

电流焦耳热调控反转型垂直 $(\text{Co}/\text{Pt})_n/\text{Co}/\text{IrMn}$ 纳米多层膜结构的交换偏置效应研究*

丰家峰^{1)†} 魏红祥¹⁾ 于国强¹⁾ 黄辉²⁾ 郭经红²⁾ 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) (国网智能电网研究院有限公司, 北京 102209)

(2022 年 8 月 7 日收到; 2022 年 9 月 6 日收到修改稿)

交换偏置效应影响磁敏传感器中的关键性能参数. 在外加磁场辅助下, 本文提出一种电流产生的焦耳热调控交换偏置效应的研究方法. 通过该方法, 系统调控了反转型垂直纳米多层膜结构 $(\text{Co}/\text{Pt})_n/\text{Co}/\text{IrMn}$ (简称垂直多层膜结构, $n+1$ 是 Co 层周期数) 的面内交换偏置效应, 不仅连续改变了交换偏置场 H_{eb} 大小, 而且实现了 H_{eb} 的翻转. 在垂直多层膜结构中, 如果固定外加磁场 H_{p} (脉冲电流 I_{DC}) 后连续改变 I_{DC} (H_{p}) 的大小可以连续调控 H_{eb} 的数值; 如果固定 H_{p} (I_{DC}) 后同时改变 I_{DC} (H_{p}) 的大小和方向, 则在较大 I_{DC} 时可实现 H_{eb} 的翻转. 结果表明, 该方法可以用来原位调控磁敏传感器的线性磁场范围和灵敏度等关键性能参数, 对磁敏传感器的优化研究具有重要的借鉴意义.

关键词: 磁敏传感器, 交换偏置效应, 电流焦耳热, 垂直纳米多层膜结构

PACS: 85.75.Ss, 71.70.Gm, 75.70.Cn, 85.75.Nn

DOI: 10.7498/aps.72.20221584

1 引言

20 世纪 50 年代, Meiklejohn 和 Bean^[1,2] 在研究 CoO 包裹的 Co 颗粒体系时首次发现了交换偏置效应 (exchange bias effect). 随后, 伴随着自旋电子学中巨磁电阻效应的发现^[3,4] 以及真空镀膜技术的发展, 交换偏置效应得到了广泛而深入的研究. 这主要是因为交换偏置效应不仅具有丰富的物理内涵, 还具有重要的应用价值, 例如它已经成功应用于磁随机存储存取器、磁敏传感器^[5–7] 等自旋电子学器件中. 交换偏置效应通常在铁磁性材料/反铁磁性材料结构 (简称“交换偏置结构”) 中被观察到^[1,2,8–10], 例如在 NiFe/FeMn ^[11], CoFe/IrMn ^[12] 等双层薄膜结构中发现的面内交换偏置效应, 在 $(\text{Co}/\text{Pt})_n/\text{Co}/\text{FeMn}$ ^[13], $[\text{Co}/\text{Pt}]_n/\text{Co}/\text{IrMn}$ ^[14,15] 等垂直多层膜结构中发现的垂直交换偏置效应. 在交

换偏置结构中, 交换偏置场 (exchange bias field, H_{eb}) 是铁磁性材料磁滞回线中心偏离零磁场的数值大小. 随着温度的升高, H_{eb} 逐渐降低, $H_{\text{eb}}=0$ 时对应的温度是反铁磁性材料的阻塞温度 (blocking temperature, T_{B}); 实验发现, T_{B} 和反铁磁性材料的厚度密切相关^[16–19].

截至目前, 除了额外带磁场退火的方法外, 调控交换偏置效应的方法还有电场^[20–22]、自旋极化电流矩^[23]、自旋霍尔效应^[24] 和电流热效应^[25] 等. Papusoi 等^[25] 在电流热效应调控交换偏置效应的工作中详细讨论了脉冲电流时间及功率对热辅助的磁随机存储器中 H_{eb} 大小的影响, 但是没有报道 H_{eb} 的翻转, 这是因为热效应对反铁磁有序度的破坏不可逆. 本工作以反转型垂直纳米多层膜结构 $(\text{Co}/\text{Pt})_n/\text{Co}/\text{IrMn}$ (周期数为 $n+1$, Co 层厚度大于 Pt 层厚度^[15], 简称“垂直多层膜结构”) 为基础, 系统研究了脉冲电流产生的焦耳热调控其面内

* 国家重点研发计划项目 (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. 在垂直多层膜结构中紧邻反铁磁性层 IrMn 的 Co 层 (简称“界面 Co 层”) 具有面内各项异性, 其余 $(\text{Co/Pt})_n$ 多层膜具有垂直各项异性 (图 1). 利用焦耳热不仅改变了垂直多层膜结构的 H_{eb} 数值大小, 而且实现了 H_{eb} 的翻转 (这和文献 [25] 不同). 本工作对磁敏传感器的应用有着重要的借鉴意义, 因为交换偏置场的大小直接影响磁敏传感器中线性磁场动态范围和灵敏度等关键性能参数 [26,27].

2 实验细节

利用日本真空集团 (ULVAC) 的超高真空磁控溅射系统 (型号 MPS-4000-HC7), 在热氧化硅衬底上生长了垂直多层膜结构 $\text{Pt3/Cu6}/(\text{Co0.5/Pt0.25})_n/\text{Co0.5/Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(\text{IrMn})8.2/\text{Pt3}$ (单位纳米, $2 \leq n+1 \leq 6$), 更多样品制备细节可见文献 [15]. H_{eb} 是在样品生长时通过外加磁场诱导产生的. 随后, 利用紫外曝光和氩离子刻蚀技术加工制作了 $10 \mu\text{m}$ 宽的条状结构 [图 1(a)]. 紧接着, 我们利用了 Quantum Design 公司的多功能物性测量系统 (the physical property measurement system) 对垂直多层膜的条状结构进行了输运性能表征. 文中所有数据都是室温时在外加面内磁场下利用面内电流测量完成的, 如图 1(a) 所示.

3 实验结果与讨论

3.1 电流焦耳热的产生

由于垂直多层膜结构各层薄膜都是金属材料, 因此随着温度的降低, 霍尔电阻 (R_H) 线性下降, 如图 2(a) 插图所示. 在 300 K 时, 根据条状结构的

电流-电压 (I - V) 曲线关系, 可以获得脉冲电流 (I_{DC}) 产生的焦耳热导致样品被加热之后的温度与 I_{DC} 的关系 (见图 2(a)). 这里一个脉冲电流的宽度是 10 ms, 间隔是 100 ms (下同, 除非另外说明). 实验发现, 随着 I_{DC} 增大, 样品温度非线性升高. 当 $I_{\text{DC}} > 30 \text{ mA}$ 后, 热效应逐步增强; 在 75 mA 时样品温度接近反铁磁性材料 IrMn (8.2 nm) 的 T_B ($\sim 427 \text{ K}$ [18,19,28,29]). 从图 2(b) 知道, H_{eb} 随着温度的升高单调下降 [30]. 当样品温度超过 325 K 时, IrMn 的反铁磁磁矩出现 (部分) 无序; 将 IrMn 存在磁矩部分无序行为的温度区间 (325—427 K) 定义为反铁磁 (磁矩) 无序区 (图 2(b)). 通过后文可知, 在反铁磁无序区交换偏置效应仍然 (部分) 存在, 并可通过额外施加一磁场实现交换偏置效应的翻转. 为了真实地反应测量 R_H - H (磁场) 曲线之后的样品温度, 通过 R_H - H 曲线获得了长时间 (相当于在测量一条 R_H - H 曲线的过程中相同脉冲电流在样品上反复施加了 150 余次) 施加 I_{DC} 的情况下, 样品温度随着 I_{DC} 的变化情况. 从图 2(a) 中可以看出, 反复施加相同 I_{DC} 时, 样品的实际温度更高. 例如在 $I_{\text{DC}} = 65 \text{ mA}$ 时, 反复施加 I_{DC} 样品的温度比一次性施加 I_{DC} 的高 85 K 左右.

3.2 调控交换偏置效应的测试结果

为了验证图 2(a), 图 3 中给出了 $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构的面内 R_H - H 曲线图. 在微弱电流下, $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构具有负的面内交换偏置效应 ($H_{\text{eb}} = -590 \text{ Oe}$). 其中 $H_{\text{eb}} = (H_1 + H_2)/2$, H_1 和 H_2 见图 3(a). 随着脉冲电流的增大, H_{eb} 逐步减小 (图 4); 当 $I_{\text{DC}} = 49 \text{ mA}$ 时, H_{eb} 只剩余 -17 Oe , 如图 3(b) 所示. 相比于初始态 (-590 Oe),

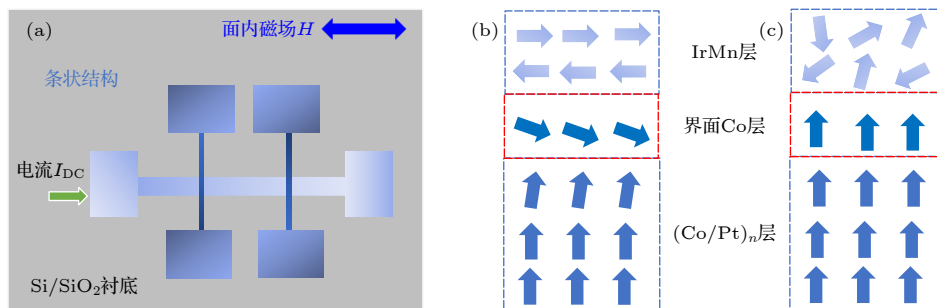


图 1 (a) 条状结构示意图 (脉冲电流 I_{DC} 和面内磁场 H 见图中标识); (b) 和 (c) 垂直多层膜结构在初始态和大 I_{DC} 施加后的各磁性层磁矩分布示意图

Fig. 1. (a) Schematic strip structure (a pulse current I_{DC} and an in-plane magnetic field H are marked); (b) and (c) the magnetic moments for $n+1$ at the initial state and under a large I_{DC} .

$I_{DC} = 49$ mA 时 $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构的交换偏置效应几乎消失. 此时 IrMn 处于反铁磁无序

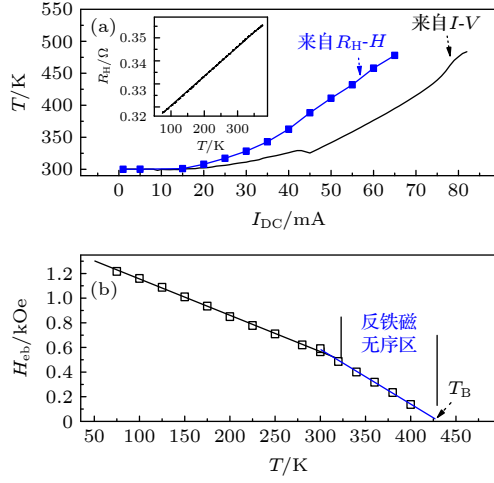


图 2 (a) 脉冲电流 (I_{DC}) 产生的焦耳热对应的样品温度与 I_{DC} 的关系; (b) $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构的 H_{eb} 随着温度的变化关系. (a) 中插图是 $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构的 R_H 随着温度的线性变化关系

Fig. 2. The sample temperature due to the Joule heating as a function of I_{DC} ; (b) the temperature dependence of H_{eb} for $n+1 = 2$. The insert in (a) shows the linear relation between R_H and the temperature for $n+1 = 2$.

区, 样品温度骤升至 IrMn 的 T_B 附近, 这从图 3 中 R_H 在平行态 (反平行态) 的升高对应的样品温度变化也可以推算出来. 由此可知, 脉冲电流 I_{DC} 引发的热效应有效调控了垂直多层膜结构的面内交换偏置效应.

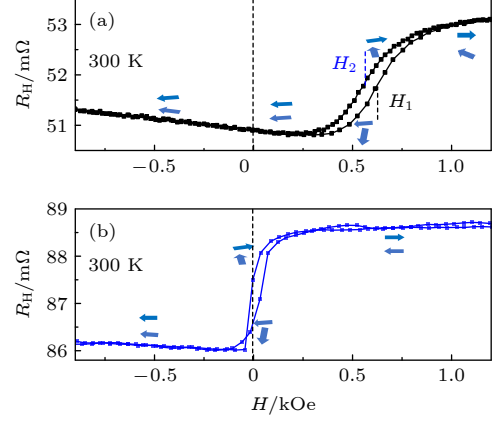


图 3 $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构在 $I_{DC} = 1$ mA (a) 和 49 mA (b) 时的面内 R_H - H 曲线. 各 Co 层磁矩随着外加磁场的转变也放在了图中

Fig. 3. The in-plane R_H - H curves for $n+1 = 2$ under $I_{DC} = 1$ mA (a) and 49 mA (b). The magnetic moments of each Co layer as a function of the field are also given.

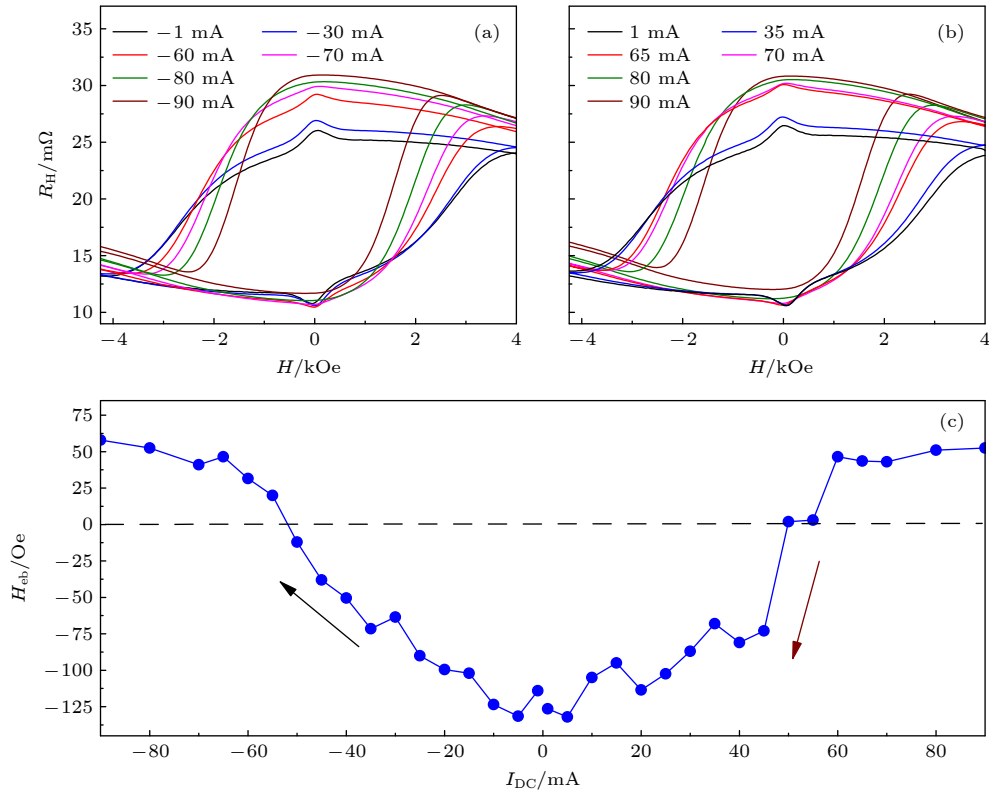


图 4 (a) 和 (b) 分别是 $n+1 = 5$ 的垂直多层膜结构在不同负、正电流下的面内 R_H - H 曲线; (c) $n+1 = 5$ 的垂直多层膜结构的 H_{eb} 随着 I_{DC} 的变化关系

Fig. 4. (a) and (b) The in-plane R_H - H curves for $n+1 = 5$ under different negative and positive I_{DC} ; (c) the I_{DC} dependence of H_{eb} for $n+1 = 5$.

实验发现, 在连续改变脉冲电流的情况下, 脉冲电流诱发的热效应能够连续调控 H_{eb} (图 4). 针对 $n+1 = 5$ 的垂直多层膜结构, 其在 1 mA 时的起始面内 $R_{\text{H}}-H$ 曲线如图 4(a) 所示, 零磁场附近 R_{H} 的改变来自于界面 Co 层的磁矩. 随着脉冲电流的增大 (从 ± 1 mA 逐步增大到 ± 30 , ± 40 , ± 50 mA 甚至更高), H_{eb} 被连续调控; 当 $I_{\text{DC}} = \pm(50-55)$ mA 时 H_{eb} 变为零. 尽管交换偏置效应消失, 零磁场附近的界面 Co 层磁矩随磁场的转动依然发生, 一直到 $I_{\text{DC}} = 70$ mA 左右. 这是由于虽然 IrMn 处于反铁磁无序区 (图 2), 但因为测量 $R_{\text{H}}-H$ 曲线过程中施加了一定的外加磁场, 使得已经降低了的 IrMn 的反铁磁无序发生改变. 当 $I_{\text{DC}} \geq 70$ mA 时, IrMn 的反铁磁磁矩变得完全无序, 面内 $R_{\text{H}}-H$ 曲线中只剩下具有垂直各项异性的各 Co 层的霍尔信号. 此时, 界面 Co 层的磁矩方向已经从面内转到了面外, 见图 1(b) 和 (c). 另外, 如图 5(a) 和 (b), 随着 IrMn 层的反铁磁磁矩无序度增大, R_{H} 只在反平行态在逐渐增大, 当界面 Co 层磁矩也变得垂

直时, R_{H} 在反平行态达到最大值.

除了图 3 和图 4 中所示的脉冲电流连续调控 H_{eb} 数值大小的方法外, 实验中还发现了一种翻转 H_{eb} 的方法. 这个方法的依据是, 通过 I_{DC} 产生的焦耳热将 IrMn 温度升至反铁磁无序区, 随后额外施加一面内磁场 H_{p} 改变 IrMn 的钉扎方向. 在这里, 固定 I_{DC} 改变 H_{p} 的大小和方向或者固定 H_{p} 改变 I_{DC} 的大小和方向, 均可实现 H_{eb} 的翻转. 这种直接翻转 H_{eb} 的具体操作是, 在施加一定磁场 H_{p} 和大的 I_{DC} 后, 再在微小电流 (1 mA) 下测量样品的面内 $R_{\text{H}}-H$ 曲线. 首先, 如图 5(a) 所示, 通过 $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构的起始面内 $R_{\text{H}}-H$ 曲线可知其 $H_{\text{eb}} < 0$; 紧接着, 固定 I_{DC} 为 2 s/45 mA, 当施加 $H_{\text{p}} = 4$ kOe 后再在 1 mA 时测量面内 $R_{\text{H}}-H$ 曲线, 此时 $H_{\text{eb}} > 0$. 随后, 在保持 2 s/45 mA 不变并且施加 -1 kOe 后, 测量 1 mA 时的 $R_{\text{H}}-H$ 曲线, 发现此时 H_{eb} 再次发生翻转 ($H_{\text{eb}} < 0$). 最后, 为了验证重复性, 继续固定 I_{DC} (2 s/45 mA) 并施加 H_{p} (4 kOe) 后, 再测量 1 mA 时的 $R_{\text{H}}-H$ 曲

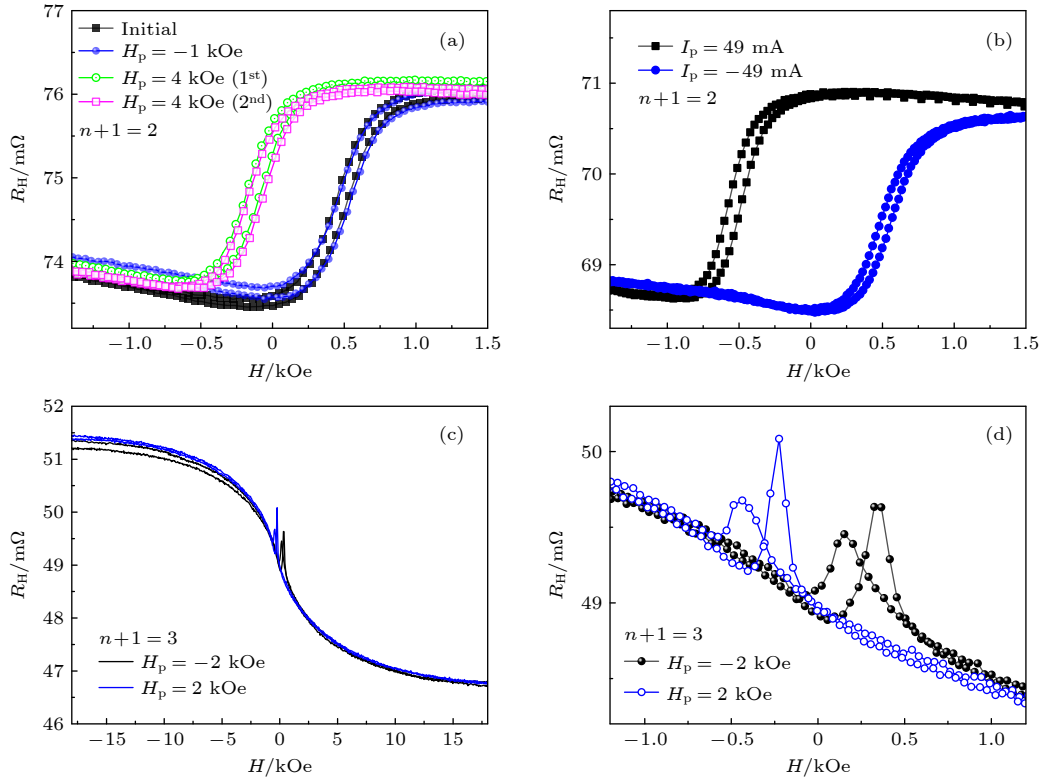


图 5 (a)–(c) $n+1 = 2$ 和 3 的垂直多层膜结构的面内 $R_{\text{H}}-H$ 原始曲线以及施加不同 H_{p} 和 2 s/45 mA 后、4 kOe 和 2 s/ ± 49 mA 后和 ± 2 kOe 和 2 s/ -40 mA 后再在 1 mA 时测量获得的内 $R_{\text{H}}-H$ 曲线; (d) (c) 图在小磁场范围的 $R_{\text{H}}-H$ 曲线放大图, 显示了界面 Co 层的磁矩信号

Fig. 5. (a)–(c) The in-plane $R_{\text{H}}-H$ curves for $n+1 = 2$ (3) after applied different H_{p} and I_{DC} , taken at 1 mA; (d) the zoom of the in-plane $R_{\text{H}}-H$ curves shown in (c), which only gives the moment variation of the interface Co layer.

线, 发现了与原先几乎一样大小的正的 H_{eb} . 其次, 如图 5(b) 所示, 固定 $H_p = 4$ kOe, 改变脉冲电流的方向, 当 I_{DC} 从 2 s/49 mA 变为 2 s/-49 mA 后, $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构的 H_{eb} 从正变到了负. 另外, 通过图 5(a) 和 (b) 发现, 翻转后 H_{eb} 的大小和 $H_p(I_{\text{DC}})$ 有一定关联 (图 6). 例如大的 I_{DC} 导致翻转之后的 H_{eb} 数值也大, 这是因为大的 I_{DC} 增大了 IrMn 的反铁磁磁矩的无序度.

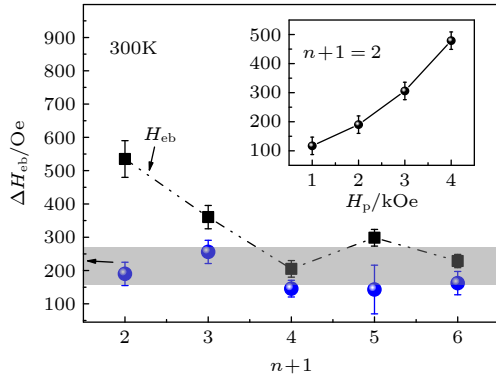


图 6 $n+1 = 2-6$ 的垂直多层膜结构在 $I_{\text{DC}} = 40$ mA 和 $H_p = 2$ kOe 时获得的 ΔH_{eb} , 不同 $n+1$ 的垂直多层膜结构的 H_{eb} 绝对值也放在了图中. 插图是 $n+1 = 2$ 的垂直多层膜结构在 $I_{\text{DC}} = 40$ mA 和 $H_p = 1-4$ kOe 时获得的 ΔH_{eb} . Fig. 6. The ΔH_{eb} at $I_{\text{DC}} = 40$ mA and $H_p = 2$ kOe for $n+1$. The absolute H_{eb} changing with $n+1$ is also shown. The insert shows the H_p dependence of ΔH_{eb} for $n+1 = 2$ at $I_{\text{DC}} = 40$ mA and $H_p = 1-4$ kOe.

随后, 为了验证重复性, 选择 $n+1=3$ 的垂直多层膜结构进行大磁场范围内霍尔信号的测量. 实验发现, 固定 2 s/40 mA 的脉冲电流, 当施加的 H_p 从 -2 kOe 变到 2 kOe 后, 再分别测量 1 mA 时的 $R_{\text{H}}-H$ 曲线后就获得了交换偏置效应的翻转. 为了进一步确认实验结果, 在图 5(d) 中仅仅显示了霍尔信号发生改变的磁场范围. 通过图 5(c) 和 (d) 可知, 在 ± 0.5 kOe 的磁场范围内是界面 Co 层的霍尔信号; 而在 0.5 kOe 以上是其余 $(\text{Co}/\text{Pt})_n$ 垂直多层膜中各 Co 层的霍尔信号. 由图 5(d) 可确认, 本文中翻转的交换偏置效应只和反铁磁性层 IrMn 和界面 Co 层相关.

最后, 为了检测脉冲电流产生的焦耳热对交换偏置效应的影响程度, 选择图 5 中施加 I_{DC} 和 H_p 的方式来调控面内 H_{eb} . 此处面内交换偏置场的改变量被定义为 ΔH_{eb} , 它是起始 H_{eb} (未施加大脉冲电流的交换偏置场) 和施加 I_{DC} , H_p 后获得的 H_{eb} 之间的差值绝对值. 针对 $n+1 = 2$ 的垂直多层膜

结构在 $I_{\text{DC}} = 2$ s/40 mA, $H_p = 1-4$ kOe 时, 随着外加磁场的增大, ΔH_{eb} 的数值从 177 Oe 增至 479 Oe (图 6 插图). 另外, 针对 $n+1 = 2-6$ 的垂直多层膜结构, 在 2 s/40 mA 和 2 kOe 的条件下, ΔH_{eb} 的变化范围在 150-250 Oe 区间. 如果去除样品差异性 (即不考虑 $n+1$ 对 H_{eb} 的影响), ΔH_{eb} 在一定的脉冲电流和外加磁场下倾向于一个常数 (~ 200 Oe), 如图 6 所示. ΔH_{eb} 随着 $n+1$ 保持一个常数是由于 H_{eb} 属于界面效应 [28-31], 即 H_{eb} 主要来自于 IrMn 及界面 Co 层之间的反铁磁性交换耦合作用. 虽然 H_{eb} 属于界面效应, 但可以发现, H_{eb} 绝对值随着 $n+1$ 的增大快速降低后很快趋于饱和. 这是由于其余 $(\text{Co}/\text{Pt})_n$ 纳米多层膜和界面 Co 层之间的磁性相互作用影响了 IrMn 及界面 Co 层之间的反铁磁性交换耦合作用, 尤其是在 $n+1$ 较小的时候.

3.3 电流焦耳热调控的交换偏置场影响磁敏传感器的性能分析

在文章的最后一部分, 我们讨论一下在磁敏传感器的应用中变化的交换偏置场如何影响磁敏传感器的线性磁场范围和灵敏度等关键性能参数 [26,27,32]. 为了提升传感器性能, 需要优化含有交换偏置效应的磁性纳米多层膜结构以及其中各层纳米薄膜的工艺参数, 这就需要样品制备、微加工工艺优化和性能表征等复杂过程. 例如, 在文献 [26] 中, 我们通过两次退火工艺实现了线性传感功能, 并通过优化、改变磁性隧道结中参考层 NiFe/Ru/CoFeB 里面的 NiFe 厚度改变了交换偏置场大小, 从而系统地调控了线性磁场范围和灵敏度. 在文献 [32] 中, 陈栖洲等利用了多种磁性交换耦合结构优化了面内霍尔传感器的灵敏度等性能参数.

为了便于磁敏传感器的设计和优化, 可以利用本文的结论, 即通过电流产生的热效应原位调控交换偏置场的大小来优化、改变磁敏传感器的关键性能参数. 如图 7 所示, 当电流焦耳热调控磁敏传感器中的交换偏置效应后, 由于 H_{eb} 的改变, 磁传感原始信号因此变成了调控信号 1 或 2. 具体来说, 为了提高磁敏传感器的灵敏度, 可以采用调控信号 2; 为了扩大线性工作区, 可以考虑调控信号 1. 因此, 利用电流焦耳热导致的交换偏置效应的原位改变可实现对磁敏传感器的关键性能参数的调控 [33]. 在实际应用中, 为了避免大电流条件下对磁性隧道

结中绝缘层的损伤,可以在绝缘层上面或者下面引出调控交换偏置效应的测量线。

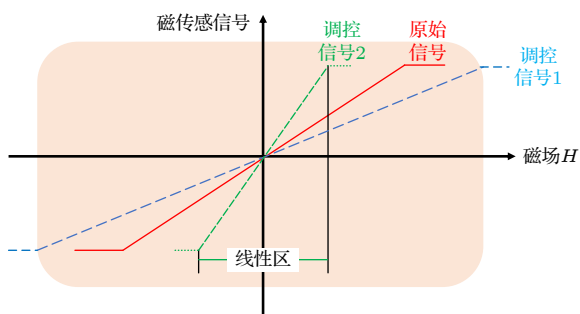


图 7 电流焦耳热调控交换偏置所致的磁敏传感器的性能参数改变示意图

Fig. 7. The signal variation of magnetoresistive sensors due to the modulation of the exchange bias by the current induced Joule heating.

4 结 论

本文考虑到磁敏传感器设计、优化过程中面临的复杂过程,提出了一种利用电流的焦耳热原位调控交换偏置效应的研究方法,并且利用垂直多层膜结构 $(\text{Co}/\text{Pt})_n/\text{Co}/\text{IrMn}$ ($n+1=2-6$) 验证了该方法的可行性. 实验发现,一定大小的脉冲电流产生的焦耳热能够加热反铁磁性层 IrMn 至其 T_B 附近,使 IrMn 处于反铁磁无序区,此时界面 Co 层磁矩从面内转向面外. 由于不同的电流导致的 IrMn 的反铁磁磁矩的无序度不同,因此,在外加磁场作用下垂直多层膜结构的交换偏置效应出现了改变甚至翻转. 如果将该方法应用到磁敏传感器中,可以实现交换偏置场的人为调控,从而为优化磁敏传感器的关键性能参数提供便利. 因此,本文研究结果对磁敏传感器中线性磁场范围和灵敏度等关键性能参数的设计、优化提供了更多的选择维度.

参考文献

- [1] Meiklejohn W H, Bean C P 1956 *Phys. Rev.* **102** 1413
- [2] Meiklejohn W H, Bean C P 1957 *Phys. Rev.* **105** 904
- [3] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, Zinn W 1989 *Phys. Rev. B* **39** 4828
- [4] Baibich M N, Broto J M, Fert A, Nguyen van Dau F, Petroff F, Eitenne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
- [5] Parkin S S P, Roche K P, Samant M G, Rice P M, Beyers R B, Scheuerlein R E, O'Sullivan E J, Brown S L, Buchigano J, Abraham D W, Lu Y, Rooks M, Trouilloud P L, Wanner

- R A, Gallagher W J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 5828
- [6] Freitas P P, Ferreira R, Cardoso S, Cardoso F 2007 *J. Phys. Cond. Mat.* **19** 165221
- [7] Dieny B, Speriosu V S, Parkin S S P, Gurney B A, Wilhoit D R, Mauri D 1991 *Phys. Rev. B* **43** 1297
- [8] Stamps R L 2000 *J. Phys. D Appl. Phys.* **33** R247
- [9] Nogué J, Schuller Ivan K 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **192** 203
- [10] Nogué J, Sort J, Langlais V, Skumryeva V, Suriñachb S, Muñozb J S, Baró M D 2005 *Phys. Rep.* **422** 65
- [11] Jungblut R, Coehoorn R, Johnson M T, van de Stegge J, Reinders A 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 6659
- [12] Imakita K I, Tsunoda M, Takahashi M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3812
- [13] Garcia F, Moritz J, Ernult F, Auffret S, Rodmacq B, Dieny B, Camarero J, Penneec Y, Pizzini S, Vogel J 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 2730
- [14] Chen J Y, Feng J F, Diao Z, Feng G, Coey J M D, Han X-F 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 1401
- [15] 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
- [16] Zaag P J van der, Feiner L F, Wolf R M, Borchers J A, Ijiri Y, Erwin R W 2000 *Physica B* **276** 638
- [17] Eckert J C, Stern N P, Snowden D S, Sparks P D, Carey M J 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 6608
- [18] Devasahayam A J, Sides P J, Kryder M H 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 7216
- [19] Lombard L, Gapihan E, Sousa R C, Dahmane Y, Conraux Y, Portemont C, Ducruet C, Papusoi C, Prejbeanu I L, Nozières J P, Dieny B, Schuhl A 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 09D728
- [20] Chen X, Hochstrat A, Borisov P, Kleemann W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 202508
- [21] Wu S M, Cybart S A, Yi D, Parker J M, Ramesh R, Dynes R C 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 067202
- [22] Shiratsuchi Y, Tao Y R, Toyoki K, Nakatani R 2021 *Magnetochemistry* **7** 36
- [23] Tang X L, Zhang H W, Su H, Zhong Z Y, Jing Y L 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 122504
- [24] Kim H J, Je S G, Jung D H, Lee K S, Hong J 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 022401
- [25] Papusoi C, Sousa R C, Dieny B, Prejbeanu I L, Conraux Y, Mackay K, Nozières J P 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 013915
- [26] 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
- [27] 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
- [28] Jenkins S, Chantrell R W, Evans R F L 2021 *Phys. Rev. B* **103** 014424
- [29] Baltz V, Sort J, Landis S, Rodmacq B, Dieny B, 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 117201
- [30] Shi Z, Du J, Zhou S M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 027503
- [31] Zhou X F, Chen X Z, You Y F, Liao L Y, Bai H, Zhang R Q, Zhou Y J, Wu H Q, Song C, Pan F 2020 *Phys. Rev. Appl.* **14** 054037
- [32] Chen X Z, Wang X F, Zhang H W, Zhong Z Y 2011 *J. Magn. Mater. Devices* **42** 4 (in Chinese) [陈栖洲, 汪学锋, 张怀武, 钟智勇 2011 *磁性材料及器件* **42** 4]
- [33] Ranjbar S, Mahdawi M, Oogane M, Ando Y 2020 *AIP Adv.* **10** 025119

Exchange bias effect of current Joule thermally modulated inverted vertical (Co/Pt) n /Co/IrMn nanomultilayers^{*}

Feng Jia-Feng^{1)†} Wei Hong-Xiang¹⁾ Yu Guo-Qiang¹⁾ Huang Hui²⁾
Guo Jing-Hong²⁾ Han Xiu-Feng¹⁾

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*)

(Received 7 August 2022; revised manuscript received 6 September 2022)

Abstract

The exchange bias has a crucial influence on the key performance parameters of magnetoresistive sensor, which has wide applications in many fields. This paper presents a method that uses the Joule heating effect combined with a magnetic field to modulate the exchange bias in magnetic multilayers. By this method, we systematically modulate the in-plane exchange bias field (H_{eb}) in the inverted (Co/Pt) $_n$ /Co/IrMn structure ($n + 1$ is the repetition of the Co layers), here the thickness of the Pt layer is smaller than that of the Co layer. In these inverted structures, the H_{eb} can be continuously modulated by changing the amplitude of a pulse current I_{DC} (an in-plane magnetic field H_{p}) after fixing an H_{p} (I_{DC}). In more detail, the H_{eb} decreases gradually by increasing the I_{DC} and its polarity of the H_{eb} can be reversed finally, which will not disappear even under a large I_{DC} . Furthermore, if both the amplitude and direction of I_{DC} (H_{p}) are changed, with a H_{p} (I_{DC}) fixed, a reversal of H_{eb} can be realized from positive (negative) to negative (positive) direction under a large I_{DC} . From here, one may find that the modulation of the exchange bias in our text is totally different from the normal case one thinks, where the H_{eb} becomes zero under a large enough I_{DC} due to the pure heating effect. Therefore, we believe that the above results show that our method can modulate in situ the linear field range and sensitivity, which has important significance in guiding the optimization of the performance parameters of magnetoresistive sensors.

Keywords: magnetoresistive sensors, exchange bias effect, current-induced Joule heating, perpendicular magnetic multilayers

PACS: 85.75.Ss, 71.70.Gm, 75.70.Cn, 85.75.Nn

DOI: 10.7498/aps.72.20221584

^{*} Project is supported by National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2021YFB3201800, 2021YFB3201801).

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

电流焦耳热调控反转型垂直 (Co/Pt)_n/Co/IrMn 纳米多层膜结构的交换偏置效应研究

丰家峰 魏红祥 于国强 黄辉 郭经红 韩秀峰

Exchange bias effect of current Joule thermally modulated inverted vertical (Co/Pt) n /Co/IrMn nanomultilayers

Feng Jia-Feng Wei Hong-Xiang Yu Guo-Qiang Huang Hui Guo Jing-Hong Han Xiu-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 018501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221584

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221584>

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

Heusler合金 $\text{Mn}_{50x}\text{Cr}_x\text{Ni}_{42}\text{Sn}_8$ 的相变、磁性与交换偏置效应

Phase transformation, magnetic properties, and exchange bias of Heusler alloy $\text{Mn}_{50x}\text{Cr}_x\text{Ni}_{42}\text{Sn}_8$

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

基于IrMn/Fe/Pt交换偏置结构的无场自旋太赫兹源

Field-free spintronic terahertz emitters based on IrMn/Fe/Pt exchange bias heterostructures

物理学报. 2022, 71(4): 048703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211831>

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>

具有不同交换偏置方向的外延FeGa/IrMn双层膜的磁各向异性与磁化翻转

Magnetic anisotropy and reversal in epitaxial FeGa/IrMn bilayers with different orientations of exchange bias

物理学报. 2022, 71(12): 127501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220166>

自旋轨道矩调控的垂直磁各向异性四态存储器结构

Demonstration of four-state memory structure with perpendicular magnetic anisotropy by spin-orbit torque

物理学报. 2018, 67(11): 117501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180216>

基于宽禁带GaN基异质结结构的垂直型高温霍尔传感器

Demonstration of wide-bandgap GaN-based heterojunction vertical Hall sensors for high-temperature magnetic field detection

物理学报. 2019, 68(15): 158502 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190413>