

Co/Ni 多层膜垂直磁各向异性的研究

俱海浪 李宝河 吴志芳 张璠 刘帅 于广华

Perpendicular magnetic anisotropy in Co/Ni multilayers studied by anomalous Hall effect

Ju Hai-Lang Li Bao-He Wu Zhi-Fang Zhang Fan Liu Shuai Yu Guang-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 097501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.097501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时域有限差分法的各向异性铁氧体圆柱电磁散射分析

Finite-difference time domain method for the analysis of radar scattering characteristic of metal target coated with anisotropic ferrite

物理学报.2014, 63(13): 137501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137501>

FeMn 掺杂 AlN 薄膜的制备及其特性研究

Study on preparation and characteristics of Fe- and Mn-doped AlN thin films

物理学报.2013, 62(21): 217504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.217504>

Ge 纳米结构的形貌与铁磁性研究

Morphology and ferromagnetism of Ge nanostructure

物理学报.2013, 62(3): 037502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037502>

引入纳米氧化层的 CoFe/Pd 双层膜结构中增强的垂直磁各向异性研究

Research on enhanced perpendicular magnetic anisotropy in CoFe/Pd bilayer structure

物理学报.2012, 61(16): 167505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.167505>

CoFeB/Pt 多层膜的垂直磁各向异性研究

Perpendicular magnetic anisotropy in the CoFeB/Pt multilayers by anomalous Hall effect

物理学报.2012, 61(16): 167504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.167504>

Co/Ni多层膜垂直磁各向异性的研究*

俱海浪¹⁾²⁾ 李宝河^{1)†} 吴志芳¹⁾ 张璠¹⁾ 刘帅²⁾ 于广华²⁾

1)(北京工商大学理学院, 北京 102488)

2)(北京科技大学材料物理与化学系, 北京 100083)

(2014年10月24日收到; 2014年12月11日收到修改稿)

采用直流磁控溅射法在玻璃基片上制备了Pt底层的Co/Ni多层膜样品, 对影响样品垂直磁各向异性的各因素进行了调制, 通过样品的反常霍尔效应系统的研究了Co/Ni多层膜的垂直磁各向异性. 结果表明, 多层膜中各层的厚度及周期数对样品的反常霍尔效应和磁性有重要的影响. 通过对多层膜各个参数的调制优化, 最终获得了具有良好的垂直磁各向异性的Co/Ni多层膜最佳样品Pt(2.0)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2)/Pt(2.0), 经计算, 该样品的各向异性常数 K_{eff} 达到了 $3.6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, 说明样品具备良好的垂直磁各向异性. 最佳样品磁性层厚度仅为0.8 nm, 样品总厚度在5 nm以内, 可更为深入的研究其与元件的集成性.

关键词: Co/Ni多层膜, 垂直磁各向异性, 反常霍尔效应, 各向异性常数

PACS: 75.70.-i, 75.30.Gw, 75.47.-m

DOI: 10.7498/aps.64.097501

1 引言

磁纳米结构磁性层的磁矩若能垂直于膜面, 则称其具有垂直磁各向异性(perpendicular magnetic anisotropy, PMA), 此类材料称为垂直磁纳米结构材料, 在自旋电子学方面有着重要的应用^[1]. 由于磁矩与膜面垂直, 能够形成更小的记录单元, 可以大幅度提高磁纳米结构的存储密度; 垂直磁纳米结构可消除磁性层面内的涡旋式转动对面积和形状的限制; 在电流诱导磁化翻转方面, 垂直磁纳米结构所需的电流密度比面内结构小, 所以能够降低器件的功耗. 反常霍尔效应在磁性多层膜PMA方面的研究有着重要应用^[2-4], 是表征材料体系铁磁态的重要工具. 反常霍尔效应的物理现象与正常霍尔效应很相似, 但物理机理却很复杂^[5], 其物理起源有内禀机理和外禀机理^[6-11], 其中内禀机理基于理想晶体能带模型, 而外禀机理基于外在杂质、缺陷、声子散射, 但两种机理都认为电子的自旋轨道耦合是反常霍尔效应产生的主要原因. 霍尔电阻率

ρ_{xy} 与外加磁场 B 的关系表达式为^[12]

$$\rho_{xy} = R_o B + 4\pi R_S M_{\perp}, \quad (1)$$

其中 R_o 为正常霍尔系数, R_S 为反常霍尔系数, 反常霍尔效应比正常霍尔效应大一个数量级以上, 一般认为 ρ_{xy} 正比于样品磁矩的垂直分量^[13], 可以通过测量样品的霍尔电阻率随外加磁场的关系曲线来研究磁性薄膜的PMA.

具有PMA性质的材料有 $L_{10}\text{FePt}$ 有序化结构^[14,15], Co(CoFe)/Pt(Ni, Pd)多层膜结构等^[16-18]. 近年来对PMA材料的研究主要集中在铁磁层/非磁层多层膜结构及其合金^[19]、氧化层/铁磁层多层膜结构^[20]等方面, 关于铁磁层之间相互耦合多层膜的PMA研究不多. Co/Ni多层膜在磁性随机存取(magnetic random access memory, MRAM)、自旋转移力矩(spin transfer torque, STT)^[21]等自旋器件及畴壁移动技术^[22-25]等方面的研究有着重要的应用. 王日兴等^[26]以 $[\text{Co/Ni}]_4$ 多层膜为例, 对垂直磁各向异性自旋阀结构中磁场驱动和调节的铁磁共振进行了理论方面的研究; Zhang等^[27]通过反常霍尔效应研究了

* 国家自然科学基金(批准号: 11174020)和北京市大学生科研计划(批准号: SJ201402045)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lbhe@th.btbu.edu.cn

Co/Ni多层膜的热稳定性, 但为了获得良好PMA性质, 样品的Pt底层厚度达到了32 nm, 这对于多层膜在器件中的集成不是很有利. 系统的研究Co/Ni多层膜PMA的报道很少.

本文应用磁控溅射法, 通过调节Pt底层、周期层中Co层与Ni层的厚度及周期数等方法制备出更薄的、具有良好PMA性质的Co/Ni多层膜样品, 通过测量样品的反常霍尔效应对其PMA进行了系统的研究, 最终获得了最佳样品, 并对其磁性能进行了分析.

2 实验

样品用直流磁控溅射法在玻璃基片上制备而成, 溅射设备样品台带自转, 工作时基片以1.7 r/s的速度旋转, 保证了样品的均匀性. 系统本底真空度优于 2.0×10^{-5} Pa, 溅射工作气体为纯度99.999%的Ar气, 工作气压为0.5 Pa. 用Dektak150型台阶仪测定靶材的溅射速率, 分别为Pt: 0.075 nm/s, Co: 0.047 nm/s, Ni: 0.042 nm/s. 本文中样品厚度均用nm表示. 样品结构为 $Pt(t_{Pt})/[Co(t_{Co})/Ni(t_{Ni})]_n/Co(t_{Co})/Pt(2.0)$, 其中底层Pt厚度 t_{Pt} 的变化范围从2到6 nm, 周期层中Co层厚度 t_{Co} 的变化范围从0.1到0.3 nm, Ni层厚度 t_{Ni} 的变化范围从0.4到0.8 nm, 周期数 n 变化范围从1到3, 所有样品用2 nm厚Pt做保护层防止样品氧化. 将制备好的样品切成8 mm × 15 mm大小的矩形, 用四探针法测量其霍尔曲线, 可以获得样品的霍尔电阻(Hall resistance, R_{Hall})和矫顽力(coercivity, H_C)信息, 磁场方向垂直于膜面. 样品的磁滞回线由国家纳米科学中心综合物性测试系统(PPMS)的振动样品磁强计(VSM)插件测量.

3 实验结果与讨论

图1(a)所示为改变样品 $Pt(t_{Pt})/[Co(0.2)/Ni(0.5)]_2/Co(0.2)/Pt(2.0)$ 中Pt底层厚度 t_{Pt} 时样品的霍尔曲线, 图1(b)为对应样品的霍尔电阻和矫顽力的变化曲线. 为了使样品具有较为明显的霍尔效应, 多层膜的周期数均为2. 从图中可以看到, 所有样品的矩形度良好, 剩磁比(M_r/M_s)均达到了100%, 说明样品均具备良好的PMA. 图1(b)中Pt底层变厚时, 样品的霍尔电阻逐渐减小, 这是由于变厚的Pt对样品的分流作用增加导致的; 而样品

矫顽力随Pt厚度的变化单调增加, 这是因为Pt底层变厚使Co/Ni多层膜的(111)织构增强, 而(111)织构对应样品PMA^[28], 所以矫顽力单调增加. 从图1(a)可看出, 当Pt厚度为2时, 样品霍尔曲线矩形度最好, 并且霍尔信号最强, 以下实验中样品Pt底层厚度均为2.

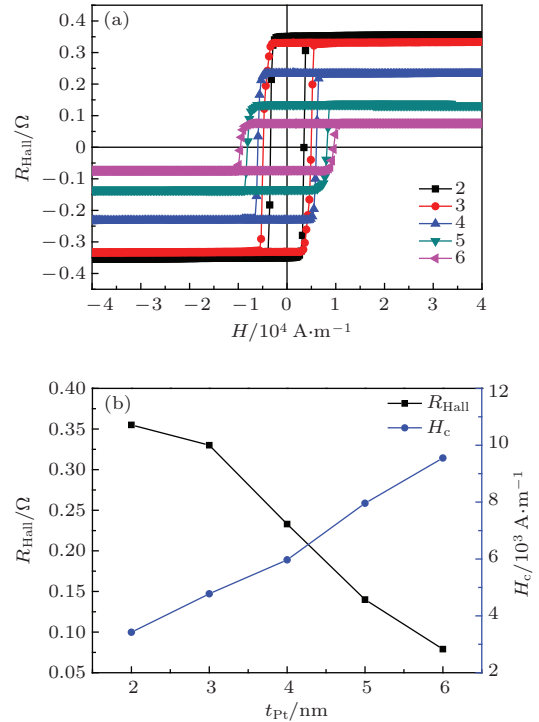


图1 (网刊彩色) (a) $Pt(t_{Pt})/[Co(0.2)/Ni(0.5)]_2/Co(0.2)/Pt(2.0)$ 的霍尔曲线; (b) $Pt(t_{Pt})/[Co(0.2)/Ni(0.5)]_2/Co(0.2)/Pt(2.0)$ 的霍尔电阻及矫顽力
Fig. 1. (color online) (a) Hall loops of $Pt(t_{Pt})/[Co(0.2)/Ni(0.5)]_2/Co(0.2)/Pt(2.0)$; (b) R_{Hall} and H_C of $Pt(t_{Pt})/[Co(0.2)/Ni(0.5)]_2/Co(0.2)/Pt(2.0)$.

图2(a)所示为改变样品 $Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(t_{Ni})]_2/Co(0.2)/Pt(2.0)$ 中Ni层厚度 t_{Ni} 时样品的霍尔曲线, 图2(b)为对应样品的霍尔电阻和矫顽力的变化曲线. 可以看到, 除Ni厚度为0.8时样品矩形度相对略差外, 其他样品的矩形度都很好, 所有样品剩磁比(M_r/M_s)均达到了100%, 说明在Ni厚度变化过程中, 样品的PMA保持的比较好. 样品的霍尔电阻随着Ni层厚度的增加单调减小, 这是由于Ni层变厚会使其分流效果增加, 样品总的霍尔电阻就会降低; 而矫顽力在Ni层厚度变化过程中先增加后减小, 但总体上变化范围很小, 这可能是由于Co/Ni多层膜中, 相邻Co层之间的耦合作用比较复杂, 需通过Co层间Ni原子产生的铁磁耦合叠加随距离振荡变化的RKKY耦合而成^[10], 导致了矫顽力先增加后减

小. 在该系列 Co/Ni 多层膜中, Ni 厚度为 0.4 时样品的矫顽力比厚度为 0.5 时略小, 但其霍尔曲线矩形度更好, 且霍尔电阻最大, 所以确定周期层中 Ni 厚度为 0.4, 以下实验 Co/Ni 多层膜中 Ni 层厚度均为 0.4.

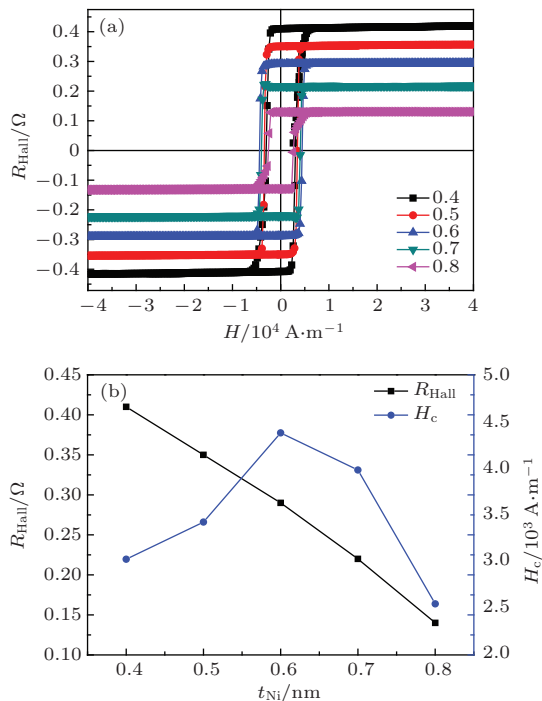


图2 (网刊彩色) (a) Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(t_{Ni})]₂/Co(0.2)/Pt(2.0) 的霍尔曲线; (b) Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(t_{Ni})]₂/Co(0.2)/Pt(2.0) 的霍尔电阻及矫顽力
Fig. 2. (color online) (a) Hall loops of Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(t_{Ni})]₂/Co(0.2)/Pt(2.0); (b) R_{Hall} and H_c of Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(t_{Ni})]₂/Co(0.2)/Pt(2.0).

确定了 Co/Ni 多层膜中 Pt 底层厚度为 2 和周期层中 Ni 厚度为 0.4 后, 为了研究多层膜中 Co 层厚度 t_{Co} 和周期数 n 变化时样品霍尔曲线的变化, 分别制备了 Pt(2.0)/[Co(t_{Co})/Ni(0.4)]₂/Co(t_{Co})/Pt(2.0) 和 Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(0.4)] _{n} /Co(0.2)/Pt(2.0) 系列样品. 图 3 和图 4 分别为改变 Co 层厚度 t_{Co} 和改变周期数 n 时样品的霍尔曲线. 从图 3 中可以看出当 Co 厚度为 0.1 时样品霍尔曲线矩形度很好, 且剩磁比为 100%, 样品具有良好的 PMA, 但霍尔电阻很小; 而当 Co 厚度为 0.3 时样品磁矩虽然还能饱和, 但霍尔曲线变斜, 说明此时样品已经失去了 PMA 性质, 所以在多层膜中 Co 层厚度用 0.2 更为合适, 此时样品的霍尔信号最强.

在图 4 中, 周期数为 1 和 2 时样品均有很好的矩形度和 100% 的剩磁比, 周期数为 1 时样品的霍尔电阻比周期数为 2 时略小, 但是差别不大, 而周期数为 1 时样品的霍尔曲线矩形度更

为良好, 矫顽力相差不多; 而当周期数变为 3 时样品的霍尔曲线已失去了矩形形状, 所以多层膜周期数为 1 时的样品在所有系列样品中的 PMA 最好, 而且霍尔信号也很强. 最终, 经过以上实验和分析, 得到的最佳样品结构为 Pt(2.0)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2)/Pt(2.0).

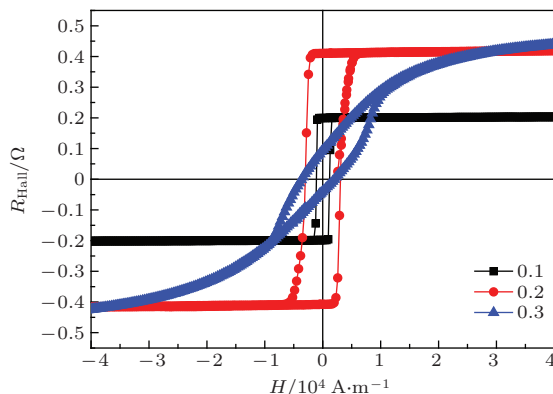


图3 (网刊彩色) Pt(2.0)/[Co(t_{Co})/Ni(0.4)]₂/Co(t_{Co})/Pt(2.0) 的霍尔曲线
Fig. 3. (color online) Hall loops of Pt(2.0)/[Co(t_{Co})/Ni(0.4)]₂/Co(t_{Co})/Pt(2.0).

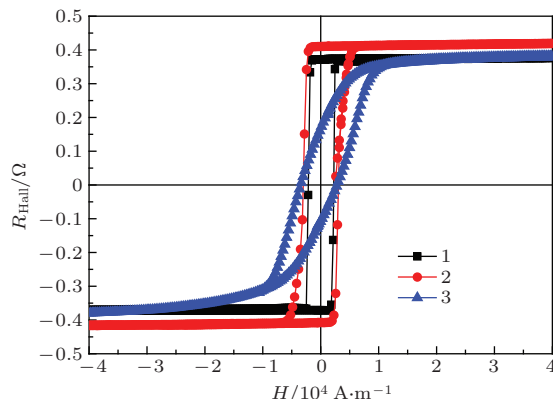


图4 Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(0.4)] _{n} /Co(0.2)/Pt(2.0) 霍尔曲线
Fig. 4. Hall loops of Pt(2.0)/[Co(0.2)/Ni(0.4)] _{n} /Co(0.2)/Pt(2.0).

磁性薄膜的有效磁各向异性可写为如下形式:

$$K_{\text{eff}} = K_v + 2K_s/t, \quad (2)$$

式中 K_v 和 K_s 为磁性层的体及界面各向异性, 大小与具体材料的形状、晶体结构和材料的弹性应力等方面有关, t 为磁性层的厚度^[29,30]. 由于退磁场原因, 一般来讲 $K_v < 0$, 而界面各向异性 $K_s > 0$, K_{eff} 是体各向异性和界面各向异性竞争的结果, 若 $K_{\text{eff}} > 0$, 则薄膜具有 PMA 特征. K_{eff} 的计算需测出样品的磁滞回线进行积分处理^[31]. 图 5 为磁场平行膜面测得样品 Pt(2.0)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2)/Pt(2.0) 归一化

后的磁滞回线。从图中可看出,磁化曲线通过原点,饱和磁场达到了 0.5×10^6 A/m,该方向是典型的难轴特征。经过计算,样品的 K_{eff} 为 3.6×10^5 J/m³,可见该样品Co/Ni层之间的界面各向异性很强,使得样品具备了很好的PMA性质。

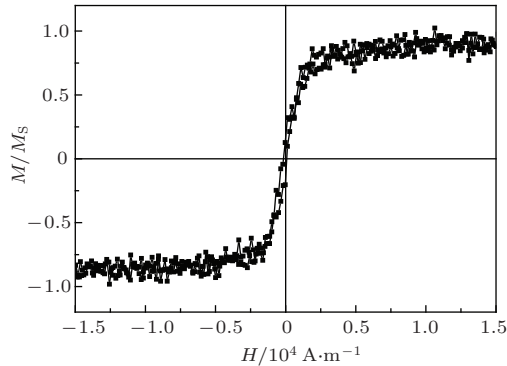


图5 Pt(2.0)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2)/Pt(2.0) 磁场平行膜面归一化的磁滞回线

Fig. 5. Normalized hysteresis loops of Pt(2.0)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2) with field applied in plane.

4 结 论

本文通过对以Pt为底层的Co/Ni多层膜中各参数进行调制,获得最佳样品Pt(2.0)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2)/Pt(2.0),对其磁场平行膜面方向的磁滞回线进行了测量,经计算其 K_{eff} 达到了 3.6×10^5 J/m³,可见通过调控Co/Ni多层膜中Co层与Ni层的厚度,可使Co/Ni之间的界面各向异性克服退磁场的作用,使得多层膜的垂直膜面方向成为易磁化轴,从而使其具备垂直磁各向异性,该样品的 K_{eff} 比近期报道的Co/Pt多层膜Pt1.0/[Co0.4/Pt0.8]₃ (2.0×10^5 J/m³)^[32]大1.8倍,而磁性层的厚度仅为0.8 nm,所以在适当的条件下,铁磁层之间的界面各向异性比铁磁/非磁之间要大很多。并且该样品总厚度在5 nm以内,可更为深入的研究其与器件的集成性;此外还需进一步研究其热稳定性。

参考文献

- [1] Liu L, Moriyama T, Ralph D C, Buhrman R A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 122508
- [2] Mangin S, Ravelosona D, Katine J A, Carey M J, Terris B D 2006 *Nat. Mater.* **5** 210
- [3] Meng H, Wang J P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 172506
- [4] Kou S P, Lu R, Liang J Q 2003 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1525
- [5] Yu R, Zhang W, Weng H M, Dai X, Fang Z 2010 *Phys.* **39** 618 (in Chinese) [余睿,张薇,翁红明,戴希,方忠 2010 物理 **39** 618]

- [6] Kohn W, Luttinger J M 1957 *Phys. Rev.* **108** 590
- [7] Luttinger J M 1958 *Phys. Rev.* **112** 739
- [8] Berger L 1970 *Phys. Rev. B* **2** 4959
- [9] Smith J 1973 *Phys. Rev. B* **8** 2349
- [10] Berger L 1973 *Phys. Rev. B* **8** 2351
- [11] Smith J 1976 *Phys. Rev. B* **17** 1450
- [12] McGuire T R, Gambino R J, Handley R C O 1980 *The Hall Effect and Its Applications* (Vol. 1) (New York: Plenum Publishing Corp.) pp137
- [13] Carvello B, Ducruet C, Rodmacq B, Auffret S, Gautier E, Gaudin G, Dieny B 2009 *Appl. Phys. Lett.* **92** 102508
- [14] Seki T, Mitani S, Yakushiji K, Takanashi K 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 172504
- [15] Zhang X, Shi L, Li J, Xia Y J, Shi Z, Zhou S M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 117803
- [16] Chen W, Beaujour J M L, Loubens G, Keni A D, Sun J Z 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 012507
- [17] Thiagarajah N, Bae S, Joo H W, Han Y C, Kim J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 062504
- [18] Van Dijken S, Crofton M, Czapkiewicz M, Zoladz M, Stobiecki T 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 083901
- [19] Mishra S K, Radu F, Valencia S, Schmitz D, Schierle E, Dürr H A, Eberhardt W 2010 *Phys. Rev. B* **81** 212404
- [20] Chen X, Liu H F, Han X F, Ji Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 137501 (in Chinese) [陈希,刘厚方,韩秀峰,姬扬 2013 物理学报 **62** 137501]
- [21] Nakayama, Kai T, Shimomura N, Amano M, Kitagawa E, Nagase T, Yoshikawa M, Kishi T, Ikegawa S, Yoda H 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07A710
- [22] Ueda K, Koyama T, Hiramatsu R, Chiba D, Fukami S, Tanigawa H, Suzuki T, Ohshima N, Ishiwata N, Nakatani Y, Ono T 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 202407
- [23] Ryu K-S, Thomas L, Yang S-H, Parkin S S P 2012 *Appl. Phys. Express.* **5** 093006
- [24] Lavrijsen R, Haazen P P J, Mure E, Franken J H, Kohlhepp J T, Swagten H J M, Koopmans B 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 262408
- [25] Tanigawa H, Ohshima N, Suzuki T, Suemitsu K, Kariyada E 2012 *J. Appl. Phys., Part 1.* **51** 100202
- [26] Wang R X, Xiao Y C, Zhao J L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 217601 (in Chinese) [王日兴,肖运昌,赵婧莉 2014 物理学报 **63** 217601]
- [27] Zhang P, Xie K X, Lin W W, Wu D, Sang H 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 082404
- [28] Ding Y F, Jack H, Judy, Wang J P 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10J117
- [29] Jungblut R, oehoorn R C, Johnson M T, Johnson aan de Stegge J, Reinders A 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 6659
- [30] Fu Y Q, Liu Y, Jin C, Yu G H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7977 (in Chinese) [付艳强,刘洋,金川于广华 2009 物理学报 **58** 7977]
- [31] Johnsony M T, Bloemenz P J H, Broedery F J A, Vries J J 1996 *Rep. Prog. Phys.* **59** 1409
- [32] Liu S, Ju H L, Yu G H, Li B H, Chen X B 2014 *Chin. J. R. Mater.* **38** 762 (in Chinese) [刘帅,俱海浪,于广华,李宝河,陈晓白 2014 稀有金属 **38** 762]

Perpendicular magnetic anisotropy in Co/Ni multilayers studied by anomalous Hall effect*

Ju Hai-Lang¹⁾²⁾ Li Bao-He^{1)†} Wu Zhi-Fang¹⁾ Zhang Fan¹⁾ Liu Shuai²⁾ Yu Guang-Hua²⁾

1) (School of Science, Beijing Technology and Business University, Beijing 102488, China)

2) (Department of Material Physics and Chemistry, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China)

(Received 24 October 2014; revised manuscript received 11 December 2014)

Abstract

Co/Ni multilayers with Pt underlayers have been prepared by magnetron sputtering technique, and their perpendicular magnetic anisotropy (PMA) was studied by the anomalous Hall effect (AHE). The PMA of the samples can be studied by the intensity of Hall signal (R_{Hall}), remanence ratio (M_r/M_s), coercivity (H_C) and the squareness of the samples in the Hall hysteresis loops. A clear PMA is observed in the as-deposited amorphous Co/Ni multilayers. The PMA of Co/Ni multilayers is strongly dependent on the thicknesses of Pt, Co, and Ni, and the number of Co/Ni bilayers. After testing, the thicknesses of Pt, Co, and Ni, and the periodic number (n) of Co/Ni bilayers are determined to be 2 nm, 0.2 nm, 0.4 nm and 1 respectively. The optimum Co/Ni multilayer with excellent performance of PMA has a structure expressed as Pt(2)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2)/Pt(2). The hysteresis loop of the sample with the field applied in plane is tested, showing the characteristics of hard axis typically. PMA can be measured by the anisotropy constant K_{eff} which is determined by the competition of the interface anisotropy to the volume anisotropy. If the interface anisotropy is dominant, the sample will have PMA. The anisotropy constant K_{eff} of Pt(2)/Co(0.2)/Ni(0.4)/Co(0.2)/Pt(2) is 3.6×10^5 J/m³, illustrating that it has an excellent PMA, and the interface anisotropy of Co/Ni is the main factor that makes K_{eff} a larger value. Since the thickness of magnetic layer in the optimum sample is only 0.8 nm and the total thickness of it less than 5 nm, the integration of the device can be studied further. Furthermore, the coercivity of an optimum Co/Ni multilayered sample is relatively small and can be increased by inserting an oxidation layer or by other ways.

Keywords: Co/Ni multilayers, perpendicular magnetic anisotropy, anomalous Hall effect, anisotropy constant

PACS: 75.70.-i, 75.30.Gw, 75.47.-m

DOI: 10.7498/aps.64.097501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174020), and the College student research program of Beijing, China (Grant No. SJ201402045).

† Corresponding author. E-mail: lbhe@th.btbu.edu.cn