复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第5期 10月 2013年
Vol. 30 No. 5 October 2013

文章编号：1000-3851(2013)05-0132-06

铁电相 $BiFeO_3$ 对多铁复合薄膜 $CoFe_2O_4-BiFeO_3$ 铁磁性能的影响

刘艳清*，吴钰涵，张 静，张永军
（吉林师范大学 功能材料物理与化学教育部重点实验室，四平 136000）

摘 要： 为了研究铁电相 $BiFeO_3$ 对复合薄膜磁性能的影响，在 $LaNiO_3$(LNO)缓冲层的 Si (100)衬底上旋涂制备了含有 0、6、9、10 层等不同厚度 $BiFeO_3$ 的层状 $CoFe_2O_4-BiFeO_3$(CFO-BFO) 多铁复合薄膜。采用 XRD、SEM 以及 TEM 对其结构和形貌进行了表征，采用振动样品磁强计测量磁性，研究了不同厚度 BFO 对复合薄膜磁性的影响。结果表明：CFO 和 BFO 在异质结构薄膜中共存。缓冲层 LNO 和铁磁相 CFO 薄膜具有精细微观结构及明显界面。铁电相 BFO 的厚度对 CFO-BFO 复合薄膜的磁性能产生了很大影响。在含有不同层数铁电相 BFO 的复合薄膜中，含有 9 层 BFO 复合薄膜的饱和磁化强度最大，达到了 230 emu·cm^{-3}，相比无铁电相 BFO 的薄膜，饱和磁化强度提高了 18.6%。初步讨论认为：随着铁电相 BFO 厚度的增加，CFO 与 BFO 之间的应力传导引起了复合薄膜饱和磁化强度的提高。

关键词： 层状多铁复合薄膜；旋涂；BFO 厚度；磁性；高分辨透射电子像；应力
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Influence of the $BiFeO_3$ phase on ferromagnet properties of layered multiferroic $CoFe_2O_4-BiFeO_3$ films

LIU Yanqing*, WU Yuhan, ZHANG Jing, ZHANG Yongjun
(Key Laboratory of Function Materials Physics and Chemistry of the Ministry of Education, Jilin Normal University, Siping 136000, China)

Abstract: Multiferroic layered films consisting of $CoFe_2O_4-BiFeO_3$(CFO-BFO) with increasing BFO constituent layers thicknesses were prepared on the $LaNiO_3$(LNO)-buffered Si(100) substrate via a simple spin-coating process in order to investigate the thickness effect of ferroelectric $BiFeO_3$ phase on the magnetic properties of the composite films. The structure and morphology were researched by XRD, SEM and TEM. Bisides, the magnetic properties were demonstrated by vibrating sample magnetometer (VSM) and the effect of different thicknesses of BFO layer on the magnetic properties of the composite films was discussed. The results reveal that magnetic CFO and ferroelectric BFO phases coexist in the heterostructured films. The buffered layer LNO and ferromagnetic layer CFO possess clear microstructure and obvious interface between them. The thickness of $BiFeO_3$ phase has a significant influence on the magnetic properties of the CFO-BFO films. Among the multiferroic films containing different BFO layers, the film that consisting of nine BFO constituent layers demonstrates the highest M_s value of 230 emu·cm^{-3}, which improves 18.6% than that of the film without BFO constituent layers. We initially conclude that it is stress that leads to the improvement of M_s with increasing the BFO thickness.

Keywords: layered multiferroic films; spin-coating; BFO layers thicknesses; magnetic; HRTEM; stress

多铁材料[1-4]是指同时含有两种或者两种以上铁序(磁、电或弹力)的功能材料。近年来，人们对多铁材料产生了浓厚兴趣，主要源于子系统间通过应力调节产生的弹性相互作用所引起的磁电效应。

收到初稿日期： 2012-09-05；**收到修改稿日期：** 2013-03-27；**网络出版时间：** 2013-05-14 11:45:28
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130514.1145.008.html
基金项目： 国家自然科学基金项目(61178074)；国家自然科学基金青年科学基金项目(10904050)；吉林省科技发展计划项目(201115218，201215223)；江苏省自然科学基金项目(BK2010348)
通讯作者： 刘艳清，副教授，主要从事多铁材料研究 E-mail：liuyanqing@jlnu.edu.cn

通过磁电效应，可以研发多功能器件，如感应器、转换器和存储器等[5-6]。目前，多铁材料主要有单相和复合多铁材料两类。其中，单相磁电多铁材料非常稀少，由于居里温度很低以及产生铁电性、铁磁性的物理机制相互制约[7-8]，如 $BiFeO_3$ (BFO)[9-10]以及稀土锰酸盐[11]。相对于单相多铁材料，包含铁电相（如 BFO[12]、$BaTiO_3$[13-14]、$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$[15]）和铁磁相（$NiFe_2O_4$[16]、$CoFe_2O_4$ (CFO)[12-13, 15]）的磁电复合材料能够在远高于室温下获得较大的磁电耦合[17]。

近年来，由于 CFO 具有高矫顽力、较好的化学稳定性和物理硬度[12-13, 15]，人们对其开展了大量研究，发现[18]对于 $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ - $CoFe_2O_4$ 复合材料，双层薄膜的多铁性强烈依赖于厚度分数。BFO 具有远高于室温的居里温度（约为 1123 K），它作为磁电材料也引起了研究者们的广泛关注[10]。对于将这两者复合在一起的磁电复合薄膜 CFO - BFO 逐渐引起了人们的兴趣[19-21]。但大多数人致力于如何制备出结构较好的 CFO - BFO 薄膜以获得优异多铁性，以及探讨 CFO - BFO 复合结构中的磁电耦合机制[21]，很少研究者致力于系统研究铁电相对多铁薄膜磁性的影响。另外，在制备方法上，人们青睐于采用成本高和精密度高的方法，如脉冲激光沉积法（PLD）、磁控溅射法（RF sputtering）等。近年来，旋涂法由于制备方法简单、过程可控、产量高、成本低且能够在大面积的衬底上制备薄膜等特点，已经在微电子器件等领域得到应用。

本文作者选择 CFO 作为铁磁相、BFO 作为铁电相，通过溶胶凝胶旋涂法在有 $La(NO_3)_3$ (LNO) 缓冲层的 Si (100) 衬底上生长了含有不同层数 BFO 铁电相的 CFO - BFO 复合薄膜，研究铁电相 BFO 的厚度对复合薄膜磁性的影响。采用 XRD、SEM 以及 TEM 对其结构和形貌进行了表征，采用振动样品磁强计测量磁性，详细地讨论了不同厚度 BFO 对复合薄膜磁性的影响。

1 实验材料及方法

1.1 主要原料

$La(NO_3)_3$、$Ni(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$、乙酸 (acetic acid)、$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$、$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$、聚乙二醇（PEG，$M_n = 4000$）、柠檬酸（citric acid）、$Bi(NO_3)_3 \cdot 8H_2O$、乙醇（ethanol）、$HNO_3$。实验中所用试剂纯度均为分析纯，且均来自沈阳国药试剂。

1.2 实验过程

整个实验过程分为两步：第一步，前驱体溶液的制备；第二步，旋涂薄膜。

首先，通过溶胶凝胶法分别制备 LNO、CFO、BFO 三种前驱体溶液。LNO 前驱体溶液：把 $La(NO_3)_3$、$Ni(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ 溶解到体积比为 6∶1 的乙酸和水的混合溶液中，充分搅拌后得到了 0.3 mol/L 的 LNO 澄清溶液；CFO 前驱体溶液：按照摩尔比为 1∶2∶3 的比例称量 $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$、$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 和柠檬酸，然后把体积比为1∶1 的乙酸和去离子水倒入其中，搅拌至溶液澄清，称取适量的聚乙二醇加入此溶液中，使其浓度为 40 mg/mL，充分搅拌后超声分散 1 h，得到了 0.2 mol/L的 CFO 澄清溶液；BFO 前驱体溶液：把 $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$、$Bi(NO_3)_3 \cdot 8H_2O$ 溶解在 100 mL的乙醇中，然后配制体积浓度为 17.2% 的稀硝酸，倒入上述溶液中，经过不断搅拌得到了 BFO 澄清溶液。所有溶液在空气中静置三天。

其次，先在 Si 衬底上旋涂 LNO 前驱体溶液，然后以 10 ℃/min 的升温速率加热到 400 ℃保温 6 min。重复 6 次这个过程以获得期待厚度的缓冲层薄膜，然后在 700 ℃保温 10 min 使缓冲层晶化；在 LNO 缓冲层薄膜上面旋涂 CFO 前驱体溶液，在 200 ℃加热 10 min、400 ℃加热 20 min，此过程重复两次；然后继续在 CFO 上旋涂 BFO 前驱体溶液，在 400 ℃加热 6 min，分别重复 6、9、10 次。

最后，在低温管式炉中 700 ℃退火 10 min。整个旋涂过程中转盘的转速均为 4000 r/min，旋转时间为 30 s。这样，就在 Si (100) 衬底上获得了具有 LNO 缓冲层的含有 0、6、9、10 层 BFO 的BFO - CFO 复合层状薄膜。复合薄膜的示意图如图 1 所示。

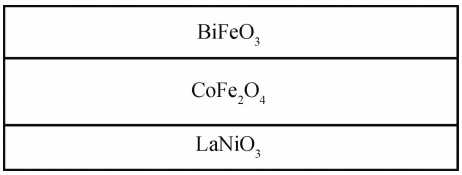

图 1 具有 $La(NO_3)_3$ (LNO) 缓冲层的 $CoFe_2O_4$ - $BiFeO_3$ (CFO - BFO) 异质结构薄膜的示意图

Fig. 1 Schematic of the $CoFe_2O_4$ - $BiFeO_3$ (CFO - BFO) heterostructured film with a buffered layer $La(NO_3)_3$ (LNO)

1.3　测试与表征

采用日本 Rigaku 公司 D/max－2500/PC 型转靶 X 射线衍射仪对样品结构进行表征。采用日本日立(Hitachi)S－570 型扫描电子显微镜测试薄膜厚度。采用日本电子公司 JEM－2100HR 型透射电子显微镜测试样品微观结构。采用美国 Lake Shore 公司 M－7407 型振动样品磁强计测试样品磁性。

2　结果与讨论

2.1　CFO－BFO 薄膜结构特性

图 2 是含有不同层数 BFO 的 CFO－BFO 复合薄膜 XRD 谱图。图谱结果显示，除了来自于基底(Si 和 LNO)的衍射峰外，其它所有衍射峰可分为两组，一组属于钙钛矿的 BFO 衍射峰(卡片号：20－0169)，另一组属于尖晶石的 CFO 衍射峰(卡片号：22－1086)，没有出现其它中间相的衍射峰，这说明在烧结过程中 BFO 和 CFO 两相之间没有发生化学反应。另外，BFO 的峰强随着 BFO 的层数增加而增加。但是，在样品中出现了非纯相的 Fe_2O_3 和 BiO_2 衍射峰，这可能是在高温退火过程中 BFO 和 CFO 两相部分分解而产生的，这种情况在 Dix 等研究中报道过[20]。

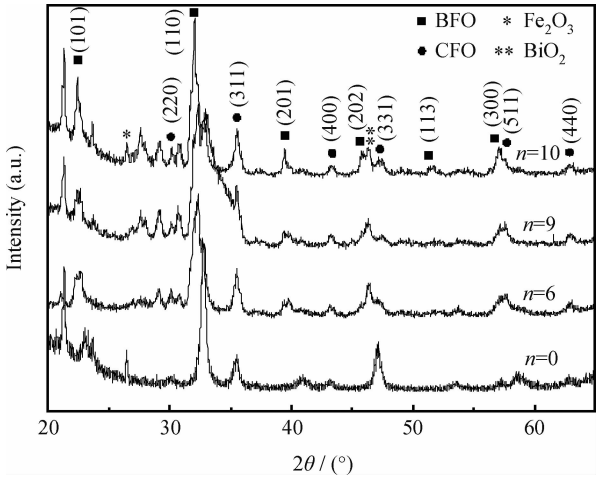

图 2　含有不同 BFO 层数 n(n=0，6，9，10)的 CFO－BFO 薄膜的 XRD 谱图

Fig. 2　XRD patterns of CFO－BFO films with different BFO layers n (n=0，6，9，10)

2.2　CFO－BFO 薄膜断面形貌分析

图 3 为含有不同层数 BFO 的 CFO－BFO 薄膜断面 SEM 图。可见，四个薄膜表面基本均匀，但含有 0 层和 9 层 BFO 的薄膜表面比含有 6 层、10 层 BFO 的薄膜表面更加平滑且均匀。从断面来看，

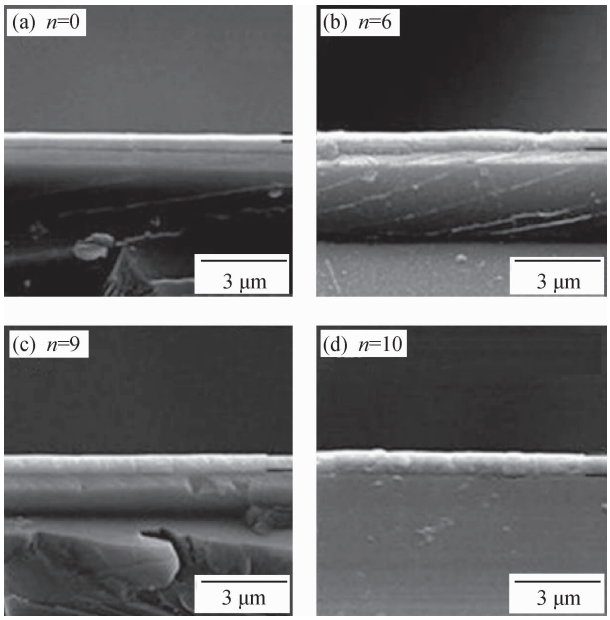

图 3　含有不同 BFO 层数的 CFO－BFO 薄膜的 SEM 断面图

Fig. 3　SEM cross-sectional images of CFO－BFO films (marked with black lines) with different BFO layers

仍是含有 0 层和 9 层 BFO 的薄膜比含有 6 层、10 层 BFO 的薄膜断面均匀。

2.3　CFO－BFO 薄膜微观结构分析

图 4 为 CFO－BFO 复合薄膜的 TEM 照片及 EDS 图谱。其中图 4(a)是 Si(100)衬底上的 LNO 缓冲层和 CFO 薄膜的 TEM 图，可以看到 CFO(无 BFO 层)薄膜的完整、清晰的外观形貌，以及 CFO 层与 LNO 层之间的明显交界。标尺显示 CFO 薄膜层和 LNO 缓冲层的厚度分别为 150 和 118 nm。图 4(b)薄膜的 EDS 图显示，出现了含有 Co、La、Ni、Fe 和 O 五种元素的能谱，没有其他元素能谱出现。图 4(c)是图 4(a)中 CFO 薄膜层中椭圆形区域的高分辨透射电子显微像，可以看到清晰的 CFO 晶格条纹，基本没有缺陷，标尺显示晶面间距 d 为 0.3 nm，与 JCPDS 卡片(卡片号码：22－1086)上的理论值 0.296 nm 基本相当。图 4(d)是对图 4(a)中 CFO 薄膜层中三角形区域的选区电子衍射图，根据机器常数和测试数据标定了 CFO(400)的电子衍射斑点。图 4(e)是对图 4(a)中 LNO 缓冲层中矩形区域所做的高分辨透射电子显微镜照片，标尺显示晶面间距为 0.270 nm，与 JCPDS 卡片(卡片号：34－1181)上的理论值 0.272 nm 基本一致。图 4(f)是图 4(a)中 CFO 和 LNO 的界面区域的高分辨透射电子显微图像，可以看出两层界面微观结构清晰、完整，基本没有缺陷产生。

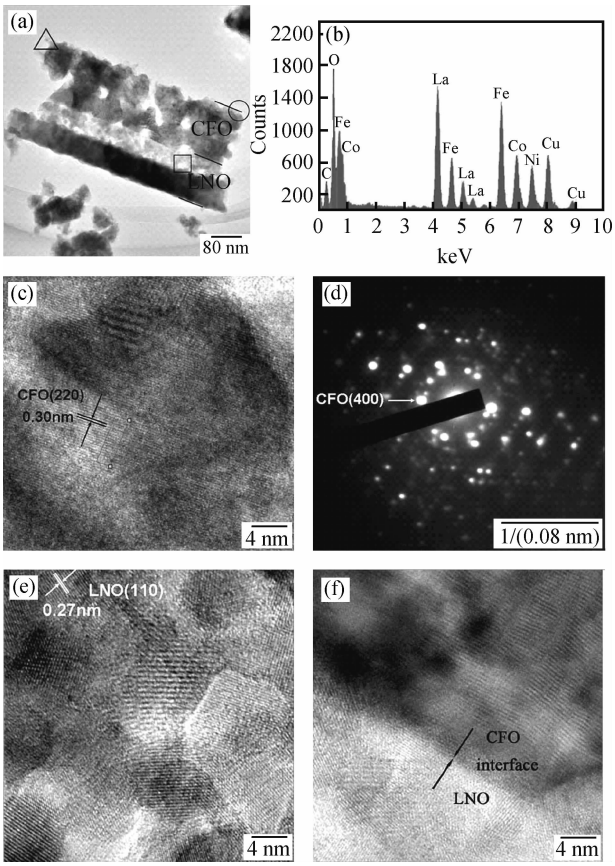

图 4　$COFe_2O_3$ - $BiFeO_3$(CFO - BFO)复合薄膜的 TEM 照片及 EDS 图谱((a) $LaNiO_3$(LNO)缓冲层上的 CFO 薄膜(无 BFO 层) TEM 图；(b) EDS 谱图；(c) CFO 区域的 HRTEM 图；(d) CFO 区域的选区电子衍射图(SAED)；(e) LNO 区域的 HRTEM 图；(f) CFO 与 LNO 间界面的 HRTEM 图)

Fig. 4　TEM images and EDS pattern of $COFe_2O_3$ - $BiFeO_3$ (CFO - BFO) films((a) Low magnification TEM image of the CFO film on $LaNiO_3$ LNObuffer (without BFO layer)；(b) EDS pattern；(c) Highresolution TEM image taken from the CFO area；(d) Selective area electron diffraction (SAED) pattern for the CFO area；(e) High resolution TEM image taken from the LNO area；(f) High resolution TEM image of the interface of CFO and LNO layers)

2.4　CFO - BFO 薄膜铁磁性能

图 5 为 CFO - BFO 层状复合薄膜的磁滞回线。图 5(a)为对含有 9 层 BFO 的样品分别在垂直和平行样品表面两个方向测试的磁滞回线。相对于垂直方向的磁滞回线，平行方向的磁滞回线表现出更高的剩余磁化强度。这是因为在平行方向测量样品的自旋能够更稳定的沿着平行方向排列，使得自旋翻转困难[21]。该结果说明薄膜的易轴方向沿着平行样品的表面。但是两种情况的矫顽力 H_c 没有明显差别。

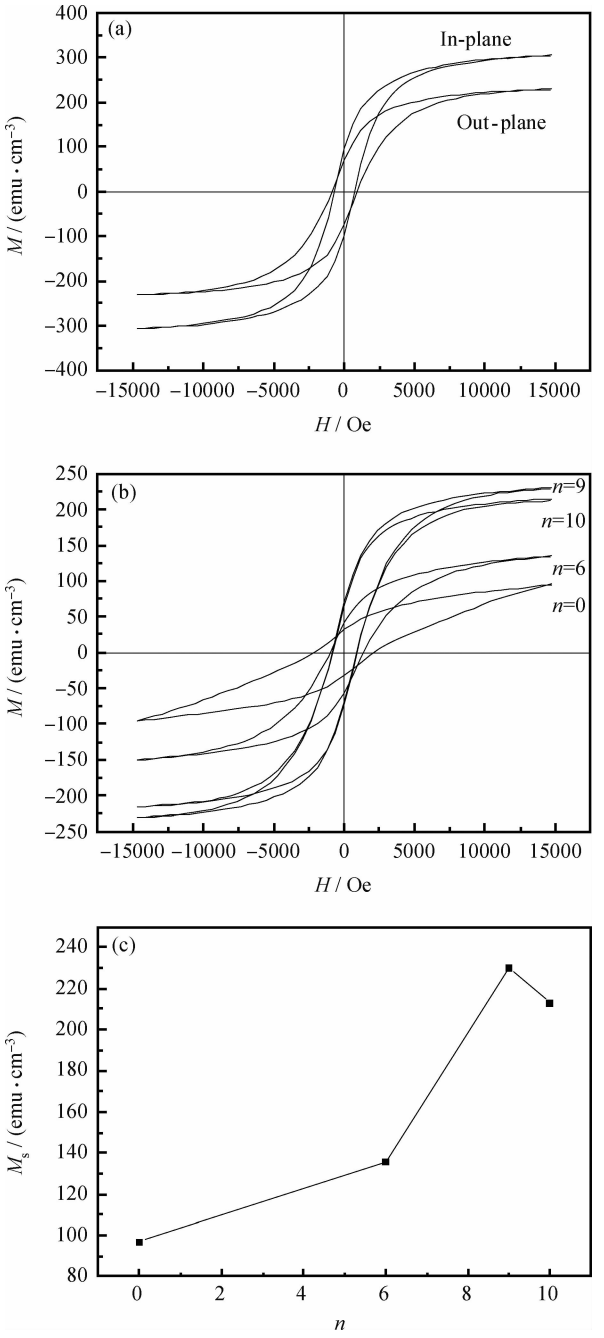

图 5　CFO - BFO 层状复合薄膜室温磁滞回线

(1 Oe=80 A · m^{-1}，1 emu · cm^{-3} = 10^3 A · m^{-1})

((a) 含 9 层 BFO 的平行和垂直平面方向；(b) 含不同 BFO 层数 n (n=0，6，9，10)的薄膜的垂直方向；(c) 除以 CFO 层的体积的饱和磁化强度随 BFO 层数 n 的变化

Fig. 5　Magnetization hysteresis loops of CFO - BFO films measured at room temperature with the field applied ((a) In and out-plane for samples consisting of CFO layers and 9 BFO layers；(b) Out-plane of the BFO - CFO layered films with different BFO layers n (n=0，6，9，10)；(c) Saturation magnetization divided by $CoFe_2O_4$ volume plotted against the BFO layers n)

图 5(b)为 BFO－CFO 异质结构薄膜的磁性随 BFO 层数 n(n=0，6，9，10)的变化。由于实验中铁磁相 CFO 层数保持不变，只改变 BFO 的层数，考虑到理论上 BFO 对磁性的贡献小，图中所有磁化强度值均只除以 CFO 层的体积，得到纵坐标的值。可以看出，磁滞回线属于典型的铁磁材料的磁滞回线，表现出非零的剩余磁化强度和矫顽力 H_c。当 BFO 层数从 0 层增加到 9 层时，复合薄膜的饱和磁化强度 M_s 逐渐增强，当 n=9 时达到了最大值 230 emu·cm^{-3}，比 0 层时增加了 18.6%，相比 Zheng 等采用磁控溅射法制备的 BFO－CFO 薄膜的饱和磁化强度高出 64.3%[22]。M_s 随 BFO 层数增加而增大，这是由于复合薄膜中上面的 BFO 层增大了 CFO 层的张力，导致复合薄膜下面的磁致伸缩层的 M_s 提高[17]。而当 BFO 层数增加到 10 层时，复合薄膜的 M_s 出现下降趋势，是由于含有 10 层 BFO 的薄膜表面比较粗糙，可能在薄膜内部出现了缺陷。

图 5(c)为含有 0～10 层 BFO 的 CFO－BFO 复合薄膜的 M_s 随 BFO 层数的明显变化情况。总体上看(如图 5(b))，薄膜的矫顽力 H_c 随 BFO 层数的增加而下降。可以用矫顽力 H_c 与饱和磁化强度 M_s 的关系来解释，即[23]

$$H_c = \frac{3}{2}\frac{p\lambda_s\overline{\Delta\sigma}}{M_s}\left(p = \frac{3\delta/l}{1+3(\delta/l)^2}\right)$$

其中：λ_s 代表磁滞伸缩系数；$\overline{\Delta\sigma}$ 代表应力变化的平均值；δ 代表畴壁厚度；l 代表应力波长。p 的最大值是 1，所以 H_c 与 M_s 成反比，与乘积 $\lambda_s\overline{\Delta\sigma}$ 成正比。多晶 CFO 的磁致伸缩系数是负值。而张力随 BFO 层数增加而增大，故 $\overline{\Delta\sigma}$ 也是负值。因此 H_c 随 BFO 层数的增加而下降。

3　结　论

(1) 采用简单的旋涂方法在 Si(100)衬底上成功制备了含有 $LaNiO_3$(LNO)缓冲层的不同层数 BFO 的 $CoFe_2O_4$ － $BiFeO_3$(CFO － BFO)复合薄膜。

(2) CFO－BFO 复合薄膜表现出了明显的铁磁性，含有 9 层 BFO 的复合薄膜具有最大饱和磁化强度，M_s =230 emu·cm^{-3}，比相同条件下无铁电相 BFO 薄膜的饱和磁化强度提高了 18.6%。

(3) LNO 缓冲层和 CFO 薄膜层具有精细的微观形貌、层状晶面和微观界面结构。

参考文献：

[1] Yan Li，Yang Yaodong，Wang Zhiguang，Xing Zengping，Li Jiefang，Viehland D. Review of magnetoelectric perovskite－spinel self－assembled nano－composite thin films [J]. J Mater Sci，2009，44(19)：5080－5094.

[2] Ma Jing，Hu Jiamian，Li Zheng，Nan Cewen. Recent progress in multiferroic magnetoelectric composites：From bulk to thin films [J]. Adv Mater，2011，23(9)：1062－1087.

[3] Lee J H，Fang L，Vlahos E，Ke X L. A strong ferroelectric ferromagnet created by means of spin－lattice coupling [J]. Nature，2010，466：954－958.

[4] 于　美，胡竞之，刘建华，李松梅. 均匀共沉淀法制备 $BaTiO_3$－$Ni_xZn_{(1-x)}Fe_2O_4$ 核-壳粒子及其性能 [J]. 高等学校化学学报，2012，33(7)：1389－1393.
Yu Mei，Hu Jingzhi，Liu Jianhua，Li Songmei. Preparation and characterization of $BaTiO_3$ － $Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ core － shell particles by homogeneous coprecipitation [J]. Chemical Journal of Chinese，2012，33(7)：1389－1393.

[5] Israel C，Mathur N D，Scott J F. A one－cent room－temperature magnetoelectric sensor [J]. Nat Mater，2008，7：93－94.

[6] Dong S X，Cheng J R，Li J F，Viehland D. Enhanced magnetoelectric effects in laminate composites of Terfenol－D/Pb(Zr，Ti)O_3 under resonant drive [J]. Appl Phys Lett，2003，83(23)：4812－4814.

[7] Ramesh R，Spaldin N. Multiferroics：Progress and prospects in thin films [J]. Nat Mater，2007，6：21－29.

[8] Spaldin N A，Fiebig M. The renaissance of magnetoelectric multiferroics [J]. Science，2005，309(5733)：391－392.

[9] Wang J，Neaton J B，Zheng H，Ramesh R. Epitaxial $BiFeO_3$ multiferroic thin film heterostructures [J]. Science，2003，299(5613)：1719－1722.

[10] Cheong S W，Mostovoy M. Multiferroics：A magnetic twist for ferroelectricity [J]. Nat Mater，2007，6：13－20.

[11] 张志力，王哲明，黄云辉，程福祥，廖春生，高　松，严纯华. Sol－gel 法制备 $La_{(1-x)}Sr_xMnO_3$ 巨磁电阻薄膜材料 [J]. 高等学校化学学报，1999，20(5)：665－669.
Zhang Zhili，Wang Zheming，Huang Yunhui，Cheng Fuxiang，Liao Chunsheng，Gao Song，Yan Chunhua. Giant magnetoresistive nanocrystalline films of $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ prepared by sol gel method [J]. Chemical Journal of Chinese，1999，20(5)：665－669.

[12] Zheng H，Straub F，Zhan Q，et al. Self－assembled growth of $BiFeO_3$－$CoFe_2O_4$ nanostructures [J]. Adv Mater，2006，18(20)：2747－2752.

[13] Zheng H，Wang J，Lofland S E，Ma Z，et al. Multiferroic $BaTiO_3$ － $CoFe_2O_4$ nanostructures [J]. Science，2004，303(5658)：661－663.

[14] Curecheriu L P，Buscaglia M T，Buscaglia V，Mitoseriu L，Postolache P，Ianculescu A，Nanni P. Functional properties of $BaTiO_3$ － $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ magnetoelectric ceramics prepared from powders with core－shell structure [J]. J Appl Phys，

2010，107(10)：104106-1-104106-11.

[15] Chen W，Shannigrahi S，Chen X F，Wang Z H，Zhu W，Tan O K. Multiferroic behavior and magnetoelectric effect in $CoFe_2O_4/Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ thick films [J]. Solid State Commun，2010，150(5/6)：271-274.

[16] Zhou Huaiying，Gu Tianlong，Yang Daoguo，Jiang Zhengyi，Zeng Jianmin. Synthesis and characterization of multiferroic $NiFe_2O_4/BiFeO_3$ nanocomposites by modified pechini method [J]. Adv Mat Res，2011，197-198：456-459.

[17] Sim C H，Pan A Z Z，Wang J. Thickness and coupling effects in bilayered multiferroic $CoFe_2O_4/Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ thin films [J]. J Appl Phys，2008，103(12)：124109-1-124109-7.

[18] He Hongcai，Ma Jing，Lin Yuanhua，Nan Cewen. Enhanced magnetoelectric properties in $Pb(Zr,Ti)O_3$ - $CoFe_2O_4$ layered thin films with $LaNiO_3$ as a buffer layer [J]. J Phys D：Appl Phys，2009，42(9)：095008-1-095008-4.

[19] Dix N，Muralidharan R，Rebled J. Selectable spontaneous polarization direction and magnetic anisotropy in $BiFeO_3$ - $CoFe_2O_4$ epitaxial nanostructures [J]. ACS Nano，2010，4(8)：4955-4961.

[20] Dix N，Muralidharan R，Caicedo J M，Hrabovsky D. Influence of substrate temperature in $BiFeO_3$ - $CoFe_2O_4$ nanocomposites deposited on $SrTiO_3(001)$ [J]. J Magn Magn Mater，2009，321(11)：1790-1794.

[21] Yan L，Wang Z，Xing Z，Li J，Viehland D. Magnetoelectric and multiferroic properties of variously oriented epitaxial $BiFeO_3$ - $CoFe_2O_4$ nanostructured thin films [J]. J Appl Phys，2010，107(6)：064106-1 - 064106-5.

[22] Zheng R Y，Wang J，Ramakrishna S. Electrical and magnetic properties of multiferroic $BiFeO_3/CoFe_2O_4$ heterostructure [J]. J Appl Phys，2008，104(3)：034106-1-034106-6.

[23] 钟文定. 铁磁学(中册) [M]. 北京：科学出版社，1998：323-326.
Zhong Wending. Ferromagnetism[M]. Beijing：Science Press，1998：323-326.