

隧穿磁电阻效应磁场传感器中低频噪声的测量与研究

曹江伟 王锐 王颖 白建民 魏福林

Measurement and study of low-frequency noise in TMR magnetic field sensor

Cao Jiang-Wei Wang Rui Wang Ying Bai Jian-Min Wei Fu-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 057501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.057501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.057501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双量子点结构中 Majorana 费米子的噪声特性

Shot noise characteristics of Majorana fermions in transport through double quantum dots

物理学报.2015, 64(16): 167302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167302>

面心立方单晶镍纳米线稳定性及磁性的第一性原理计算

Stability and magnetism of fcc single-crystal nickel nanowires by first principles calculations

物理学报.2011, 60(3): 037504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.037504>

对称抛物势阱磁性隧道结中的自旋输运及磁电阻效应

Spin-polarized electron transport and magnetoresistance effect in symmetric parabolic-well magnetic tunneling junction

物理学报.2011, 60(1): 017506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.017506>

# 隧穿磁电阻效应磁场传感器中低频噪声的测量与研究\*

曹江伟<sup>1)†</sup> 王锐<sup>1)</sup> 王颖<sup>1)</sup> 白建民<sup>1)2)</sup> 魏福林<sup>1)</sup>

1) (兰州大学, 磁学与磁性材料教育部重点实验室, 兰州 730000)

2) (无锡乐尔科技有限公司, 无锡 214000)

(2015年7月22日收到; 2015年12月23日收到修改稿)

基于隧穿磁电阻效应(TMR)的磁场传感器具有很高的磁场灵敏度,但同时噪声也较大,有效抑制TMR磁场传感器的噪声,尤其是低频噪声的抑制对于其在高灵敏度要求场合的应用具有重要的意义.本文采用高精度数据采集卡搭建了噪声测量系统,测量了全桥结构TMR磁场传感器的噪声频谱图,发现TMR传感器的噪声在低频段表现为 $1/f$ 特性,同时噪声功率谱密度与工作电流平方成正比关系;低频噪声在自由层翻转区间内噪声急剧增大,证明了 $1/f$ 噪声主要来源于磁噪声,这一结果为TMR磁场传感器的噪声特性优化指明了方向.

**关键词:** 隧穿磁电阻效应, 磁场传感器, 低频噪声**PACS:** 75.70.Cn, 73.40.Jn, 73.50.Td**DOI:** 10.7498/aps.65.057501

## 1 引言

基于隧穿磁电阻效应(TMR)的磁性隧道结(MTJ)由于其高的磁场灵敏度,已经被广泛应用在硬盘读出磁头中,并且在未来各种各样的磁性传感器中有很好的应用前景<sup>[1-3]</sup>.对于磁性传感器来说,其最小磁场分辨率不仅仅决定于其磁场灵敏度,还取决于器件的噪声<sup>[4]</sup>,尤其是对于包含氧化层的隧道结结构来说,氧化层的电子俘获效应和磁性层中的畴壁移动可能大大增加其噪声<sup>[5]</sup>,因此,TMR单元噪声的测量和分析对于其在磁性传感器中的应用是十分重要的<sup>[6]</sup>.

磁性隧道结的噪声主要包括热噪声、散粒噪声、低频噪声等.热噪声,也称之为Johnson噪声或者Nyquist噪声(VJN),起源于电子的随机热运动.散粒噪声,也称之为Shot噪声,由材料中电荷传导的不连续性引起,电荷的不连续会使材料中随机地产生振荡电流,使器件中存在噪声.热噪声

和散粒噪声是典型的“白噪声”,它们只和器件的总电阻和偏压有关,通常是无法被消除或者降低的,因此这种噪声也往往决定了传感器的终极分辨率.低频噪声,顾名思义就是在低频磁场测量时出现的主要噪声,包括 $1/f$ 噪声和随机电报噪声.根据其和磁性层的相关性, $1/f$ 噪声又包括磁性 $1/f$ 噪声<sup>[7,8]</sup>和非磁 $1/f$ 噪声<sup>[5]</sup>.初步的研究成果认为磁性 $1/f$ 噪声主要来源于磁性层的微扰而导致的电阻变化<sup>[7]</sup>,非磁 $1/f$ 噪声来源于氧化物势垒层或氧化物/铁磁层界面中的缺陷以及氧空穴导致的电荷俘获效应<sup>[9]</sup>;随机电报噪声主要来源于磁性层中热激发的磁畴壁在钉扎位之间的随机跳跃<sup>[5]</sup>.通常情况下,低频噪声要比“白噪声”高出几个数量级以上,因此它也就决定了磁场传感器的实际磁场分辨率,但这种噪声可以通过材料选择、制备工艺、结构设计的优化来消除或者减小<sup>[10-16]</sup>.例如,Mazumdar等<sup>[13]</sup>发现采用AlO势垒层隧道结的电压噪声要比相同条件下MgO势垒层的隧道结噪声更大一些,由于MgO隧道结具有更大的TMR效

\* 国家自然科学基金(批准号: 61102002, 51371101)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: caojw@lzu.edu.cn

应, 两者的场噪声 (电压噪声除以灵敏度) 则基本在同一水平上. Liou 等<sup>[14]</sup>报道通过强磁场或氢气气氛中热处理均可以使隧道结的噪声降低. Stearrett 等<sup>[15]</sup>报道隧道结的噪声随着热处理时间的增加而降低, 最终达到一个稳定值. Diao 等<sup>[16]</sup>发现采用电子束蒸发制备的 MgO 势垒层隧道结在低阻态下要比磁控溅射制备的隧道结低一个数量级.

目前传感器噪声的测试主要基于频谱分析仪来进行, 但频谱分析仪价格昂贵, 限制了其应用. 随着虚拟仪器技术的发展, 使用高精度数据采集卡测量器件的噪声成为可能. 本文采用在高精度数据采集卡 NI-6281 基础上搭建的噪声测量系统, 测量了 TMR 全桥磁场传感器的噪声频谱图, 分析了 TMR 传感器中噪声随工作电流外加磁场的变化关系, 阐明了传感器低频噪声的主要来源, 为 TMR 磁场传感器的噪声特性优化指明了方向.

## 2 噪声测试系统与 TMR 传感器

实验中用于测试低频噪声的测试系统如图 1 所示. 为了减小电源引入的噪声, 使用 1.5 V 干电池为 TMR 器件供电; 电路中接入电阻值在 0—3.3 k $\Omega$  范围内可调的电阻改变通过 TMR 器件中的电流; TMR 输出信号经型号为 DLPVA-100-F-D 的低噪声电压放大器放大, 为了减小电源引入的噪声, 电压放大器也使用干电池供电; 经低噪声放大器放大后的 AC 信号由高精度数据采集卡采集, 并由与之连接的计算机进行记录, 采用 Labview 对其进行频谱分析得到输出信号的噪声谱密度, 本实验中放大器增益为 80 dB, 即放大 10000 倍, 采集卡采样频率和采样数均为 200 k, 每条功率谱平均 1000 次以获得足够好的信号.

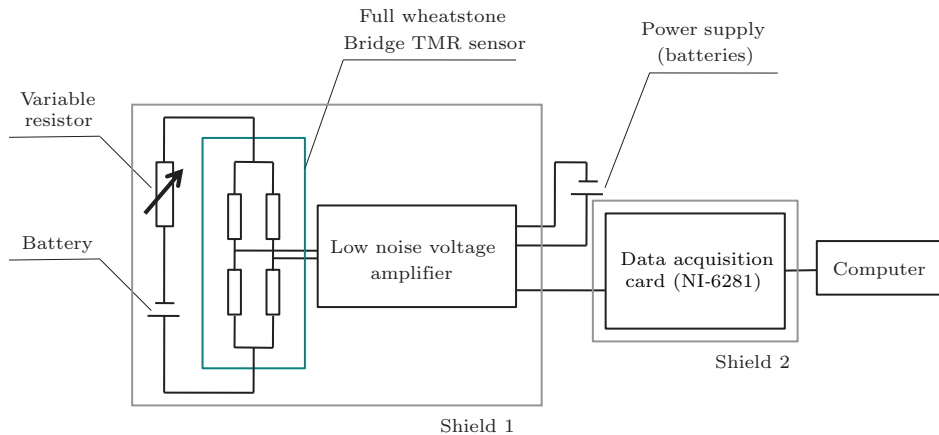


图 1 低频噪声测试系统

Fig. 1. Low-frequency noise measurement system.

实验中对测试系统加屏蔽罩以减小外界噪声的干扰, 屏蔽罩 1 是一个五层的标准屏蔽筒, 经测试桶内部的剩余磁场小于 2 nT, 屏蔽罩 2 是由金属材料组成, 以屏蔽数据采集卡对外界电磁场的接收.

## 3 TMR 传感器噪声理论

对于单个的 MTJ, 因为中间的绝缘层厚度很小, 所以电压过大时容易被击穿, 因此单个 MTJ 一般情况下只允许通过小于 1 V 的电压, 这不足以满足工业中的应用. 因此, 在实际应用中, 一般把几十个或者几百个 MTJ 串联起来, 形成长链状的 MTJ, 由此可以使传感器承受较高的电压. 为了消除器件

的温度漂移和直流偏置输出, 最终的传感器采用的惠斯通电桥结构.

实验中进行噪声测试的是由无锡乐尔科技有限公司提供的全桥 TMR 器件, 每个桥臂包含 32 个 MTJ 单元, MTJ 的结构为 Ta/Ru/Ta/PtMn/CoFe/Ru/CoFeB/MgO/CoFeB/NiFe/Ru/Ta, 采用磁控溅射方法制备,  $RA \approx 2.5 \text{ k}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ , MTJ 大小为  $50 \mu\text{m}^2$ . Egelhoff 等<sup>[3]</sup>的研究表明, 假定惠斯通电桥结构的 TMR 器件每个桥臂的噪声功率谱相同, 则全桥结构的 MTJ 噪声与单个臂的噪声一致, 单个桥臂的噪声可以由桥臂上每个 MTJ 的噪声进行线性相加得到, 则 TMR 器件的低频噪声可以表示为

$$\begin{aligned}
 & S_{V^2}(\text{V}^2/\text{Hz}) \\
 &= S_{1/f} + S_{\text{therm}} + S_{\text{shot}} \\
 &= N \frac{\alpha_H I^2 R_0^2}{A_0 f} + 4Nk_B T R_0 + 2NqIR_0^2 \\
 &= N \frac{\alpha_H I^2 (R/N)^2}{(A/N)f} + 4Nk_B T (R/N) \\
 &\quad + 2NqI(R/N)^2 \\
 &= \frac{\alpha_H I^2 R^2}{Af} + 4k_B T R + 2qIR^2/N, \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中,  $N$  表示惠斯通电桥中单个桥臂中 MTJ 的数目,  $R$  表示单个桥臂的电阻大小,  $R_0$  表示单个 MTJ 的阻值大小,  $A$  表示单个桥臂中  $N$  个 MTJ 的总面积,  $A_0$  表示单个 MTJ 大小.

当系统中有一个以上的噪声源, 以电压表征噪声时, 系统总的噪声等于各个噪声源的电压均方根的和<sup>[17]</sup>. 本实验的测试系统中电路(包括电压放大器和数据采集卡)会产生噪声, 在不考虑噪声耦合的情况下, 系统的低频总噪声谱密度可以表示为

$$\begin{aligned}
 & S_{\text{系统}V^2}(\text{V}^2/\text{Hz}) \\
 &= S_{\text{Amp}}(\text{V}^2/\text{Hz}) + S_{1/f}(\text{V}^2/\text{Hz}) \\
 &\quad + S_{\text{therm}}(\text{V}^2/\text{Hz}) + S_{\text{shot}}(\text{V}^2/\text{Hz}) \\
 &= S_{\text{Amp}}(\text{V}^2/\text{Hz}) + \frac{\alpha_H I^2 R^2}{Af} \\
 &\quad + 4k_B T R + 2qIR^2/N, \quad (2)
 \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned}
 & S_{\text{TMR}V^2}(\text{V}^2/\text{Hz}) \\
 &= S_{\text{系统}V^2}(\text{V}^2/\text{Hz}) - S_{\text{Amp}} \\
 &= \frac{\alpha_H I^2 R^2}{Af} + 4k_B T R + 2qIR^2/N. \quad (3)
 \end{aligned}$$

## 4 噪声测试结果与分析

由于测试电路本身具有一定的噪声(包括放大器噪声和采集卡噪声), 我们首先需要获得测试系统的噪声. 将低噪声电压放大器的输入端短路, 所测得的噪声即为系统中的电路噪声, 电路噪声能量谱密度曲线如图 2(a) 所示. 根据 (3) 式, 将测得的系统噪声减去电路噪声, 即得到 TMR 器件的噪声.

热噪声的能量谱密度表达式为  $S_{\text{therm}}(\text{V}^2/\text{Hz}) = 4k_B T R$ , 其中  $k_B$  为玻尔兹曼常数, 取值  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为测试温度, 实验中测试温度为 293 K;  $R$  为 MTJ 阻值; 实验测试中所用的 TMR 器件的阻值为  $1.63 \times 10^3 \Omega$ ; 由此可以得到器件的

热噪声为

$$S_{\text{therm}} = 4k_B T R = 2.63 \times 10^{-17} \text{ V}^2/\text{Hz}.$$

MTJ 散粒噪声的能量谱密度表达式为  $S_{\text{shot}}(\text{V}^2/\text{Hz}) = 2qIR^2/N$ , 其中  $q$  为单位电荷的电量;  $N$  为惠斯通全桥中单个桥臂上串联的 MTJ 个数, 实验中  $N$  值为 32;  $I$  为通过器件中的偏置电流, 对于偏置电流为 0.608 mA, 阻值为  $1.63 \times 10^3 \Omega$  的 TMR 器件, 可以得到器件的散粒噪声为

$$S_{\text{shot}} = 2qIR^2/N = 1.59 \times 10^{-17} \text{ V}^2/\text{Hz}.$$

热噪声和散粒噪声都属于白噪声, 则器件的白噪声的噪声谱为

$$S_{\text{background}} = S_{\text{therm}} + S_{\text{shot}} = 4.22 \times 10^{-17} \text{ V}^2/\text{Hz}.$$

通过器件中偏置电流为 0.608 mA 时, 在低频段的噪声谱分布如图 2(b) 所示, 由噪声谱分布可以看出, 在频率低于 10 kHz 的低频段, 白噪声(包括热噪声和散粒噪声)与  $1/f$  噪声相比是足够小的, 说明在低频段对 TMR 的传感器噪声起主要贡献的是  $1/f$  噪声.

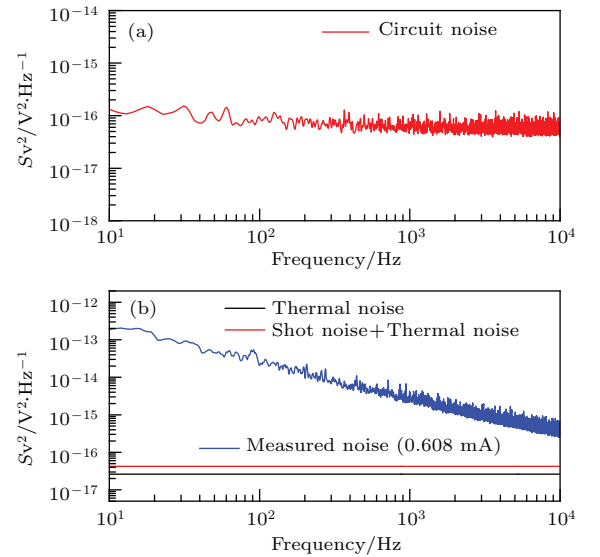


图 2 (网刊彩色) 电路及 TMR 传感器的噪声谱密度曲线 (a) 电路噪声; (b) 0.608 mA 时测得的噪声及计算得到的热噪声和 shot 噪声

Fig. 2. (color online) The noise power spectral density of the circuit and TMR sensor: (a) Circuit noise; (b) measured noise spectral and calculated value of thermal noise and shot noise with 0.608 mA current.

### 4.1 电流对 MTJ 低频噪声的影响

实验中通过调节可调电阻改变通过 MTJ 的偏置电流, 电流不同时器件的噪声谱分布如图 3(a) 所示.

由图 3(a)可以看出, 随着偏置电流的增加 MTJ 噪声增大. 为了研究噪声谱密度随电流的变化关系, 图 3(b) 给出了 100 Hz 和 4 kHz 下噪声谱密度随电流平方的变化曲线, 可以看出在误差范围内噪声谱密度与电流的平方成正比. 因为热噪声和散粒噪声与频率无关, 则 TMR 的低频噪声可以表示为

$$S_{V^2} = \frac{\alpha_H I^2 R^2}{A f} + k, \quad (4)$$

其中  $k$  为常数, 表示热噪声和散粒噪声的能量谱密度之和. 取  $C = \alpha_H I^2 R^2 / A$ ,  $\alpha_H$  为 Hooge 参数,  $I$  为通过器件的电流,  $R$  为器件电阻,  $A$  为隧道结面积, 对于固定的器件, 它们均为常数, 则 (4) 式可以变形为

$$S_{V^2} = C \cdot \frac{1}{f} + k. \quad (5)$$

当电流为  $I_n$  时,  $C$  可以表示为  $C(I_n^2) = \alpha_H I_n^2 R^2 / A$ ; 电流为  $I_m$  时,  $C$  可以表示为  $C(I_m^2) = \alpha_H I_m^2 R^2 / A$ , 由此得到

$$\frac{C(I_n^2)}{C(I_m^2)} = \frac{\alpha_H I_n^2 R^2 / A}{\alpha_H I_m^2 R^2 / A} = \frac{I_n^2}{I_m^2}, \quad (6)$$

即常数  $C$  与通过器件电流的平方成正比. 通过计算得到的偏置电流分别为  $I_1 = 1840 \mu\text{A}$ ,  $I_2 = 1408 \mu\text{A}$ ,  $I_3 = 783 \mu\text{A}$ ,  $I_4 = 608 \mu\text{A}$  时,  $C(I_n^2)/C(I_m^2)$  的理论值如表 1 所列.

我们对 MTJ 的噪声能量谱密度与  $1/f$  进行线性拟合, 得到通过 MTJ 中偏置电流不同时, MTJ 中噪声能量谱密度分布的拟合曲线, 可以得到常数  $C$  的大小. 偏置电流不同时 MTJ 噪声分布及其拟合曲线如图 3(a) 中的直线所示. 由此可以求出偏置电流为  $I_n$  和  $I_m$  时  $\frac{C(I_n^2)}{C(I_m^2)}$  的实验值, 如表 1 所列.

由表 1 可以看出, 在假设  $\alpha_H$  和偏置电流  $I_n$  无关时所计算出的  $\frac{C(I_n^2)}{C(I_m^2)}$  的理论值, 与通过实验测试数据所得到的  $\frac{C(I_n^2)}{C(I_m^2)}$  的实验值有很好的—致

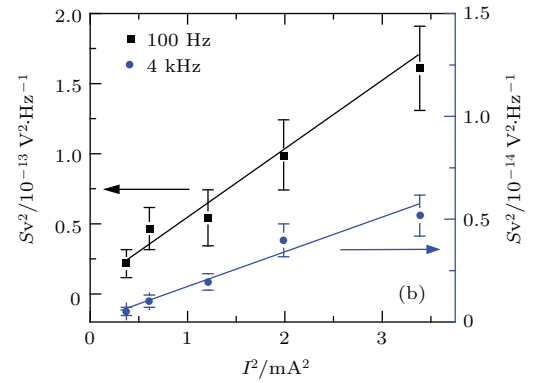
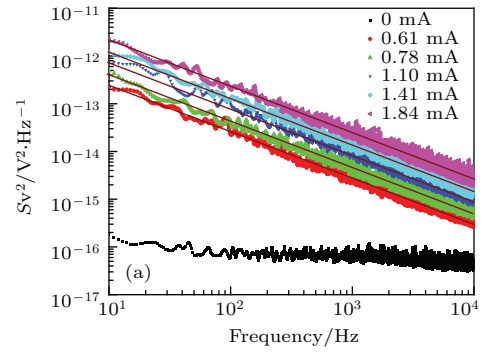


图 3 (网刊彩色) (a) 偏置电流不同时 TMR 传感器噪声谱密度; (b) 100 Hz 和 4 kHz 下噪声谱密度随电流平方的变化关系  
Fig. 3. (color online) (a) The noise power spectral density of the TMR sensor with various bias current; (b) the dependence of noise power spectral density on the square of the current ( $I^2$ ) at 100 Hz and 4 kHz.

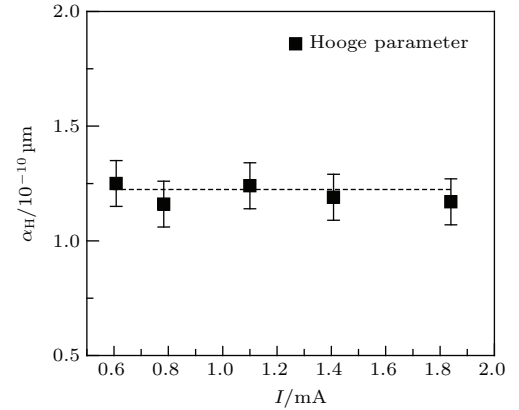


图 4 Hooge 参数随偏置电流的变化关系  
Fig. 4. Hooge parameters with different bias current.

表 1 偏置电流  $I$  不同时,  $C(I_n^2)/C(I_m^2)$  的理论值与实验值比较

Table 1. Comparison of theoretical and experimental value of  $C(I_n^2)/C(I_m^2)$  with various bias current.

	理论值	实验值	实验值/理论值		理论值	实验值	实验值/理论值
$C(I_1^2)/C(I_2^2)$	1.707	1.677	0.983	$C(I_2^2)/C(I_3^2)$	3.233	3.336	1.032
$C(I_1^2)/C(I_3^2)$	5.522	5.624	1.019	$C(I_2^2)/C(I_4^2)$	5.362	5.136	0.958
$C(I_1^2)/C(I_4^2)$	9.158	8.618	0.941	$C(I_3^2)/C(I_4^2)$	1.658	1.540	0.929



性, 进一步验证了当工作电流变化时, 器件的噪声与电流的平方成正比. 通过拟合获得的常数  $C$ , 我们还可以获得不同偏置电流下的 Hooge 参数, 如图 4 所示. 可以看出在误差范围内  $\alpha_H$  和通过 MTJ 中的偏置电流  $I_n$  无关.

### 4.2 外界磁场对 MTJ 噪声的影响

TMR 器件的灵敏度方向上加上磁场, 测试磁场值不同时 MTJ 的噪声谱密度, 结果如图 5(a) 所示. 实验证明在 MTJ 自由层处于磁化饱和态处的噪声比翻转过程中的噪声小的多, 而且在饱和磁化情况下噪声谱密度的  $1/f$  特征消失. 传感器的  $R-H$  曲线和特定频率下的噪声谱密度值随磁场变化如图 5(b) 和 (c) 所示, 其中噪声谱密度和电阻随磁场变化关系是在相同偏置条件下测得, 从图中也可以看出噪声谱密度和  $R-H$  曲线斜率表现出一致的关系. 这是因为 MTJ 自由层翻转区间内, 磁畴结构的不稳定性会引起磁化振荡而造成磁噪声; 当磁性层处于磁化饱和状态, 自由层磁矩处于较稳定的

状态, 磁化振荡减弱, 因此磁噪声在磁化饱和时被消除, 这是造成自由层在磁化饱和态噪声小很多的原因, 同时也证明了 TMR 传感器中  $1/f$  噪声主要起源于磁噪声. 在磁滞回线区间内噪声功率谱强烈地依赖于外加磁场说明磁噪声主要起源于自由层和钉扎层中的热磁扰动, 而 Jiang 等<sup>[5]</sup> 认为这一热磁扰动主要起源于热激发导致的磁畴壁在钉扎位之间的跳跃.

如前所述, 传感器的最小磁场分辨率不仅仅决定于其磁场灵敏度, 还取决于器件的噪声, 可以根据 (7) 式计算得到<sup>[4]</sup>.

$$H_{\min}(\text{T} \cdot \text{Hz}^{-0.5}) = \frac{S_V(\text{V} \cdot \text{Hz}^{-0.5})}{I \Delta R/H}. \quad (7)$$

从图 5 中传感器的  $R-H$  曲线和噪声谱图可以得到, 在 1 V 的工作电压下, 传感器的灵敏度为 9 mV/Oe ( $1 \text{ Oe} = 1/(4\pi) \times 10^3 \text{ A/m}$ ), 传感器最小可探测的磁场在 100 Hz 和 4 kHz 下分别为 9 和 1.3 nT.

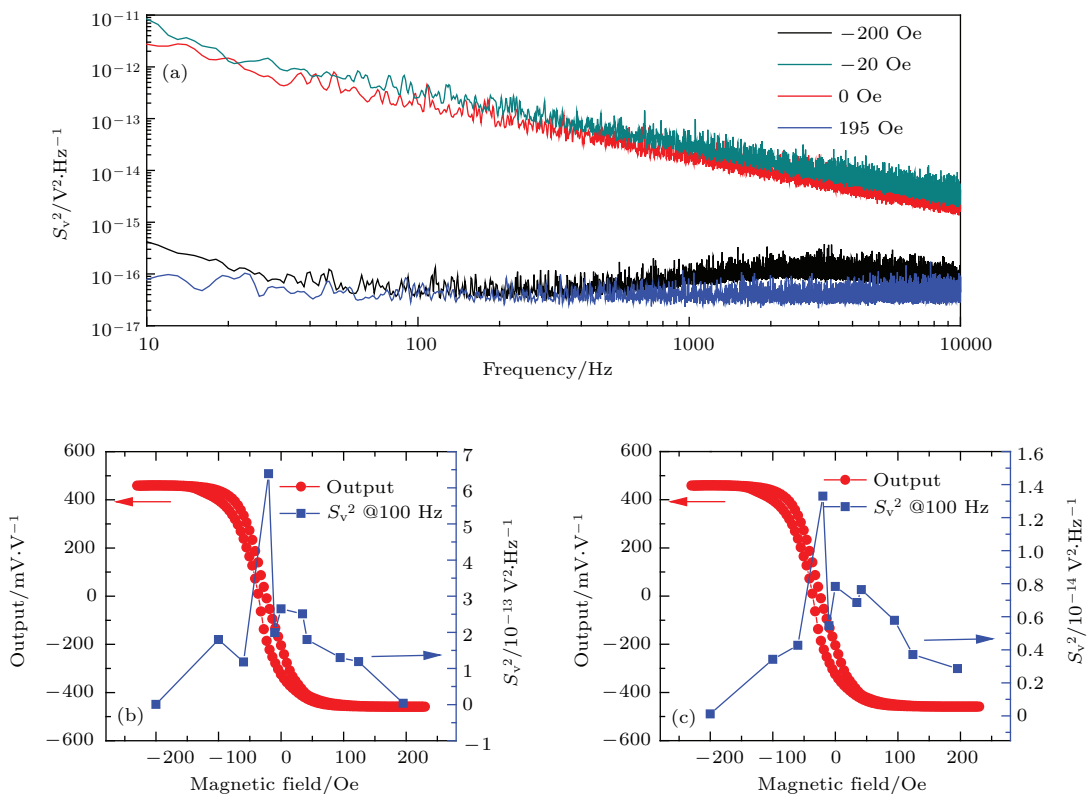


图 5 (网刊彩色)(a) 不同磁场下噪声谱密度曲线; (b) 传感器输出曲线及 100 Hz 下噪声谱密度值随外加磁场的变化关系; (c) 传感器输出曲线及 4 kHz 下噪声谱密度值随外加磁场的变化关系

Fig. 5. (color online) (a) The noise power spectral density with different external magnetic field; (b) transfer curve of the TMR sensor and the field dependence of noise power spectral density at 100 Hz; (c) transfer curve of the TMR sensor and the field dependence of noise power spectral density at 4 kHz.

## 5 结 论

本文采用高精度数据采集卡搭建了低频噪声测量系统, 测量了全桥结构TMR磁场传感器的噪声频谱图, 发现TMR传感器的噪声在低频段表现为 $1/f$ 特性, 同时噪声与工作电流成正比关系, Hooge参数与偏置电流无关; 在自由层翻转区间内噪声急剧增大, 证明了 $1/f$ 噪声主要来源于磁噪声, 磁噪声主要由于磁畴结构的不稳定性导致的电阻扰动引起, 这一结果为TMR磁场传感器的噪声特性优化指明了方向.

## 参考文献

- [1] Edelstein A 2007 *J. Phys. Condens. Matter* **19** 165217
- [2] Wu S B, Chen S, Li H, Yang X F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 097504 (in Chinese) [吴少兵, 陈实, 李海, 杨晓非 2012 物理学报 **61** 097504]
- [3] Egelhoff Jr W F, Pong P W T, Unguris J, McMichael R D, Nowak E R, Edelstein A S, Burnette J E, Fischer G A 2009 *Sens. Actuators A* **155** 217
- [4] Freitas P P, Ferreira R, Cardoso S Cardoso F 2007 *J. Phys. Condens. Matter* **19** 165221
- [5] Jiang L, Nowak E R, Scott P E, Johnson J, Slaughter J M, Sun J J, Dave R W 2004 *Phys. Rev. B* **69** 054407
- [6] Guo H, Tang W, Liu L, Wei J, Li D, Feng J, Han X 2015 *Chin. Phys. B* **24** 078504
- [7] Ingvarson S, Xiao G, Parkin S, Gallagher W, Grinstein G, Koch R 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3289
- [8] Ren C, Liu X, Schrag B Xiao G 2004 *Phys. Rev. B* **69** 104405
- [9] Reed D S, Nordman C, Daughton J M 2001 *IEEE Trans. Magn.* **37** 2028
- [10] Scola J, Polovy H, Fermon C, Pannetier-Lecoecur M, Feng G, Fahy K Coey J M D 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 252501
- [11] Pannetier M, Fermon C, Goff G L, Simola J, Kerr E, Coey J M D 2005 *J. Magn. Magn. Mater.* **290-291** 1158
- [12] Herranz D, Bonell F, Gomez-Ibarlucea A, Andrieu S, Montaigne F, Villar R Tiusan C Aliev F G 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 202501
- [13] Mazumdar D, Liu X, Schrag B D, Shen W, Carter M, Xiao G 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 09B502
- [14] Liou S H, Zhang R, Russek S E, Yuan L, Halloran S T, Pappas D P 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07E920
- [15] Stearrett R, Wang W G, Shah L R, Aisha G, Xiao J Q, Nowak E R 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 064502
- [16] Diao Z, Feng J F, Kurt H 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 202506
- [17] Motchenbacher C D, Connelly J A 1993 *Low-Noise Electronic System Design* (New York: John Wiley and Sons, Inc.) pp38-52

# Measurement and study of low-frequency noise in TMR magnetic field sensor\*

Cao Jiang-Wei<sup>1)†</sup> Wang Rui<sup>1)</sup> Wang Ying<sup>1)</sup> Bai Jian-Min<sup>1)2)</sup> Wei Fu-Lin<sup>1)</sup>

1) (*Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2) (*Lertech Technology, Wuxi 214000, China*)

( Received 22 July 2015; revised manuscript received 23 December 2015 )

## Abstract

The magnetic field sensor based on tunnel magnetoresistance (TMR) effect has potential applications in various fields due to its very high field sensitivity and low power consumption. However, the resolution of magnetic sensor depends on not only field sensitivity, but also intrinsic noise level. The intrinsic noise of an electronic device is normally frequency-dependent and increases in low frequency range. In a magnetic tunneling system, thermal magnetization fluctuation in the magnetic layer can couple to the resistance through the spin-dependent tunneling effect and create low-frequency magnetic noise. In addition, the charge trapping effect in the oxide barrier may also contribute to the external low-frequency noise. Therefore, the depression of the noise in TMR magnetic field sensor, especially the low-frequency noise, is extremely important for the application with high resolution requirement. In this work, a low-frequency noise measurement system for TMR magnetic sensor is built by using a highaccuracy data acquisition card and a low noise preamplifier. After subtracting the circuit noise from the measured noise, the noise spectral patterns of TMR magnetic field sensor with a full Wheatstone bridge structure are obtained under various bias currents and external magnetic fields. It is found that the noise spectra of the TMR sensor exhibit a clear  $1/f$  character in the low frequency region and the noise power spectral intensity is proportional to the square of the bias current. By fitting the power spectral density of the noise versus frequency in the TMR sensor, the Hooge parameters are obtained, which remain unchanged in the measurement. The noise intensity increases abruptly in the magnetization switching region of the free layer in magnetic tunnel junction, suggesting that the  $1/f$  noise mostly comes from the magnetic noise. In a magnetic hysteresis loop, this noise power is strongly field-dependent, which is due to thermal magnetization fluctuations in magnetic layers. We attribute this magnetic fluctuation to thermally excited hopping of the magnetic domain wall between the pinning sites. Finally, according to the  $R$ - $H$  transfer curves and the measured noise spectra of the TMR sensor, the detectable minimum magnetic fields of the sensor are 9 nT and 1.3 nT at 100 Hz and 4 kHz with 1 V input voltage, respectively. These results pave a way for optimizing the noise properties of TMR magnetic sensors.

**Keywords:** tunnel magnetoresistance, magnetic field sensors, low-frequency noise

**PACS:** 75.70.Cn, 73.40.Jn, 73.50.Td

**DOI:** 10.7498/aps.65.057501

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61102002, 51371101).

† Corresponding author. E-mail: caojw@lzu.edu.cn