类型的 TMR 线性传感单元的线性磁场范围大几倍; 同时在面外垂直型的传感器单元中非线性度也比较小 ( $\leq 1\%$ ).

下面讨论一下这几种 TMR 线性传感单元的噪声指数. 如表 1 所列, 这五种 TMR 线性传感单元的噪声指数都不低, 10 Hz 的时候均在 nT 量级以上. 在不使用磁通聚集器<sup>[29]</sup>的情况下, 这几乎是单一 MTJ 作为 TMR 线性传感单元所能达到的噪声指数的最好水平 ( $\sim 10 \text{ nT}@1 \text{ Hz}$ ). 需要说明一下, 超顺磁型 TMR 线性传感单元的噪声指数比较高, 达到了  $90 \text{ nT}@10 \text{ Hz}$ , 这主要是因为较薄的铁磁性金属材料 CoFeB 的磁噪声增加的缘故. 另外, 表 1 给出了两种人工间接双交换耦合型的 TMR 线性传感单元, 从中可以发现通过优化探测层实现了噪声指数的大幅度降低. CoFeSiB(30 nm)/Ru/CoFeB<sup>[26]</sup> 作为探测层的噪声指数只有 CoFeB(3 nm)/Ru/IrMn<sup>[19]</sup> 作为探测层的噪声指数的 1/20, 同时灵敏度提升了约 50%, 尽管线性磁场范围缩小了 1/2 左右. 由此也可以得出一个结论, 以单一的 MTJ 结构为基础的 TMR 线性传感单元的优化有着很长的路可走.

从应用的角度来说, 对于需要满足宽线性磁场范围 (几百 Oe) 同时灵敏度不高的应用场景, 建议采用面外垂直型的 TMR 线性传感单元; 如果需要满足高磁场灵敏度和相对宽线性磁场范围 (上百 Oe), 则建议使用磁场偏置型的 TMR 线性传感单元; 如果需要满足高磁场灵敏度 (约 4%/Oe) 和低噪声指数 (约  $10 \text{ nT}@1 \text{ Hz}$ ), 则建议使用人工间接双交换耦合型和面内垂直型的 TMR 线性传感单元; 如果需要非线性度小 (约 1%), 则建议以面外垂直型或者人工间接双交换耦合型的 TMR 线性

传感单元为主. 因此, 需要根据实际应用场景来选择不同类型的 TMR 线性传感单元. 据了解, 人工间接双交换耦合型和面内/面外垂直型等类型的 TMR 线性传感单元的磁敏传感器均到达了产品应用阶段, 这充分说明 TMR 磁敏传感器存在着多样化的应用需求.

#### 4 TMR 线性传感单元的设计、优化方向建议

从材料结构的角度来说, 构成 TMR 磁敏传感器的基本单元就是 TMR 线性传感单元. 因此, TMR 线性传感单元的性能在一定程度上决定了 TMR 磁敏传感器的性能, 尤其是 TMR 线性传感单元在进行了串并联和桥式结构设计集成之后. 由此可见, 只有选择好的 MTJ 材料结构, 才有可能获得高质量的 TMR 线性传感单元; 同时, 只有选择综合性能良好的 TMR 线性传感单元, 才有可能设计优化出高性能的 TMR 磁敏传感器.

图 2 给出了 MTJ 材料结构, TMR 线性传感单元和 TMR 磁敏传感器的各项性能参数关系图. 从图 2 可以知道, MTJ 材料结构仅关注 TMR 比值和噪声指数, 而 TMR 线性传感单元和 TMR 磁敏传感器还关注更多的性能参数. 另外, 根据图 2, 可以了解 TMR 线性传感单元和 TMR 磁敏传感器设计、优化的方向. 例如, 针对 TMR 磁敏传感器的性能设计、优化, 人们会想办法来提升 TMR 线性传感单元的 TMR 比值、灵敏度、线性磁场范围、噪声指数、非线性度等多项性能参数.

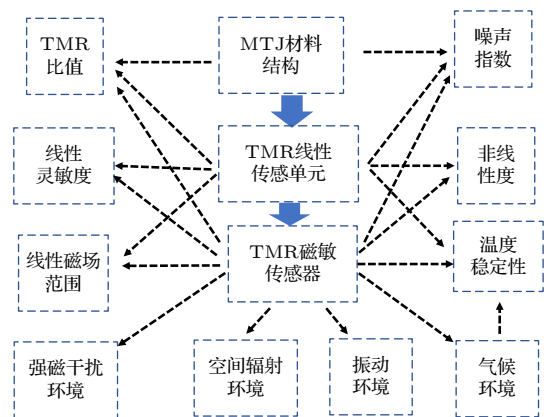


图 2 MTJ 材料结构, TMR 线性传感单元和 TMR 磁敏传感器的性能参数关系图

Fig. 2. Performance parameter diagram of an MTJ, a TMR linear sensing unit, and a TMR magnetoresistive sensor.

TMR 比值是 MTJ 的基本性能参数. 如引言部分所述, 非晶  $\text{AlO}_x$  势垒的 MTJ 的 TMR 比值比单晶 MgO 为势垒的 MTJ 低很多, 在选择势垒材料时会优先选择单晶 MgO 为势垒的 MTJ 作为 TMR 线性传感单元. 另外, 在为 TMR 线性传感单元选择铁磁性金属电极时, 不是自旋极化率越高的铁磁性金属电极就越适合, 而是需要满足矫顽力小、饱和磁化强度低的铁磁性金属材料. 通常情况下, 会在单一铁磁性金属材料的基础上组成复合磁性多层膜结构<sup>[25]</sup>作为 TMR 线性传感单元的探测层.

在 TMR 线性传感单元中, 灵敏度、线性磁场范围是一对矛盾体, 有没有破解的方法可循呢? 有, 更多的是在探测层的磁性结构上进行优化. 如在表 1 中, 针对人工双交换耦合型的 TMR 线性传感单元, 这里仔细比较一下  $\text{CoFeB}(1 \text{ nm})/\text{Ru}(0.2 \text{ nm})/\text{CoFeSiB}(30 \text{ nm})$ <sup>[26]</sup> 和  $\text{CoFeB}(2 \text{ nm})/\text{Ru}(0.3 \text{ nm})/\text{IrMn}(6 \text{ nm})$ <sup>[19]</sup> 作为探测层的性能参数. 在 TMR 相近的情况下, 文献 [26] 中的 TMR 线性传感单元的灵敏度、线性磁场范围分别是  $3.9\%/Oe$ ,  $\sim 28 Oe$ ; 而文献 [19] 中的结果分别是  $2.6\%/Oe$ ,  $\sim 60 Oe$ . 很显然, 软磁性材料作为探测层能够大幅提升灵敏度, 虽然这也是牺牲了一定的线性磁场范围为代价. 因此, 文献 [26] 中的 TMR 线性传感单元不仅灵敏度得到提升, 而且噪声指数也得到大幅抑制, 从而导致以软磁性材料作为探测层的人工间接双交换耦合型的 TMR 线性传感单元几乎完胜. 众所周知, 噪声指数在实际的应用场景中是越低越好, 然而受限于 TMR 线性传感单元的背景噪声, 并不是每一种 TMR 线性传感单元都拥有较低的噪声指数.

一般情况下, 人们对 TMR 线性传感单元的非线性度讨论得较少, 只有针对 TMR 磁敏传感器的应用时, 才会给出非线性度的结果. 这主要是因为铁磁性金属材料本身的磁滞效应导致任何的 TMR 磁敏传感器均无法完全克服非线性度. 而且, 非线性度是随着磁场变化的<sup>[18]</sup>, 这更增加了非线性度的优化难度. 因此, 针对不同类型的 TMR 线性传感单元及磁敏传感器, 非线性度的优化是一个长期的过程. 另外, 由于 TMR 磁敏传感器的应用场景对其性能的严格要求, 温度稳定性是其中一个很重要的参数 (图 2). 尽管温度在实际的应用场景中, 更多时候是作为环境变量存在的. 在考虑温度稳定性的情况下, 人们会发现当作为探测层的铁磁性金

属材料较薄时, 如表 1 中的超顺磁型 TMR 线性传感单元, 由于其温度稳定性差, 是不利于在 TMR 磁敏传感器中应用的.

综合而言, TMR 线性传感器无论从自身性能还是从应用角度, 都需要考虑 TMR 线性传感单元在经过桥式设计集成之后的综合性能, 单一的 TMR 线性传感单元的性能指标只能作为初始的参考. 尽管如此, 我们通过对表 1 中五种 TMR 线性传感单元的性能比对, 不难发现哪些类型的 TMR 线性传感单元更有应用价值. 对于有应用价值的 TMR 线性传感单元, 需要结合 TMR 磁敏传感器的应用场景去全力优化其综合性能 (除上述已讨论的诸多性能外, 还包括图 2 所示的抗强磁干扰、空间抗辐射、环境减振等), 这样更有利于 TMR 磁敏传感器的实际应用.

## 5 结 论

本文回顾了基于单一 MgO MTJ 材料结构的五种 (超顺磁型、面外垂直型、面内垂直型、人工间接双交换耦合型、磁场偏置型) TMR 线性传感单元, 并比较了这五种 TMR 线性传感单元的性能, 同时讨论了这五种 TMR 线性传感单元在应用时的可能表现. 发现 TMR 线性传感单元的性能设计优化主要是以 MTJ 材料结构的综合性能为基础, 并根据 TMR 线性传感器的应用场景需要来设计优化的. 这完全不同于 MTJ 材料结构本身的设计优化, 如引言部分所述, 它是以 TMR 比值、噪声指数等为优化依据的.

## 参考文献

- [1] Jullière M 1975 *Phys. Lett. A* **54** 225
- [2] Miyazaki T, Tezuka N 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **139** L231
- [3] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M, Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [4] Wang D, Nordman C, Daughton J M, Qian Z, Fink J 2004 *IEEE Trans. Magn.* **40** 2269
- [5] Butler W H, Zhang X-G, Schulthess T C, MacLaren J M 2001 *Phys. Rev. B* **63** 054416
- [6] Mathon J, Umersky A 2001 *Phys. Rev. B* **63** 220403
- [7] Parkin S S P, Kaiser C, Panchula A, Rice P M, Hughes B, Samant M, Yang S H 2004 *Nat. Mater.* **3** 862
- [8] Yuasa S, Nagahama T, Fukushima A, Suzuki Y, Ando K 2004 *Nat. Mater.* **3** 868
- [9] Han X F, Oogane M, Kubota H, Ando Y, Miyazaki T 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 283
- [10] Wei H X, Qin Q H, Ma M, Sharif R, Han X F 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 09B501

- [11] Oleinik I I, Tsymbal E Y, Pettifor D G 2000 *Phys. Rev. B* **62** 3952
- [12] Ikeda S, Hayakawa J, Ashizawa Y, Lee Y M, Miura K, Hasegawa H, Tsunoda M, Matsukura F, Ohno H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 082508
- [13] Feng J F, Feng G, Coey J M D, Han X F, Zhan W S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 102505
- [14] Zhang J, Zhang X G, Han X F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 222401
- [15] Kurt H, Rode K, Oguz K, Boese M, Faulkner C C, Coey J M D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 262501
- [16] Wang W X, Yang Y, Naganuma H, Ando Y, Yu R C, Han X F 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 012502
- [17] Ikeda S, Miura K, Yamamoto H, Mizunuma K, Gan H. D, Endo M, Kanai S, Hayakawa J, Matsukura F, Ohno H 2010 *Nat. Mater.* **9** 721
- [18] Zeng Z M, Amiri P K, Katine J A, Langer J, Wang K L, Jiang H W 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 062412
- [19] Chen J Y, Feng J F, Coey J M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 142407
- [20] 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
- [21] Chen J Y, Carroll N, Feng J F, Coey J M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 262402
- [22] Wei H X, Qin Q H, Wen Z C, Han X F, Zhang X G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 172902
- [23] Analysis and Countermeasure Research on Smart Sensor Market in China 2021 *Know and Report*(2) p2 (in Chinese) [中国工程科技知识中心 2021知领报告(2) 第2页]
- [24] Silva A V, Leitao D C, Valadeiro J, Amaral J, Freitas P P, Cardoso S 2015 *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **72** 10601
- [25] Yu G Q, Feng J F, Kurt H, Liu H F, Han X F, Coey J M D 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 113906
- [26] 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
- [27] Mazumdar D, Shen W F, Liu X Y, Schrag B D, Carter M, Xiao G 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 113911
- [28] Chaves R C, Cardoso S, Ferreira R, Freitas P P 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 07E506
- [29] Yin X, Yang Y, Liu Y, Hua J, Sokolov A, Ewing D, Rego P J D, Gao K, Liou S 2019 *Proc. SPIE* **11090** 110903H

## REVIEW

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

Han Xiu-Feng<sup>1)†</sup> Zhang Yu<sup>1)</sup> Feng Jia-Feng<sup>1)</sup> Chen Chuan<sup>2)</sup> Deng Hui<sup>2)</sup>  
Huang Hui<sup>2)</sup> Guo Jing-Hong<sup>2)</sup> Liang Yun<sup>2)</sup> Si Wen-Rong<sup>3)</sup>  
Jiang An-Feng<sup>3)</sup> Wei Hong-Xiang<sup>1)</sup>

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

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

3) (*State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China*)

( Received 30 June 2022; revised manuscript received 4 August 2022 )

## Abstract

Magnetic tunnel junction (MTJ) has been successfully used in spintronic devices, such as magnetoresistive random access memory, tunneling magnetoresistance (TMR) sensor, magnetic logic. In the TMR sensor a special magnetic structure is used between the free layer and the pinned layer of an MTJ to realize a linear output. So far, five types of TMR linear sensing units (TMR-LSNs) have been developed based on MgO MTJs, which are artificial-indirect-double-exchange-coupling-, magnetic-field-biased-, in-plane-, perpendicular-, and superparamagnetic-TMR-LSN, respectively. In this paper, the five types of TMR-LSNs are combed and their magnetic sensing performances are systematically compared with each other. First, the five types of TMR-LSNs each have a linear resistance response to the external magnetic field with a changeable sensitivity, a linear field range and a low frequency noise level. Second, in the five types of TMR-LSNs different magnetic structures are used to realize the same aim that is to obtain the optimized performance parameters, which is of significance for putting TMR sensors into practical applications. Third, the five types of TMR-LSNs are suitable for different application scenarios due to their respective performance parameters. Therefore, we believe that our summarized discussion in this paper will help people to explore and find the relevant applications of TMR sensors based on the five types of TMR-LSNs.

**Keywords:** magnetic tunnel junction, tunneling magnetoresistance linear sensing unit, magnetoresistive sensors

**PACS:** 85.75.Mm, 85.70.Kh, 85.75.Ss

**DOI:** 10.7498/aps.71.20221278

\* Project supported by the State Grid Corporation of China (Grant No. 5700-202058381A-0-0-00).

† Corresponding author. E-mail: [xfhan@iphy.ac.cn](mailto:xfhan@iphy.ac.cn)

## 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

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

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

Han Xiu-Feng Zhang Yu Feng Jia-Feng Chen Chuan Deng Hui Huang Hui Guo Jing-Hong Liang Yun Si Wen-Rong Jiang An-Feng Wei Hong-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 238502 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221278

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221278>

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>

#### 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>

#### 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>

#### 基于工艺偏差的自旋转移矩辅助压控磁各向异性磁隧道结电学模型及其应用研究

Process deviation based electrical model of spin transfer torque assisted voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction and its application

物理学报. 2022, 71(10): 107501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211700>

#### 基于工艺偏差的电压调控磁各向异性磁隧道结电学模型及其在读写电路中的应用

Process deviation based electrical model of voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction and its application in read/write circuits

物理学报. 2020, 69(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200228>

#### 三端磁隧道结的稳定性分析

Stability analysis in three-terminal magnetic tunnel junction

物理学报. 2019, 68(20): 207201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190927>