

磁性多层膜 CoFeB/Ni 的垂直磁各向异性研究

俱海浪 王洪信 程鹏 李宝河 陈晓白 刘帅 于广华

Perpendicular magnetic anisotropy study of CoFeB/Ni multilayers by anomalous Hall effect

Ju Hai-Lang Wang Hong-Xin Cheng Peng Li Bao-He Chen Xiao-Bai Liu Shuai Yu Guang-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 247502 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.247502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.247502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Mo 覆盖层对 MgO/CoFeB/Mo 结构磁各向异性的影响

Influence of Mo capping layer on magnetic anisotropy of MgO/CoFeB/Mo

物理学报.2015, 64(24): 247504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247504>

MgO/Pt 界面对增强 Co/Ni 多层膜垂直磁各向异性及热稳定性的研究

Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy and thermal stability in Co/Ni multilayers by MgO/Pt interfaces

物理学报.2015, 64(19): 197501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.197501>

Co/Ni 多层膜垂直磁各向异性的研究

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

物理学报.2015, 64(9): 097501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097501>

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>

磁性多层膜CoFeB/Ni的垂直磁各向异性研究*

俱海浪¹⁾²⁾ 王洪信¹⁾ 程鹏¹⁾ 李宝河^{1)†} 陈晓白¹⁾ 刘帅¹⁾ 于广华²⁾

1)(北京工商大学理学院, 北京 102488)

2)(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2016年6月6日收到; 2016年9月13日收到修改稿)

应用磁控溅射法在玻璃基片上制备了以Pt为底层的CoFeB/Ni多层膜结构样品, 通过测试样品的反常霍尔效应研究多层膜的垂直磁各向异性(perpendicular magnetic anisotropy, PMA), 对影响多层膜垂直磁各向异性的各因素进行了调制. 实验结果表明, 多层膜的底层厚度、周期层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影响. 通过对样品各参数的逐步调制, 最终获得了具有良好PMA的CoFeB/Ni多层膜最佳样品Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0). 经测试计算, 该样品的各向异性常数 K_{eff} 为 $2.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ ($1 \text{ erg/cm}^3 = 10^{-1} \text{ J/m}^3$), 具有良好的PMA性能, 样品总厚度为7.1 nm, 完全满足制备垂直磁结构材料的厚度要求, 可进一步研究其在器件中的集成与应用.

关键词: CoFeB/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.65.247502

1 引言

垂直磁纳米结构材料由于其磁性层的磁矩能垂直于膜面, 从而具备垂直磁各向异性(perpendicular magnetic anisotropy, PMA), 这在自旋电子学方面有着重要的应用. 磁矩与膜面垂直可以使记录单元更小从而提高存储密度, 还可使存储设备具备高的热稳性、低的饱和磁矩、低写入电流密度, 同时该类材料还具备写入读取快、存储量大、抗辐照和非挥发性等优点^[1-3], 这使其在数据存储、军事领域、空间科学、移动通信等多个领域中有着潜在的重要应用^[4], 成为近年来自旋电子学方面的研究热点.

对PMA材料的研究主要集中在稀土过渡金属薄膜^[5]、铁磁层/非磁层多层膜结构及其合金如[Co/(Pt, Pd)]和[Fe/(Pt, Pd)]^[6]、L1₀有序合金薄膜^[7]等, 这些研究涉及复合靶材的多层膜材料较少. 在复合靶材多层膜的研究中, CoFeB由于具备高的自旋极化率而受到关注, 在制备高性能磁隧

道结、垂直磁化膜等方面国内外已有不少相关研究成果^[8-10]. Jung等^[11]研究了CoFeB/Pd多层膜的PMA, 发现CoFeB的厚度可达2 nm; 而Fowley等^[12]研究发现, 当CoFeB厚度较薄时才能在CoFeB/Pd多层膜中观察到清晰的PMA现象; 刘娜等^[13]研究了CoFeB/Pt多层膜的PMA, 认为当多层膜中CoFeB厚度为0.5 nm左右时, 样品才会具有明显的PMA特征. 但是对于CoFeB/Ni多层膜的PMA研究还未见报道.

反常霍尔效应(anomalous Hall effect, AHE)是表征材料体系铁磁态的重要工具, 在磁性多层膜PMA的研究方面有着重要应用^[14-16]. AHE的物理起源有内禀机理^[17]和外禀机理^[18-23], 其中内禀机理基于理想晶体能带模型, 而外禀机理基于材料的外在杂质、缺陷、声子散射, 但两种机理都认为电子的自旋轨道耦合是AHE产生的主要原因. 霍尔电阻率 ρ_{xy} 与外加磁场 B 的关系式为^[24]

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

式中 R_o 为正常霍尔效应系数, R_S 为反常霍尔效应

* 国家自然科学基金(批准号: 11174020)和北京工商大学科研启动基金(批准号: QNJ2016-18)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: libh@btbu.edu.cn

系数, 反常霍尔效应比正常霍尔效应大一个数量级以上, 而 ρ_{xy} 正比于样品磁矩的垂直分量^[25], 可以通过测量样品的霍尔电阻率随外加磁场的变化关系曲线来研究磁性薄膜的PMA.

本文应用磁控溅射法制备了系列CoFeB/Ni多层膜, 通过测量样品反常霍尔效应对其PMA性质进行系统的研究. 制备过程中, 对样品的Pt底层、周期层中CoFeB与Ni的厚度、多层膜周期数进行调制, 以期最终获取具有良好PMA性质的CoFeB/Ni多层膜样品.

2 实验

所有样品采用磁控溅射法在玻璃基片上制备而成, 实验设备的样品台带自转功能, 工作时可使基片以1.7 r/s的速度旋转, 保证了样品膜面的均匀性. 系统本底真空度优于 2.0×10^{-5} Pa, 溅射时的工作气体是纯度为99.999%的Ar气, 工作气压为0.5 Pa. 靶材的溅射速率由Dektak150型台阶仪测定, 分别为Pt, 0.075 nm/s; CoFeB, 0.018 nm/s; Ni, 0.042 nm/s. 其中Pt与Ni靶由直流电源起辉, CoFeB靶材由射频电源起辉, CoFeB的原子比例为40 : 40 : 20. 如无特别标注, 本文中所有样品厚度均用nm表示. 样品结构为Pt(t_{Pt})/[CoFeB(t_{CoFeB})/Ni(t_{Ni})] $_n$ /Pt(1.0), 其中底层Pt厚度 t_{Pt} 的变化范围从2到5 nm, 周期层中CoFeB层厚度 t_{CoFeB} 的变化范围从0.2到1.0 nm, Ni层厚度 t_{Ni} 的变化范围从0.2到0.6 nm, 周期数 n 变化范围从1到5, 所有样品用1 nm厚Pt做保护层防止氧化.

将制备好的样品切成大小为8 mm × 15 mm的矩形, 用四探针法测量其霍尔曲线, 来获取其霍尔电阻(Hall resistance, R_{Hall})及矫顽力(coercivity, H_C), 测试时的外加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

制备样品时先在样品底层沉积4 nm厚的Pt层, 使周期层周期数为2, 这样样品具有较为明显的霍尔效应以便于测试. 图1为样品Pt(4)/[CoFeB(t_{CoFeB})/Ni(0.3)] $_2$ /Pt(1.0)的霍尔曲线. 从图1可以看出, 样品的霍尔曲线随着CoFeB

厚度的改变而变化, 当CoFeB厚度为0.2 nm时, 由于层面不连续, 样品并没有形成PMA性质, 当CoFeB厚度增至0.4 nm时, 矩形度最佳, 说明了此时样品具有良好的PMA性能. 当CoFeB厚度继续增加时, 其矩形度迅速下降, 当CoFeB厚度增至1.0 nm时, 样品完全失去了PMA性质. 这和CoFeB厚度变化时对样品界面的影响有关. 当CoFeB层太薄时, 由于层厚不连续, 界面不清晰, 不能形成有效的界面效应而使样品具备PMA性能; 当CoFeB厚度增至0.4 nm时, CoFeB/Ni形成了明显的界面, 界面各向异性明显并占据主导地位, 所以样品有了明显的PMA性能; 而当CoFeB层厚度过大, 又会削弱样品的界面各向异性, 从而影响样品的PMA. 根据图1的实验结果, 确定多层膜样品中CoFeB厚度为0.4 nm.

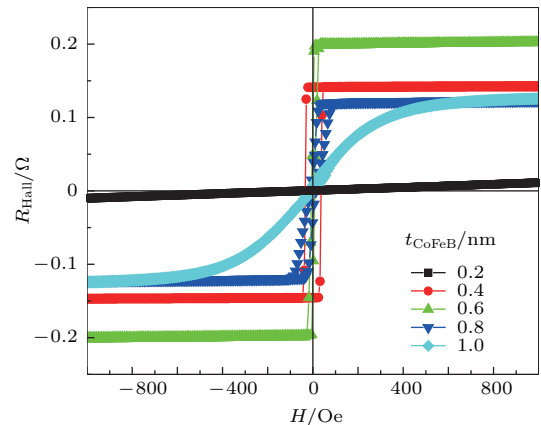


图1 (网刊彩色) Pt(4)/[CoFeB(t_{CoFeB})/Ni(0.3)] $_2$ /Pt(1.0)的霍尔曲线 (1 Oe = 79.5775 A/m)

Fig. 1. (color online) Hall loops of Pt(4)/[CoFeB(t_{CoFeB})/Ni(0.3)] $_2$ /Pt(1.0) (1 Oe = 79.5775 A/m).

图2(a)所示为改变样品Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(t_{Ni})] $_2$ /Pt(1.0)中Ni层厚度时样品的霍尔曲线, 图2(b)为对应样品的霍尔电阻和矫顽力的变化曲线. 从图2(a)可以看出, 在Ni层厚度变化的过程中, 样品的矩形度都很好, 说明在Ni层厚度变化过程中, 样品的PMA保持的比较好. 在图2(b)中, 样品的霍尔电阻随着Ni层厚度的增加振荡减小, 这是由于Ni层变厚所增加的分流效果比对样品反常霍尔效应的贡献更大, 所以样品总的霍尔电阻就会降低; 而矫顽力出现一定的波动, 但变化范围不大. 总体来看当Ni的厚度为0.3 nm时, 样品的霍尔曲线矩形度很好, 且霍尔电阻最大, 所以在该系列多层膜中, 确定周期层中Ni层厚度为0.3 nm.

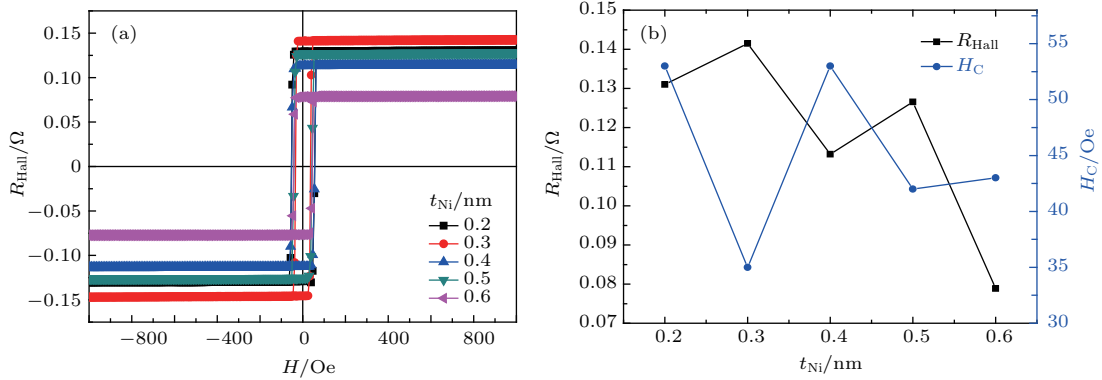


图2 (网刊彩色) (a) Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(t_{Ni})]₂/Pt(1.0) 的霍尔曲线; (b) Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(t_{Ni})]₂/Pt(1.0) 的霍尔电阻及矫顽力
 Fig. 2. (color online) (a) Hall loops of Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(t_{Ni})]₂/Pt(1.0); (b) R_{Hall} and H_C of Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(t_{Ni})]₂/Pt(1.0).

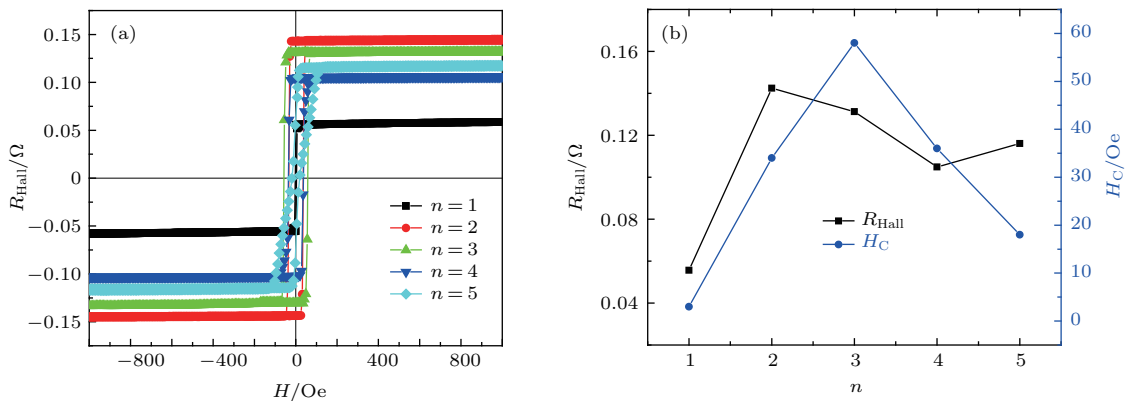


图3 (网刊彩色) (a) Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]_n/Pt(1.0) 的霍尔曲线; (b) Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]_n/Pt(1.0) 的霍尔电阻及矫顽力
 Fig. 3. (color online) (a) Hall loops of Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]_n/Pt(1.0); (b) R_{Hall} and H_C of Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]_n/Pt(1.0).

磁性多层膜的PMA性质,主要来源于界面处的耦合作用,周期数的增加会增加更多的界面,会改变样品的界面耦合与层间耦合,从而改变样品PMA性能,所以多层膜的周期数对样品的PMA有着重要的影响.图3(a)所示为改变样品Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]_n/Pt(1.0)周期数 n 时的霍尔曲线,图3(b)为对应样品的霍尔电阻和矫顽力的变化曲线.可以看到, n 的变化对样品PMA的影响十分明显,当 n 为1时,可以观察到样品有PMA,但矫顽力和霍尔电阻都很小,这和界面少、界面效应不明显有关;随着周期数的增多,样品的矩形度迅速变好,这是因为此时多层膜界面效应明显,且表现为单畴态,磁化时表现为一致翻转;而当周期数继续增加到4和5后样品的矩形度降低,PMA性能减弱,这是因为周期数到一定数量,会造成多层膜界面粗糙度的变化,多层膜会产生分畴效应而表现出多畴态,所以样品的矩形度降低.可见,

要将CoFeB/Ni多层膜应用于垂直磁纳米结构中,其周期层数 n 等于3比较合适.

Pt底层的厚度对多层膜的(111)结构有着重要影响,而(111)结构的改变会影响多层膜的PMA^[26].图4(a)所示为改变样品Pt(t_{Pt})/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0)中Pt底层厚度时样品的霍尔曲线,图4(b)为对应样品的霍尔电阻和矫顽力的变化曲线.从图4(a)可以看到,当Pt为2 nm时样品已经具备了PMA特征,但由于此时厚度还不够,所以样品的矫顽力很小.随着Pt厚度的增加,样品表现出了良好的PMA特征,可见变厚的Pt底层使得样品的(111)结构增强,从而使样品矩形度达到了100%.在Pt层逐渐变厚的过程中,样品的霍尔电阻单调降低,这是因为Pt本身是良导体,变厚的Pt对样品的分流作用逐渐增加导致样品电阻降低;而样品矫顽力随Pt厚度的增加总体上也是增加的,同样,这也是因为变厚的Pt层增强

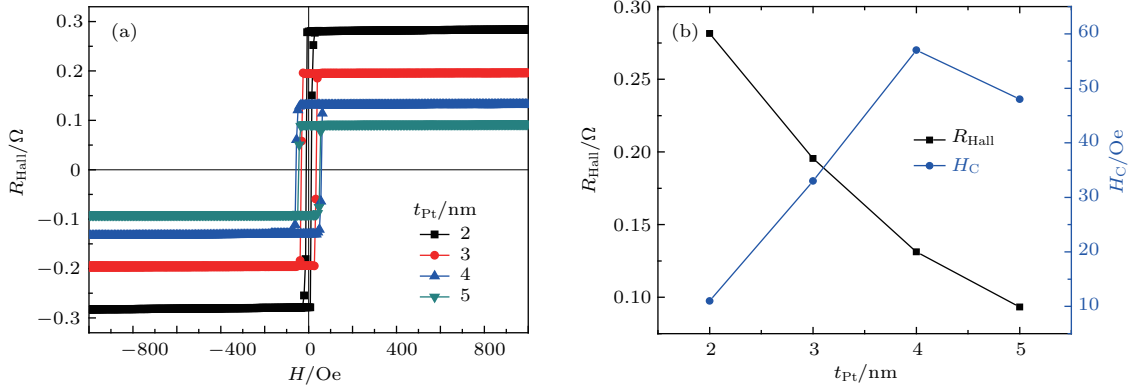


图4 (网刊彩色) (a) Pt(t_{Pt})/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0)的霍尔曲线; (b) Pt(t_{Pt})/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0)的霍尔电阻及矫顽力

Fig. 4. (color online) (a) Hall loops of Pt(t_{Pt})/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0); (b) R_{Hall} and H_C of Pt(t_{Pt})/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0).

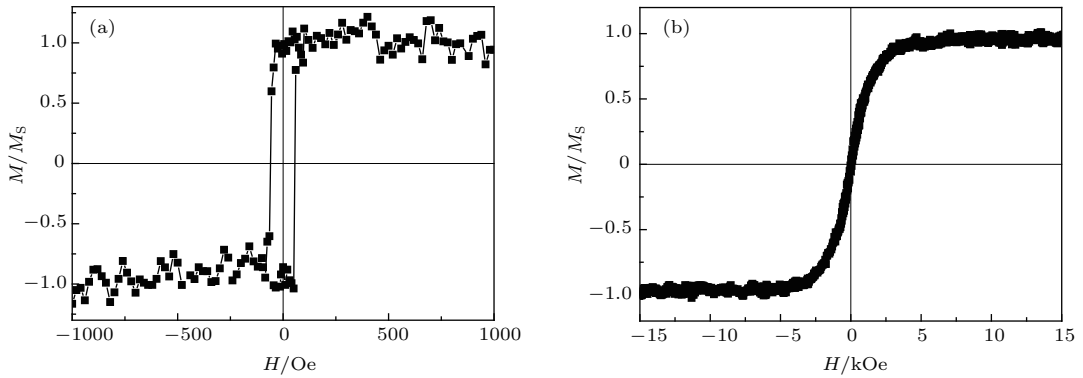


图5 (a) 磁场垂直样品 Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0) 膜面归一化的磁滞回线; (b) 磁场平行样品 Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0) 膜面归一化的磁滞回线

Fig. 5. (a) Normalized hysteresis loops of Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0) with field applied perpendicularly to the plane; (b) normalized hysteresis loops of Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0) with field applied in plane.

了样品的(111)织构造成的. 从图2(a)可看出, 当Pt厚度为4 nm时, 样品霍尔电阻略小, 但矩形度更好, 且矫顽力较为适宜, 最终, 确定最佳的多层膜样品为Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0).

磁性薄膜的PMA可以用有效磁各向异性 K_{eff} 来衡量, 其表达式如下:

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

其中 K_v 和 K_s 为多层膜中磁性层的体及界面各向异性, 具体大小与材料的形状、晶体结构及弹性应力等方面有关; t 为样品中磁性层的厚度^[27]. 对于薄膜样品来讲, 一般薄膜样品的 $K_v < 0$, 而 $K_s > 0$, K_{eff} 是薄膜体各向异性和界面各向异性竞争的结果, 若 $K_{eff} > 0$, 则薄膜就具备PMA特征. K_{eff} 可分别通过测出样品的难轴方向与易轴方向磁滞回线然后进行积分处理得到^[28]. 图5(a)为当磁场方向垂直膜面时测得样

品Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0) 归一化后的磁滞回线, 图5(b)为当磁场方向平行膜面时测得样品Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0) 归一化后的磁滞回线. 在图5(a)中, 可以看到样品具备良好的PMA性能, 矫顽力的大小与AHE法测得数据一致; 在图5(b)中, 样品的磁化曲线通过原点, 饱和磁场达到了6000 Oe, 这是典型的难轴特征. 经过计算, 样品的 K_{eff} 为 2.2×10^6 erg/cm³, 这也说明了该样品的界面各向异性很强, 使得样品表现出良好的PMA性质.

4 结 论

本文通过对以Pt为底层的CoFeB/Ni多层膜各参数进行调制, 最终获得了最佳样品Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0), 对其磁场平

行膜面方向的磁滞回线进行了测量, 经计算, 该样品的 K_{eff} 为 $2.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$, 这反映出样品具有良好的PMA性能. 在该样品中磁性周期层的厚度为2.1 nm, 整个样品总厚度为7.1 nm, 该厚度完全满足器件制备对垂直磁结构的厚度要求, 可进一步研究其与器件的集成性. 此外该样品的热稳定性还需继续研究.

参考文献

- [1] Chen Y, Wang X, Li H, Xi H, Yan Y, Zhu W 2010 *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* **18** 1724
- [2] 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
- [3] Sbiaa R, Meng H, Piramanayagam S N 2011 *Physica Status Solidi* **5** 413
- [4] Yu T, Liu Y, Zhu Z Y, Zhong H C, Zhu K G, Gou C L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 247504 (in Chinese) [于涛, 刘毅, 朱正勇, 钟汇才, 朱开贵, 苟成玲 2015 物理学报 **64** 247504]
- [5] Nishimura N, Hirai T, Koganei A, Ikeda T, Okano K, Sekiguchi Y, Osada Y 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 5246
- [6] Yakushiya K, Saruya T, Kubota H, Fukushima A, Nagahama T, Yuasa S, Ando K 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 232508
- [7] 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
- [8] Wang W G, Hageman S, Li M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 102502
- [9] Worledge D C, Hu G, Abraham D W, Sun J Z, Trouiloud P L, Nowak J, Brown S, Gaidis M C, O' Sullivan EJ, Robertazzi R P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 022501
- [10] Wu S B, Chen S, Yang X F, Zhu T 2012 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **42** 70 (in Chinese) [吴少兵, 陈实, 杨晓非, 朱涛 2012 中国科学: 物理学 力学 天文学 **42** 70]
- [11] Jung J H, Lim S H, Lee S R 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 042503
- [12] Fowley C, Decorde N, Oguz K, Rode K, Kurt H, Coey J M D 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 2116
- [13] Liu N, Wang H, Zhu T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 167504 (in Chinese) [刘娜, 王海, 朱涛 2012 物理学报 **61** 167504]
- [14] Mangin S, Ravelosona D, Katine J A, Carey M J, Terris B D 2006 *Nat. Mater.* **5** 210
- [15] Meng H, Wang J P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 172506
- [16] Kou S P, Lü R, Liang J Q 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1525
- [17] Yu R, Zhang W, Weng H M, Dai X, Fang Z 2010 *Physics* **39** 618 (in Chinese) [余睿, 张薇, 翁红明, 戴希, 方忠 2010 物理 **39** 618]
- [18] Kohn W, Luttinger J M 1957 *Phys. Rev.* **108** 590
- [19] Luttinger J M 1958 *Phys. Rev.* **112** 739
- [20] Berger L 1970 *Phys. Rev. B* **2** 4959
- [21] Smith J 1973 *Phys. Rev. B* **8** 2349
- [22] Berger L 1973 *Phys. Rev. B* **8** 2351
- [23] Smith J 1978 *Phys. Rev. B* **17** 1450
- [24] McGuire T R, Gambino R J, Handley R C O 1980 *The Hall Effect and Its Applications* (Vol. 1) (New York: Plenum Publishing Corp.) p137
- [25] Carvello B, Ducruet C, Rodmacq B, Auffret S, Gautier E, Gaudin G, Dieny B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 102508
- [26] Ding Y F, Judy J H, Wang J P 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10J117
- [27] 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]
- [28] Johnsony M T, Bloemenz P J H, Broedery F J A, Vries J J 1996 *Rep. Prog. Phys.* **59** 1409

Perpendicular magnetic anisotropy study of CoFeB/Ni multilayers by anomalous Hall effect*

Ju Hai-Lang¹⁾²⁾ Wang Hong-Xin¹⁾ Cheng Peng¹⁾ Li Bao-He^{1)†} Chen Xiao-Bai¹⁾
Liu Shuai¹⁾ 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 Beijing, Beijing 100083, China)

(Received 6 June 2016; revised manuscript received 13 September 2016)

Abstract

The CoFeB/Ni multilayers with Pt underlayer are prepared by magnetron sputtering technique and the perpendicular magnetic anisotropy (PMA) of each of the samples is studied by anomalous Hall effect (AHE) method. The PMA of CoFeB/Ni multilayer is dependent on the thickness of Pt, Co, CoFeB and the number of CoFeB/Ni bilayers strongly. It is found that the sample structured as Pt(4)/[CoFeB(t_{CoFeB})/Ni(0.3)]₂/Pt(1.0) has a good PMA when the CoFeB thickness is 0.4 nm for the interface anisotropy dominated in the multilayer. So the CoFeB thickness is fixed at 0.4 nm. The effect of Ni thickness on multilayer PMA is also studied. The PMA of the sample is kept relatively well and the Hall resistance (R_{Hall}) decreases as the Ni thickness increases. Meanwhile the coercivity (H_C) fluctuates in a small range. When the Ni thickness is 0.3 nm, the remanence squareness of the sample is very good and the Hall effect is strongest. The influence of period number n on the sample PMA is significant for it changes the interface of the sample. When n is 3, the sample has a very good remanence squareness, for the interface effect is obvious and the magnetization reversal process is consistent. The Pt underlayer shows a great effect on the PMA performance of the sample, for it can change the (111) texture of the multilayer. The results show that when the Pt thickness is 4 nm, the remanence squareness is good and the sample has a suitable H_C . So the optimum CoFeB/Ni multilayer with an excellent performance of PMA is structured as Pt(4)/[CoFeB(0.4)/Ni(0.3)]₃/Pt(1.0). Its anisotropy constant K_{eff} is $2.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ ($1 \text{ erg/cm}^3 = 10^{-1} \text{ J/m}^3$) which indicates that the sample has an excellent PMA and its interface anisotropy is the main reason for making the K_{eff} have a larger value. The magnetic layer thickness of the optimum sample is 2.1 nm and the total thickness of it is less than 8 nm. The integration with device can be studied further. Furthermore, H_C of the CoFeB/Ni multilayer is relatively small and can be increased by inserting the oxidation layer or other ways.

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

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

DOI: 10.7498/aps.65.247502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174020) and the Young teachers' Scientific Research Fund of Beijing Technology and Business University, China (Grant No. QNJ2016-18).

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