

## 前沿领域综述

TMR 与 GMR 传感器  $1/f$  噪声的研究进展\*吴少兵 陈实<sup>†</sup> 李海 杨晓非

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(2011 年 7 月 11 日收到; 2011 年 9 月 30 日收到修改稿)

隧道结磁阻 (TMR) 传感器及巨磁阻 (GMR) 传感器的  $1/f$  噪声在低频段噪声功率密度较大, 是影响其低频下分辨率和灵敏度的主要噪声形式. 本文详细介绍了近年来 TMR 传感器及 GMR 传感器  $1/f$  噪声的特点、来源、理论模型、检测方法及降噪措施等方面的研究进展, 并就隧道结磁阻传感器  $1/f$  噪声的物理模型进行了详细解释. 通过纳米模拟软件 Virtual NanoLab 对不同 MgO 厚度的 Fe/MgO/Fe 型磁性隧道结 (MTJ) 进行了隧穿概率和 TMR 变化率的模拟计算, 得到保守估计与乐观估计的 TMR 变化率, 分别为 98.1% 与 10324.55%, 同时通过 MTJ 的噪声模型分析了 MgO 厚度对 TMR 传感器噪声的影响. 制备了磁屏蔽系数大于 10000 的磁屏蔽筒并搭建了磁阻传感器  $1/f$  噪声的测试平台, 通过测试验证了磁屏蔽系统对环境磁场具有较好的屏蔽效果, 为噪声检测提供了稳定的磁场空间. 最后分析了 TMR 与 GMR 中各种因素对传感器噪声的影响, 提出了影响 MTJ 传感器  $1/f$  噪声的因素及一些降噪措施.

**关键词:** 隧道结,  $1/f$  噪声, 磁通聚集器

**PACS:** 75.47.De, 07.10.Cm, 75.47.Jn, 85.70.Kh

1 TMR 与 GMR 传感器的  $1/f$  噪声简介1.1 TMR 与 GMR 传感器的  $1/f$  噪声的研究背景

自旋阀结构的 GMR 传感器以及磁性隧道结 (MTJ) 磁阻传感器因其饱和磁场较低、单位磁场灵敏度高及温度特性较稳定等优点<sup>[1]</sup>, 具有成为 nT 超高灵敏度传感器的可能. 目前的 GMR 传感器在分辨率等指标上还明显低于各向异性磁阻 (AMR) 传感器, 主要原因在于 TMR 与 GMR 磁阻传感器的噪声较高, 特别是  $1/f$  噪声<sup>[2]</sup> (亦称低频噪声或闪变噪声), 如果其  $1/f$  噪声能降低到 AMR 传感器的水平, 其分辨率将大大提高<sup>[3]</sup>. 因此进一步理解 TMR 与 GMR 传感器系统的噪声产生机理, 减小噪声、提高信噪比是实现 GMR 传感器高分辨率的关键.

1.2 TMR 与 GMR 传感器的  $1/f$  噪声的特点及研究现状

巨磁阻 (GMR) 传感器和隧道结磁阻 (TMR) 传感器的主要噪声的特点是在低频下噪声功率谱密度与频率成倒数关系, 噪声形式与半导体器件、激光器件及其他金属薄膜中的噪声<sup>[4]</sup> 形式相似, 为  $1/f$  噪声, 其噪声功率谱密度与频率的关系为

$$S_v(f) \propto \frac{1}{f^\alpha}, \quad (1)$$

其中  $S_v(f)$  为传感器输出电压的噪声功率谱密度,  $f$  为噪声频率,  $\alpha$  为噪声影响因子. 如图 1, 各种商用传感器的噪声功率谱密度随着频率升高, 呈现出频率倒数的关系<sup>[3]</sup>. 其中巨磁阻传感器较各向异性磁阻传感器相比, 具有更大的低频噪声.

在低频段,  $1/f$  噪声覆盖了其他形式的电热扰动噪声和磁热扰动噪声, 是影响 GMR, TMR

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60871018) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: s.chen@sina.com

传感器分辨率的主要因素. Stutzke 等 [4] 对各种商业传感器, 包括 Honeywell 公司的 AMR 传感器 HMC1001, HMC1021 及 NVE 公司的各种 GMR 传感器 (AAL002, AA002, AAH002, SDT) 进行了噪声测试. 他们发现在 0.1 Hz 到 10 kHz 的范围, 各种传感器具有较大的噪声功率谱密度, 对于实现高精度磁测量带来困难. 从其测试的结果可以看到, 霍尼韦尔公司生产的 AMR 传感器 HMC1001 具有较小的噪声频谱密度. 而 NVE 生产的 GMR 传感器 AAL002 具有很大的噪声, 在低频磁场应用环境中严重影响其分辨力. Jander 等 [27] 通过频谱分析仪已对  $1/f$  噪声检测做了大量工作并提出了可行的检测方案, 也有研究对 NiFeCo/Cu, NiFe/Ag 等结构多层膜 GMR 单元传感器做了噪声检测. Edelstein 等 [3,12] 对 TMR 及 GMR 的  $1/f$  噪声做了大量实验及理论工作, 对于 TMR 的噪声模型得到了比较详细的分析结果, 但对于如何更有效的降低低频噪声, 使 TMR 与 GMR 传感器的低频分辨力达到 pT 级, 还需要进一步研究.

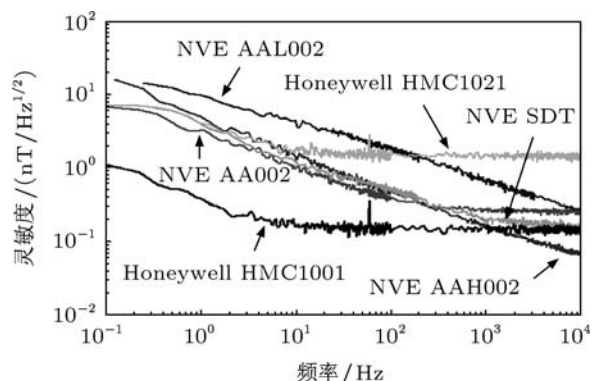


图1 商用微磁传感器的低频噪声

目前, 国内对  $1/f$  噪声的研究主要集中在 MOS 器件及金属氧化物半导体器件等方面, 而对 GMR 及 TMR 的噪声研究甚少. 彭绍泉等 [5] 通过载流子涨落模型和迁移率涨落模型对金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管 (MOSFET) 的  $1/f$  噪声进行了理论分析, 但该模型是否适用于磁性材料器件还有待验证. 杜磊等 [6] 研究了金属薄膜电迁移率  $1/f$  噪声模型, 其模型并不适用于 TMR 与 GMR 材料. 梁志鹏等 [7] 研究了半导体/磁性 d 波超导隧道结中的散粒噪声, 但其噪声特性并非为  $1/f$  噪声. 韩秀峰等人 [8,9] 对“环形”的 MgO 型 MTJ 及双结型的 MgO 型 MTJ 的  $1/f$  噪声进行了深入研究, 对磁性  $1/f$  噪声的 Hooge 参数 [12-18,20]  $\alpha_{\text{mag}}$ , 给出了

理论模型及实验验证, 而对于诸如 MgO 厚度, 器件尺寸磁通聚集器等方面的研究还较少.

### 1.3 本文对 TMR 与 GMR 传感器的 $1/f$ 噪声的研究

针对国内外在 TMR 与 GMR 传感器的  $1/f$  噪声的噪声来源, 噪声模型等方面还没有统一的结论, 本文综述了目前 TMR 与 GMR 传感器的  $1/f$  噪声在噪声来源方面的研究, 详细介绍了 TMR 传感器的噪声模型, 并在论文最后综述了相关  $1/f$  噪声的抑制措施. 另外, 本文通过模拟计算得到了 Fe/MgO/Fe 型 MTJ 的载流子隧穿概率从而计算了其磁阻变化率, 研究了 MgO 层厚度对 Fe/MgO/Fe 型 MTJ 的  $1/f$  噪声的影响.

同时, 针对目前国内还没有关于 TMR 与 GMR 噪声测试系统的报道, 本文较为详细的介绍了自行搭建的磁屏蔽磁阻噪声测试系统, 并分析了环境磁场对噪声测试的影响, 以促进其深入研究.

## 2 噪声来源及物理模型

### 2.1 噪声来源

Edelstein 等 [3,12] 将 GMR 器件的噪声分为两类: 一类是白噪声, 从物理机理上又分为热噪声 (也称 Johnson 噪声或 Nyquist 噪声)、散粒噪声和磁噪声; 另一类是  $1/f$  噪声, 从物理机理上分为电子噪声和磁噪声. 其中热噪声、散粒噪声和磁噪声是 TMR 与 GMR 器件的基本噪声, 散粒噪声取决于 TMR 与 GMR 器件的电流偏压, 磁噪声由 TMR 与 GMR 薄膜样品的大小和磁性能决定, 而电子噪声与电荷俘获或材料内部缺陷的移动相关.

根据目前的研究, MTJ 传感器的噪声主要来源于三个部分, 即放大器噪声 (amplifier noise), 散粒噪声 (shot noise) 以及电阻噪声 (resistance noise), 如果这三个噪声来源不互相干, 则总的噪声可以认为是三者噪声之和 [9-12]. 其中, 放大器噪声和散粒噪声均可以消除, 因而主要需要克服的噪声则来源于电阻噪声. 而电阻噪声的来源主要有两个部分, 即金属电阻中的缺陷运动与隧道结中的电荷阱和电极的磁化震荡 (两者均表现出  $1/f$  功率谱特性), 换言之即电子噪声和磁性噪声 [12-16]. 实际测量中, 磁性噪声因易于随环境等因素变化而难于测量, 因此可以通过使磁层的

磁场饱和来减小磁噪声, 从而进行电子噪声的测量, 即  $S_{\text{mag}} = S - S_{\text{amplifier}} - S_{\text{thermal/shot}} - S_{\text{elec}}$ , 其中  $S$ ,  $S_{\text{amplifier}}$ ,  $S_{\text{thermal/shot}}$ ,  $S_{\text{elec}}$  和  $S_{\text{mag}}$  分别是总噪声、放大器噪声、热噪声及散粒噪声、电子噪声和磁噪声. 根据目前的研究进展, MTJ 的电子噪声被认为主要来源于 MgO(或者  $\text{AlO}_x$ ) 中间层的缺陷, 可能存在的缺陷分为两类, 较小的缺陷有孤立、剩余 O 空隙缺陷, Mg 空隙缺陷, 不纯净, 晶格移位和 MgO 晶界等, 这些缺陷被认为会减小自旋相关电子的非对称散射率, 增大噪声, 减小 TMR<sup>[17,46]</sup>; 较大的缺陷多是由于制备工艺的不足、过厚的 MgO 等和过大的 MTJ 结面积导致的针孔, 从而引起缺陷辅助隧穿<sup>[17]</sup>, TMR 的减小. 而磁性噪声主要认为是 CoFeB 电极的磁畴结构的稳定性起主要作用. 目前, 如何稳定电极材料的磁畴结构来进一步降低 MTJ 噪声、提升 TMR 是该领域的一个研究热点<sup>[2,12-17]</sup>. 此外, 根据 Stearrett 等<sup>[18]</sup> 的研究, 通过淬火处理减少 MTJ 的缺陷数, 但是并不意味着持续淬火有利于改善 MTJ 性能. 在最初的淬火阶段, 更高的淬火温度和更长的淬火时间可以使得 MTJ 迅速升高, 噪声也得到下降, 但是当淬火到一定程度, MTJ 和噪声分别达到最大(小)值. 可以认为淬火能够消除的缺陷总量是一定的, 因此上述现象变得易于理解. 但是当淬火到一定程度, MTJ 的缺陷将无法被消除, 或者说剩余的缺陷无法通过常规淬火消除, 而且过度淬火会使 MTJ 的多层材料发生扩散, 从而降低 TMR, 增大噪声.

## 2.2 MTJ 传感器的噪声模型

根据 Egelhoff 等人<sup>[12]</sup> 的研究, 假定由 MTJ 构成的 TMR 传感器的惠斯通电桥的每个臂的噪声功率谱  $S_B$  相同, 则输出噪声与单个臂的噪声一致. 以下将具体分析运放噪声、散粒噪声、电子  $1/f$  噪声、热磁性噪声和磁性  $1/f$  噪声<sup>[12,15-18]</sup>.

考虑没有耦合作用的情况下, 总噪声  $S_B$  符合下式:

$$S = S_{\text{Amp}} + S_{\text{shot}} + S_{\text{elec.1/f}} + S_{\text{therm.mag}} + S_{\text{mag.1/f}}. \quad (2)$$

### 2.2.1 运放噪声

运放的内部噪声  $S_{\text{Amp}}$  可以采用

$$S_{\text{Amp}} = \left(\frac{dB}{dV}\right)^2 S_{\text{Amp.V}} \quad (3)$$

进行描述<sup>[12]</sup>. 其中  $S_{\text{Amp.V}}$  为噪声电压功率, 而  $dB/dV$  可以通过

$$\frac{dV}{dB} = \frac{\Delta R}{R} \frac{V_0}{4B_{\text{sat}}} = \frac{\Delta R}{R} \frac{NV_J}{2B_{\text{sat}}} \quad (4)$$

取倒得到, 公式各项含义本节最后给出.

### 2.2.2 散粒噪声与约翰逊噪声

根据 Nowak 的工作<sup>[9,12-18,24]</sup>, 发现散粒噪声与约翰逊噪声是互相耦合的. 如未说明, 本文其他提到的散粒噪声均指散粒噪声与约翰逊噪声之和. 需要注意的是, 室温下, 在 MTJ 结电压低于 50 mV 时,

$$S_{\text{shot}} = N \frac{2eV_J [RAP]}{A} \coth\left(\frac{eV_J}{2k_B T}\right) \quad (5)$$

将简化为  $N4k_B T$ , 即约翰逊噪声. 而在较高的电压下, 当电流方向趋于一致, 约翰逊噪声则消失殆尽, 而散粒噪声占主导<sup>[12]</sup>.

### 2.2.3 电子噪声

$$S_{\text{elec.1/f}} = N \frac{\alpha_{\text{elec}} I^2 R_J^2}{Af} = N \frac{\alpha_{\text{elec}} V_J^2}{Af}. \quad (6)$$

MTJ 中的电子噪声通常如 (6) 表示<sup>[12]</sup>. 其中  $f$  为探测的频率,  $\alpha_{\text{elec}}$  为 Hooge 系数, 而  $N$  是由于噪声电压(噪声电压功率的平方根)引起, 将臂上的 MTJ 的每个噪声电压功率线性相加得到. 需要注意的是, 尽管 Hooge 系数随着 RA 的变化趋势已在 Jiang 的研究中观察到<sup>[14]</sup>, 但是对于不同的 MTJ 可能需要重新计算 Hooge 系数.

### 2.2.4 热磁噪声

$$S_{\text{therm.mag}} = \frac{2k_B T \chi''(f)}{\pi \Omega \mu_0 f}. \quad (7)$$

由于自由层的磁畴结构不十分稳定, 因而其磁化震荡可以造成热磁噪声. 单个 MTJ 的热磁噪声如 (7) 式所示<sup>[12]</sup>. 其中磁化率的虚数部分表示与磁化强度矢量的热扰动有关的因素. 自由层的统一磁化翻转以及纹波态的亚稳定性都会影响该磁化率的虚数部分<sup>[12]</sup>. 其中, 自由层的统一磁化翻转对热磁噪声有所贡献, 而纹波亚稳态(引起自发磁化的轨道电子, 如 Co3d, 在受到热扰动时, 其能量不稳定的纹波态)对磁性  $1/f$  噪声有所影响. 在远低于铁磁共振频率(通常为 3—6 GHz)的范围, 我们可以如

$$\chi'' = \frac{\alpha_G M_S \omega}{\gamma H_k^2} \quad (8)$$

考虑自由层的统一磁化翻转机理. 其中,  $\alpha_G$  为吉尔伯特阻尼系数,  $H_k$  为面内磁化的矫顽场 (stiffness field).

由此可知, 自由层统一磁化翻转噪声的热磁性噪声如下式所示:

$$S_{\text{Magnetic}}^{\text{therm.mag}} = \frac{4k_B T \alpha_G M_S \mu_0}{\Omega \gamma B_{\text{sat}}^2}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{voltage}}^{\text{therm.mag}} &= N \left( \frac{dV_J}{dM} \right)^2 S_{\text{Magnetic}}^{\text{therm.mag}} \\ &= N \left( \frac{V_J (\Delta R/R)}{2M_S} \right)^2 S_{\text{Magnetic}}^{\text{therm.mag}}. \end{aligned} \quad (10)$$

自由层统一磁化翻转的磁化震荡引起<sup>[12]</sup>的输出电压噪声如(10)式, 用(3)式的倒数形式可得用于计算的下式:

$$\begin{aligned} S_{\text{therm.mag}} &= \left( \frac{dB}{dV} \right)^2 S_{\text{voltage}}^{\text{therm.mag}} \\ &= \frac{1}{N} \frac{4k_B T \mu_0 \alpha_G}{\Omega \gamma M_S}. \end{aligned} \quad (11)$$

### 2.2.5 磁性 1/f 噪声

磁化亚稳态之间的跳跃也可以造成磁化率虚数部分  $\chi''$  的变化. 由于势垒具有一定的分布, 因此该机理<sup>[12]</sup>可能产生 1/f 形式的噪声, 或者是, 如果亚稳态波态的态密度很小, 也可能产生电报噪声. 磁化率的损耗部分有一个(8)式给出的进动项和一个几乎与频率无关的磁滞项. 将  $N$  个 MTJ 的磁性 1/f 噪声求和, 则得出

$$\begin{aligned} S_{\text{voltage}}^{\text{mag.1/f}} &= N \left( \frac{dV_J}{dM} \right)^2 S_{\text{Magnetic}}^{\text{mag.1/f}} \\ &= N \left[ \frac{V_J \Delta R/R}{2M_S} \right]^2 \frac{2k_B T \chi''(f)}{\pi \Omega \mu_0 f}. \end{aligned} \quad (12)$$

而 MTJ 的灵敏度可以用

$$\frac{dV}{dH} = \frac{dV}{dM} \frac{dM}{dH} = \frac{V_J \Delta R/R}{2M_S} \chi' \quad (13)$$

表示. 其中,  $\chi'$  是磁化率的实部部分, 同时  $V_J$ ,  $\Delta R$ ,  $R$  和  $M_S$  都是与外加场无关的常数. (12), (13) 式中与外场特性相关的参数就是  $\chi'$  和  $\chi''$ . 至少在低场、低频率下 ( $< B_{\text{sat}}$ ,  $< 10$  kHz),  $\chi'$  和  $\chi''$  与外加场呈线性. 所以如文献<sup>[13]</sup>的研究结果,  $S_{\text{voltage}}$  与  $dV/dH$  线性相关.

由此根据磁性 1/f 电压功率可得磁性 1/f 噪声如下:

$$\begin{aligned} S_{\text{mag.1/f}} &= \left( \frac{dB}{dV} \right)^2 S_{\text{voltage}}^{\text{mag.1/f}} \\ &= N \left[ \frac{2B_{\text{sat}}}{NV_J \Delta R/R} \right]^2 \left[ \frac{V_J \Delta R/R}{2M_S} \right]^2 \frac{2k_B T \chi''(f)}{\pi \Omega \mu_0 f} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{N} \frac{2k_B T \chi''(f)}{\pi \Omega \mu_0 f} \left[ \frac{B_{\text{sat}}}{M_S} \right]^2 \\ &= \frac{1}{N} \frac{2k_B T \chi''(f)}{\pi \Omega \mu_0} \frac{H_{\text{sat}} B_{\text{sat}}}{M_S}. \end{aligned} \quad (14)$$

考虑到  $M_S/H_{\text{sat}}$  是  $\chi'$  的模型, 则将上式进一步推导为

$$\begin{aligned} S_{\text{mag.1/f}} &= \frac{1}{N} \frac{2k_B T}{\pi \Omega f} \left[ \frac{\chi''}{\chi'} \right]^2 \frac{B_{\text{sat}}}{M_S} \\ &= \frac{2B_{\text{sat}}}{N} \frac{\alpha_{\text{mag}}}{\Omega f}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\alpha_{\text{mag}} = \frac{1}{N} \frac{k_B T}{\pi M_S} \left[ \frac{\chi''}{\chi'} \right], \quad (16)$$

$\alpha_{\text{mag}}$  是和 Hooge 系数相似的参数. 常用实验获取的该参数数值, 即  $1.83 \times 10^{-12} \mu\text{m}^3 \cdot \text{T}^{[54]}$ .

### 2.2.6 系统总噪声<sup>[7]</sup>

结合上述模型, 系统的总噪声如下:

$$\begin{aligned} S_{\text{total}} &= \left( \frac{dB}{dV} \right)^2 \left[ S_{\text{voltage}}^{\text{Amp}} + S_{\text{voltage}}^{\text{shot}} + S_{\text{voltage}}^{\text{elec.1/f}} \right] \\ &\quad + S_{\text{therm.mag}} + S_{\text{mag.1/f}}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{total}} &= \frac{4B_{\text{sat}}^2}{(\Delta R/R)^2 N^2 V_J^2} \left[ S_{\text{voltage}}^{\text{Amp}} \right. \\ &\quad + N \frac{2eV_J [\text{RAP}]}{A} \coth \left( \frac{eV_J}{2k_B T} \right) \\ &\quad + N \frac{\alpha_{\text{elec}} V_J^2}{Af} \left. \right] + \frac{1}{N} \frac{4k_B T \mu_0 \alpha_G}{\Omega \gamma M_S} \\ &\quad + \frac{2B_{\text{sat}}}{N} \frac{\alpha_{\text{mag}}}{\Omega f}, \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $B_{\text{sat}}$  为 MTJ 自由层的饱和磁感应强度, 单位为 T;  $n$  为惠斯通电桥的一个臂上的 MTJ 数目, 单位为 1; TMR 为 MTJ 的磁阻变化率, 单位为%;  $V$  是每个 MTJ 上的电压差, 单位为 V;  $S_{\text{ampvoltage}}$  是运放噪声电压密度, 单位为  $\text{V}^2/\text{Hz}$ ;  $e$  为元电荷电量, 即  $1.6 \times 10^{-19}$  C; RA 为磁阻面积之积 (resistance area product, RA), 单位为  $\text{M}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ ;  $A$  为 MTJ 的结面积, 单位为  $\mu\text{m}^2$ ;  $k_B$  为波尔兹曼常数, 即  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为环境温度, 单位是 K;  $\mu$  为真空磁导率, 即  $1.26 \times 10^{-6}$  T/mA;  $\alpha_{\text{elec}}$  为电子 1/f 噪声的 Hooge 参数, 单位是  $\mu\text{m}^2$ ;  $\Omega$  是 MTJ 自由层的体积, 单位是  $\text{m}^3$ ;  $\gamma$  是电子旋磁比, 单位是  $\text{mA}^{-1}\text{s}^{-1}$ ;  $M_S$  是 MTJ 自由层的单位饱和磁化强度, 单位是 A/m;  $\alpha_{\text{mag}}$  是磁性 1/f 噪声的 Hooge 参数, 单位是  $\mu\text{m}^3\text{T}$ ; 而  $\alpha$  则是吉尔伯特 (Gilbert) 阻尼因子, 单位为 1<sup>[12,19-33]</sup>.

### 3 Fe/MgO/Fe 型 MTJ 隧穿概率模拟及 MgO 厚度对噪声影响

#### 3.1 Fe/MgO/Fe 型 MTJ 隧穿概率模拟

在 LINUX 平台上利用纳米模拟软件 Virtual NanoLab, 就 Fe-MgO-Fe 型 MTJ 进行了一系列计算. 主要的计算步骤分为以下三大部分, 即: 1) MTJ 器件的松弛几何形态; 2) MTJ 两铁磁性材料层的磁化方向相互平行时, 多数电子与少数电子的不同布拉赫格波, 在器件中的隧穿概率分布情况; 3) MTJ 两铁磁性材料层的磁化方向反平行时, 多数电子与少数电子的不同布拉赫格波, 在器件中的隧穿概率分布情况.

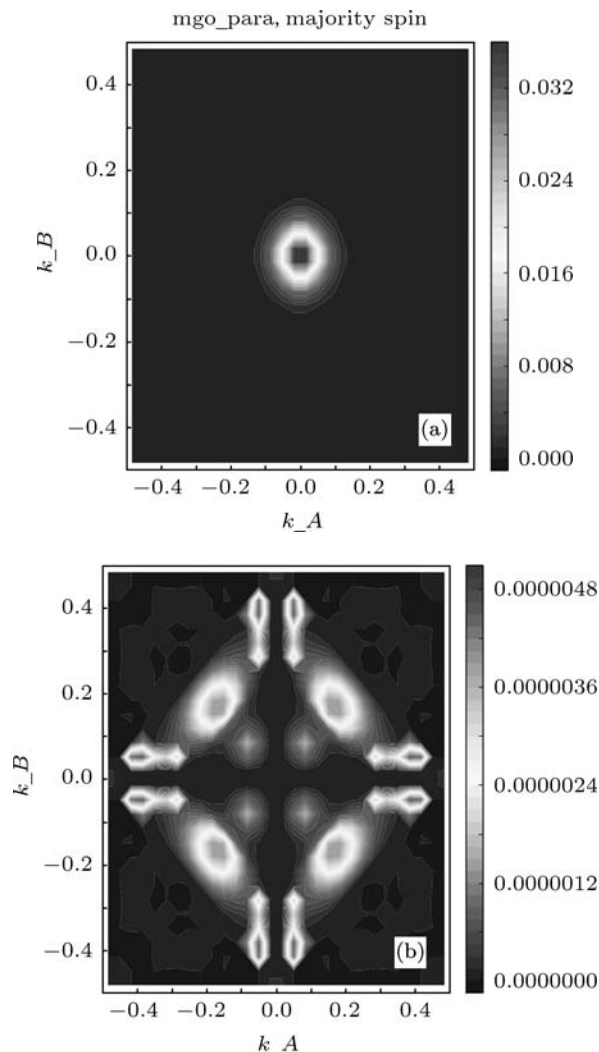


图 2 铁磁层磁化方向平行时的多数与少数载流子隧穿概率分布 (a) 为平行态多数载流子的  $K$  空间隧穿概率分布; (b) 为平行态少数载流子的  $K$  空间隧穿概率

如图 2 所示, Fe(2 层) -MgO(6 层) -Fe(2 层) 结构的平行态载流子隧穿概率分布图. 得到上述的计

算结果后, 分别将各隧穿概率图在二维布里渊区内进行积分, 作为该隧穿情形下的电导  $G$ , 结合

$$\text{TMR Ratio} = \frac{G_P - G_{AP}}{G_{AP}} \quad (19)$$

可以求出此时的 MTJ 磁阻变化率, 即 TMR. (19) 式中,  $G$  表示电导, 而下标的 P 和 AP 分别表示 MTJ 中铁磁性材料层磁化方向相互平行 (Parallel) 和反平行 (Anti-Parallel).

根据铁磁层磁化方向平行态与反平行态的隧穿概率进行积分后得到的电导与 TMR 结果. 在此需要说明的是, 在实际样品中, 不能保证上下 Fe 层的自旋电子完全平行或反平行, 且由于实际样品中的电子受到杂质散射等原因, 所以乐观估计的 TMR 值要高出目前报道的 TMR 值; 保守估计中考虑了部分电子受到的散射, 以及平行态与反平行态的电子不完全平行或反平行等因素. 图中保守估计与乐观估计的 TMR 变化率, 分别为 98.1% 与 10324.55%. 保守估计值与 Aliev 等 [34] 通过分子束外延生长的 Fe/MgO/Fe 型 MTJ 的实验测量结果 (100%, 300 K) 非常接近, 但低于 Ohno 等 [47] 通过溅射制备的 CoFeB/MgO/CoFeB 型 MTJ 的实验测试结果 (604%, 300 K, 1010%, 5 K).

#### 3.2 MgO 原子层数对 TMR 的影响

图 3 表示的是根据 3.1 的计算方法, 分别对 MgO 原子层数为 3, 6, 9 和 12 时, 对应 MTJ 的 TMR 值. 其中, 横轴为 MgO 原子层数, 纵坐标轴分别对应保守估计的 TMR 和乐观估计的 TMR.

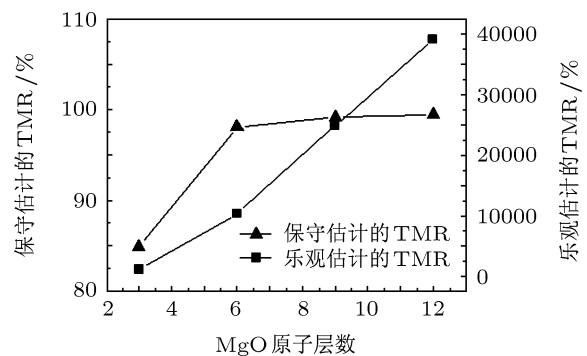


图 3 MgO 型 MTJ 的 TMR 随着 MgO 原子层厚度的变化 (其中, 三角形线对应保守估计的 TMR, 方形线对应乐观估计的 TMR)

可以发现, 随着 MgO 原子层数目的增加, 保守估计与乐观估计的 TMR 值均呈上升趋势. 同时, 保守估计的 TMR 数值随着 MgO 层数增加而逐渐增加至饱和, 饱和值约为 100%. 特别地, 对于保守估计的 TMR, 当 MgO 原子数达到 6 层时, TMR

值几乎趋近于饱和值. 实际测试结果表明, 适当增加 MgO 层厚度会带来 TMR 值增大, 结论与本文模拟结果一致.

### 3.3 MgO 原子层数对 MTJ 的 1/f 噪声的影响

根据 2.2 中 MTJ 的噪声模型, 利用计算软件 Mathematica, 分别对 MgO 原子层数为 3, 6, 9 和 12 时, 计算对应 MTJ 的 1/f 噪声量级, 图为计算结果. 其中, 横轴为 MgO 原子层数, 三角形与左侧坐标轴对应保守估计的 TMR, 方形与右侧坐标轴对应乐观估计的 TMR. 可以发现, 随着 MgO 原子层数目的增加, 保守估计与乐观估计的 1/f 噪声量级均呈下降趋势.

同时, 保守估计与乐观估计的噪声量级随着 MgO 层数增加, 均逐渐减少至下限, 下限值约为  $0.00108 \text{ nT/Hz}^{0.5}$ . 且两种估计方法得出的噪声量级均在 MgO 为 6 层附近, 减少到下限附近, 结果如图 4 所示.

### 4 1/f 噪声测试系统及磁屏蔽系统

本文提出一种简单易行的噪声搭建装置: 每一个 GMR 待测样品通过光刻得到条状或四段惠斯

通电桥, 然后将样品放置于无电磁干扰的屏蔽环境中进行噪声测试. 待测样品空间需施加两个磁场: 电磁铁产生的直流恒定磁场和亥姆霍兹线圈产生的交变磁场. 电磁铁的直流磁场提供 GMR 材料的偏置磁场. 亥姆霍兹线圈则提供交变磁场来研究 GMR 对交变磁场环境下的噪声特性. 对待测的 GMR 样品 (条单元状或惠斯通电桥) 通入一个直流工作电流, 因噪声产生的电压扰动可以通过电压放大器放大, 然后通过频谱分析仪进行噪声观测, 得到 GMR 的噪声功率谱密度. 为减小测试过程中带来的误差, 可选择用直流干电池为惠斯通电桥提供工作电流. 如图 5 是本文搭建的磁阻噪声测试平台.

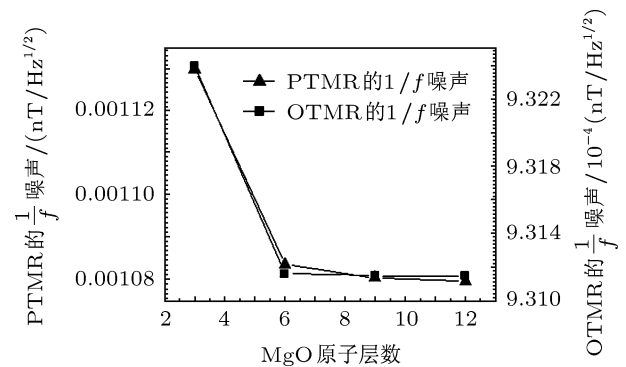


图 4 MgO 型 MTJ 的 1/f 噪声随着 MgO 原子层厚度的变化

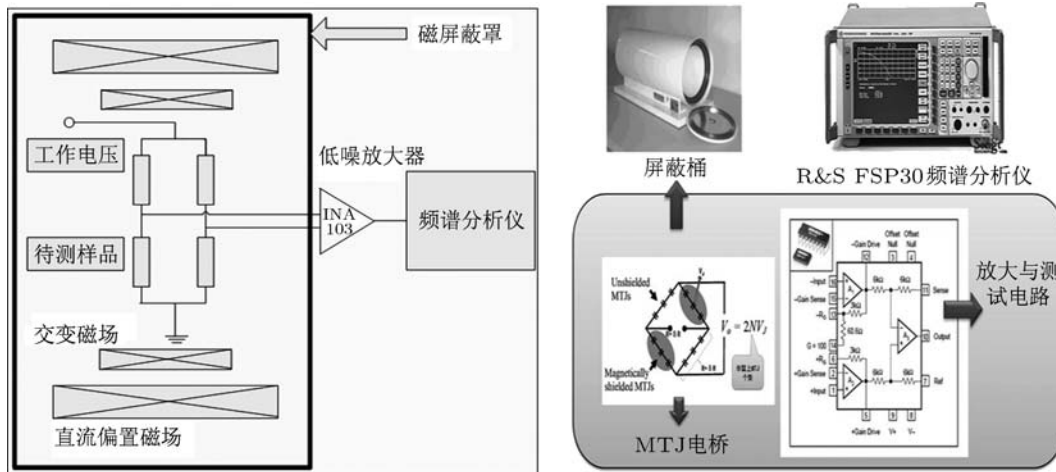


图 5 磁阻传感器 1/f 噪声测试平台系统框图 (a) 及平台组成部分 (b)

本文通过制备一种高磁屏蔽系数的磁屏蔽筒完成了巨磁阻传感器 1/f 测试系统的搭建. 实验证明, 该磁屏蔽筒的磁屏蔽系数大于 10000, 筒内均匀区剩磁小于 2 nT, 其内部磁场测试如图 6 所示.

从图 7 可以看出, 尽管两个频谱的形态没有明显变化, 但是在 0 Hz 处, 幅值在进行屏蔽以后从 10.862 mV 降到了 8.992 mV. 初步分析, 磁屏蔽桶有效地减弱了环境磁场的波动, 使得 GMR 磁畴

结构稳定,从而减小了占主要部分的磁性  $1/f$  噪声与热磁噪声,总噪声量级也随之有所下降.

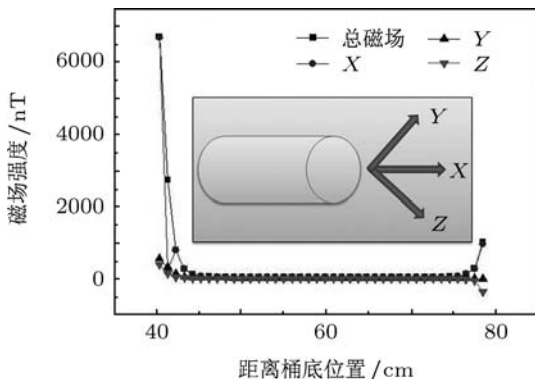


图6 磁屏蔽筒内部三轴磁场分量及总磁场的剩磁测试

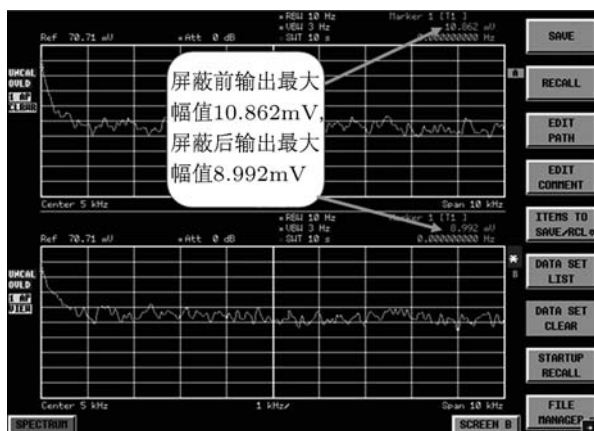


图7 R&S FSP30 频谱分析仪接入噪声电路时(0—10 kHz 范围的频谱.其中上部分为未添加磁屏蔽时的情况,下部分为增加磁屏蔽后的情况)

## 5 影响 TMR 及 GMR 传感器 $1/f$ 噪声的其他因素及降噪措施

### 5.1 影响 TMR 及 GMR 传感器 $1/f$ 噪声的因素

#### 5.1.1 巨磁阻传感器单元结构的影响

Lhermet 等<sup>[44]</sup>对 NiFe/Ag 多层膜结构的巨磁阻单元进行了噪声研究,发现 GMR 电阻单元的长宽比对噪声大小有非常大的影响.通过对长分别为  $10\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ ,  $1000\ \mu\text{m}$  以及宽分别为  $2\ \mu\text{m}$ ,  $4\ \mu\text{m}$ ,  $6\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \mu\text{m}$  的 NiFe/Ag 多层膜的研究表明,GMR 传感器单元长宽比越大,所带来的噪声密度也就越大.

#### 5.1.2 直流偏置磁场和交流偏置磁场的影响

Nor 等<sup>[45]</sup>对 GMR 磁传感器在直流偏置磁场和交变磁场环境下的噪声作了分析,通过分析传感器在不同大小的直流偏置磁场的影响可以看出,外磁场的存在会加剧  $1/f$  噪声.通过改变外界交变磁场频率可以发现,GMR 磁传感器的  $1/f$  噪声对外界磁场有着很强的依赖关系.实验表明,随着外磁场频率的增加,噪声水平在交变磁场存在时有所下降.

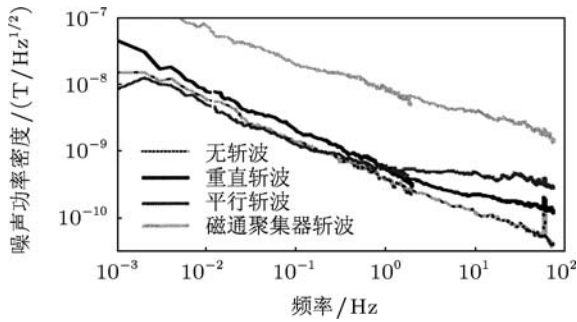
#### 5.1.3 制备工艺的影响

Stearrett 等<sup>[18,24,32]</sup>的研究表明,一定范围内,更长淬火时间和更高的淬火温度都使得 MTJ 的缺陷减少,TMR 增大,噪声降低.而淬火过程中发生的反应主要有 CoFeB 电极等的结晶化、MgO 缺陷的消除、Mn 等金属的扩散和对缺陷的抑制等.其中对于缺陷的抑制可以使得 MTJ 的 TMR 和噪声不会因为不同的偏置而明显变化.并且,有关实验已经证明 TMR 的变化是和 CoFeB 的晶体积随时间的变化相关的<sup>[27]</sup>.值得注意的是噪声和 TMR 均会随着淬火温度和时间变化,且减小和增大的趋势基本一致,但是噪声的变化稍微滞后于 TMR 的变化.此外,Liou 等<sup>[33]</sup>尝试了在 7 T 的强磁场下对 MTJ 进行淬火,并在氢气氛围中进行二次淬火,结果表明,这两种特殊的淬火方式均使得 MTJ 的低频噪声下降.

## 5.2 TMR 与 GMR 传感器的降噪措施

### 5.2.1 斩波技术

Jander 等人<sup>[27]</sup>利用斩波技术通过对自旋隧道结 (SDT) 传感器的测试研究 GMR 传感器的降噪措施.其中设计的斩波有三种:正交斩波、平行斩波和磁通聚集器斩波.其采用的方法为:制备正交偏执带、平行偏执带和磁通聚集器,通过对偏执带施加交变电流来产生交变磁场并作用于 SDT 敏感单元.这样,就将 GMR 器件的工作磁场由直流磁场调制到交变磁场,然后通过检测输出端的二次谐波分量来实现磁场检测的目的.通过斩波技术,Jander 等<sup>[27]</sup>证明了施加适当的交变偏执磁场,可以达到调制 GMR 工作频率的目的,同时可以降低传感器  $1/f$  噪声.各种斩波技术的施加对传感器噪声的影响如图 8.

图8 几种斩波技术对  $1/f$  噪声的影响

## 5.2.2 磁通聚集器

Edelstein 等<sup>[3,12]</sup>通过 MEMS 工艺制备了磁通聚集器来研究并降低 GMR 磁传感器的  $1/f$  噪声. 他们在 GMR 传感器单元两侧制备磁通聚集器, 通过连接在磁通聚集器上的微型弹簧片的震动带动磁通聚集器震动, 从而周期性的改变施加在 GMR 传感器上的磁场大小, 达到改变磁场频率的目的, 如图 9 所示. 实验表明, 通过磁通聚集器相对距离来改变 GMR 的工作磁场频率可以将 GMR 传感器的  $1/f$  噪声水平降低  $10^4$ .

### 5.2.3 从材料和制备工艺中减小噪声来源

在实验中通过自旋阀 GMR 薄膜钉扎层子层之间铁磁 - 反铁磁交换作用产生单向各向异性; 选择适当的磁各向异性, 改善易轴方向各向异性分布, 降低反铁磁耦合; 通过选用适当的软磁铁磁层, 保持较小的磁畴, 以抑制  $1/f$  噪声, 最后通过对 GMR 薄膜传感元件进行较低温度长时间的热处理使原子产生微小移动以消除局部应力, 增强各向异性, 改善磁电阻特性和热稳定性, 降低  $1/f$  噪声<sup>[35-39]</sup>. 对 GMR 传感器组成的惠斯通电桥进行磁场模拟, 以确定磁通聚集器件<sup>[15,27,38-43]</sup>的结构、间距和各层膜的厚度. 然后再通过微电子工艺制作和 GMR 传感器相匹配的磁通聚集器件通过变频电路改进减小低频噪声. 同时, 可以通过在强磁场中退火从而降低巨磁阻传感器  $1/f$  噪声中的磁至  $1/f$  噪声部分.

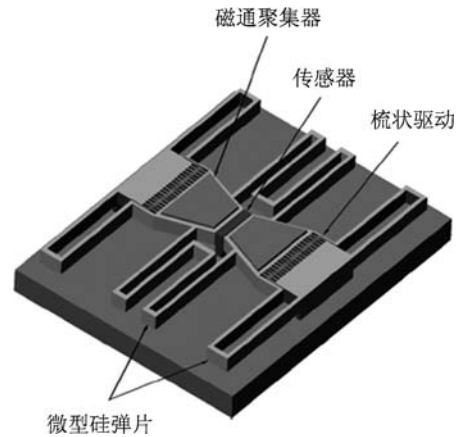


图9 MEMS 磁通聚集器

## 6 结论

TMR 及 GMR 传感器具有磁阻变化率大, 饱和磁场较低、单位磁场灵敏度高及温度特性较稳定等优点, 是制备高灵敏度低功耗微磁传感器的首选材料. 但由于  $1/f$  噪声的存在使得 TMR 与 GMR 传感器现在还无法完全代替 AMR 传感器作为新一代的高分辨率微磁传感器. 本文分析了近年来 TMR 与 GMR 传感器的  $1/f$  的噪声相关研究, 从理论模型方面将 TMR 传感器  $1/f$  噪声分成五个方面, 即运放噪声、散粒噪声、电子  $1/f$  噪声、热磁性噪声和磁性  $1/f$  噪声, 并给出了每种形式噪声的计算公式. 通过 Virtual NanoLab 计算了 Fe/MgO/Fe 型 MTJ 的磁阻变化率, 结果表明, 保守估计与乐观估计的 TMR 变化率, 分别为 98.1% 与 10324.55%, 通过 Mathematica 计算并分析了不同 MgO 厚度对其噪声的影响, 结果表明, MgO 厚度的增加会使低频噪声相对减小. 本文通过搭建磁阻传感器的噪声测试系统, 发现磁屏蔽环境对环境磁场具有较好的屏蔽效果, 为噪声检测提供了稳定的磁场空间. 但稳定的磁场环境是否有利于磁畴结构稳定, 从而降低了其磁性  $1/f$  噪声还有待进一步研究.

- [1] Scola J, Polovy H, Fermon C, Pannetier M, Feng G, Fahy K, Coey J M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 252501
- [2] Kurt H, Oguz K, Niizeki T, Coey J M D 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 083920
- [3] Edelstein A S, Fischer G, Pulskamp J, Pedersen M, Bernard W

2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08B317

- [4] Stutzke N A, Russek S E, Pappas D P, Tondra M 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10Q107
- [5] Peng S Q, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, He L, Chen W H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5205 (in Chinese) [彭绍泉, 杜磊, 庄弈琪, 包



- 军林, 何亮, 陈伟华 2008 物理学报 **57** 5205]
- [6] Du L, Zhuang Y Q, Xue L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2836(in Chinese) [杜磊, 庄弈琪, 薛丽君 2002 物理学报 **51** 2836]
- [7] Liang Z P, Dong Z C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1288 (in Chinese) [梁志鹏, 董正超 2010 物理学报 **59** 1288]
- [8] Yu G Q, Diao Z, Feng J F, Kurt H, Han X F, Coey J M D 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 112504
- [9] Feng J F, Diao Z, Feng G, Nowak E R, Coey J M D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 052504
- [10] Herranz D, Bonell F, Gomez-Ibarlucea A 2010 *J. Appl. Phys.* **96** 202501
- [11] Guerrero R, Pannetier-Lecoer M, Fermon C, Cardoso S, Freitas P P 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 113922
- [12] Egelhoff Jr W F, Pong P W T, Unguris J, McMichael R D, Nowak E R, Edelsteind A S, Burnetted J E, Fischer G A 2009 *Sens. Actuators* **155** 217
- [13] Nowak E R, Weissman M B, Parkin S S P 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 600
- [14] Jiang L, Nowak E R, Scott P E, Johnson J, Slaughter J M, Sun J J 2004 *Phys. Rev. B* **69** 054407
- [15] Nowak E R, Merithew R D, Weissman M B, Bloom I, Parkin S S P 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 6195
- [16] Ingvarsson S, Xiao G, Parkin S S P, Gallagher W J, Grinstein G, Koch R H 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3289
- [17] Gokce A, Nowak E R, Yang S H, Pankin S S P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08A906
- [18] Stearrett R, Wang W G, Shah L R, Gokce Aisha, Xiao J Q, Nowak E R 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 064502
- [19] Bhattacharya D K, Vaidyanathan S 1997 *J. Magn. Magn. Mater.* **166** 111
- [20] Hooge F N, Kleinpenning T G M, Vandamme L K J 1981 *Rep. Prog. Phys.* **44** 31
- [21] Xiao M, Klaassen K B 2000 *IEEE Trans. Magn.* **36** 5
- [22] Ren C, Liu X, Schrag B D, Xiao G 2004 *Phys. Rev. B* **69** 104405
- [23] Klaassen K B, Van Peppen J C L, Xing X 2005 *J. Appl. Phys.* **93** 8573
- [24] Ozbay A, Gokce A, Flanagan T, Stearrett R A, Nowak E R, Nordman C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 023502
- [25] Smith N, Amett P 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1448
- [26] Almeida J M, Ferreira R, Freitas P P, Langer J, Ocker B, Maass W 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08B314
- [27] Jander A, Nordman C A, Pohm A V, Anderson J M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 10
- [28] Tsang C, Fontana R E, Lin T, Heim D E 1994 *IEEE Trans. Magn.* **30** 3801
- [29] Ferreira R, Wisniowski P, Freitas P P, Langer J, Ocker B, Maass W 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08K706
- [30] Wang W G, Ni C, Rumaiz A, Wang Y, Fan X, Moriyama T, Cao R, Wen Q Y, Zhang H W, Xiao J Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 152501
- [31] Dutta P, Horn P M 1981 *Rev. Mod. Phys.* **53** 497
- [32] Wang W G, Jordan-Sweet J, Miao G X, Ni C, Rumaiz A K, Shah L R, Fan X, Parsons P, Stearrett R, Nowak E R, Moodera J S, Xiao J Q 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 242501
- [33] Liou S H, Zhang R, Russek S E, Yuan L, Halloran S T, Pappas D P 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07E920
- [34] Aliev F G, Guerrero R, Herranz D, Villar R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 232504
- [35] Veloso A, Freitas P P, Wei P, Barradas N P, Soares J C, Almeida B, Sousa J B 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1020
- [36] Hasegawa N, Koile F, Ikarashi K, Ishizone M, Lawamura M, Nakazawa Y, Takahashi A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 8774
- [37] Park W K, Moodera J S, Taylor J, Tondra M, Daughton J M, Thomas A, Bruckl H 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 7020
- [38] Ferreira R, Wisniowski P, Freitas P P, Langer J, Ocker B, Maass W 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08K706
- [39] Mazumdar D, Liu X, Schrag B D, Shen W, Carter M, Xiao G 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 09B502
- [40] Mazumdar D, Liu X, Schrag B D, Carter M, Shen W, Xiao G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 033507
- [41] Schrag B D, Anguelouch A, Invarsson S, Xiao G, Lu Y, Trouilloud P L, Gupta A, Wanner R A, Gallagher W J, Rice P M, Parkin S S P 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2373
- [42] Chaves R C, Freitas P P, Ocker B, Maass W 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 102504
- [43] Chaves R C, Freitas P P, Ocker B, Maass W 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07E931
- [44] Lhermet H, Cuchet R, Rochaz L V, Vaudaine M H 2000 *IEEE Trans. Magn.* **36** 5
- [45] Nor A F M, Hill E W 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 5
- [46] Diao Z, Feng J F, Kurt H 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 202506
- [47] 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

## Comprehensive Survey for the Frontier Disciplines

**Researching progress of the  $1/f$  noise in TMR and GMR sensors\***Wu Shao-Bing Chen Shi<sup>†</sup> Li Hai Yang Xiao-Fei*(Huazhong University of Science & Tech, Dept. of Electronic Science & Tech, Wuhan 430074, China)*

(Received 11 July 2011; revised manuscript received 30 September 2011)

**Abstract**

The low-frequency noise is the most important influence on the low frequency resolution and sensitivity in tunnel junction magnetoresistance(TMR) sensors and giant magnetoresistance (GMR) sensor for the large noise power density. In this paper, We describe the  $1/f$  noise characteristics, sources, theoretical models, testing methods and noise reduction measures for TMR sensors and GMR sensors, and the detailed physical model of  $1/f$  noise in the tunnel junction magnetoresistive sensor is explained. By nano-simulation software Virtual NanoLab, Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions (MTJs) with different thicknesses of MgO layer are studied. Their tunneling probabilities and TMR change rates are simulated and calculated, the conservative and the optimistic estimates of the Change rate of TMR are 98.1 % and 10324.55%. While the influence of MgO thickness on noise is studied through the MTJ model. To study the noise dependance on external magnetic field, an magnetic shielding equipment for noise measurement is set up, and the tests show that the noise in the magnetic shielding environment is significantly reduced.

**Keywords:** MTJ,  $1/f$  noise, flux-concentration**PACS:** 75.47.De, 07.10.Cm, 75.47.Jn, 85.70.Kh

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60871018).

<sup>†</sup> E-mail: s\_chen@sina.com