

FeCuNbSiB 对 FeNi/PZT 复合结构磁电效应的影响*

文玉梅[†] 王东 李平 陈蕾 吴治峰

(重庆大学光电工程学院,教育部光电技术及系统重点实验室,重庆 400030)

(2010年10月16日收到;2010年12月13日收到修改稿)

构造了 FeCuNbSiB/FeNi/PZT 磁电复合结构并与 FeNi/PZT 复合结构进行了对比研究. 分析了高磁导率材料 FeCuNbSiB 对 FeNi 磁场的影响机理,研究了 FeCuNbSiB/FeNi/PZT 三相复合结构的磁电效应. 实验表明,在 FeNi/PZT 两相层合结构中黏接 FeCuNbSiB 层后:1) 最优偏置磁场从 200 Oe 降低到 55 Oe,最大谐振磁电电压系数从 1.59 V/Oe 增大到 2.77 V/Oe;2) 在低偏置磁场中,层合结构磁电电压转换系数提高了 1.7—7.8 倍;3) 层合结构的磁电电压对静态磁场的灵敏度从 19.1 mV/Oe 增大到 158.6 mV/Oe. 三相复合结构磁电效应的这些变化均来自于层合结构端面磁化状态的改变——高磁导率材料相的加入使复合结构的磁化增强.

关键词: 层合结构, 最优偏置磁场, 高磁导率, 磁电电压转换系数

PACS: 75.80.+q, 75.85.+t, 77.65.-j

1. 引言

磁电效应是指材料在外加电场作用下产生诱导磁化或材料在外加磁场作用下产生极化的现象. 具有磁电效应的材料有两类: 单相材料(如 Cr_2O_3 , BiFeO_3) 和复合材料; 而复合材料主要有两种结构: 颗粒混相结构和层状复合结构. 2001 年 Ryu 提出了一种磁电层状复合结构 GMM/PZT/GMM^[1], 其磁电电压转换系数远高于颗粒结构和单相结构的磁电电压转换系数. 层状复合结构在最优偏置磁场区间展示出显著磁电效应现象, 其最优偏置磁场一般较大. Dong 等人^[2,3]报道过尺寸为 30 mm × 15 mm × 6 mm 高磁导率材料作用于磁电层合结构两端, 通过磁汇聚, 降低了层合结构的最优偏置磁场, 分析了一定条件下 GMM/PZT/GMM 层合结构在低频(1 kHz)的磁电特性. 磁电层合材料在谐振状态下的磁电转换系数比低频磁电转换系数高 1—2 个数量级^[4-7]. 具有高谐振磁电转换系数这一特性可以使其更适合在谐振状态下应用. 为了减小最优偏置磁场, 并且不减弱磁电效应, 本文采用高磁导率铁基纳米晶合金带材 FeCuNbSiB 贴于磁致伸缩材料表面, 考虑到磁致伸缩材料 Terfenol-D 工作在高频(> 100 kHz)模式时, 其涡流损耗明显^[8], 所以采用

具有高 Q 值, 在谐振状态下压磁系数高于 Terfenol-D 的 FeNi 基恒弹性合金^[9]与 PZT 组成 FeCuNbSiB/FeNi/PZT 结构. 分析了 FeCuNbSiB 对 FeNi/PZT 偏置磁场的影响, 测试了在不同偏置磁场中 FeCuNbSiB/FeNi 的压磁系数, FeCuNbSiB/FeNi/PZT 的磁电电压转换系数, 发现高磁导率材料 FeCuNbSiB 有效地降低了 FeNi 的压磁特性的最优偏置磁场, 相应也降低了复合材料 FeNi/PZT 的磁电特性最优偏置磁场, 均从 200 Oe 降低到 55 Oe ($1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$); 同时磁电效应没有减弱, 还有所增加, 最大谐振磁电电压转换系数从 1.59 V/Oe 增大到 2.77 V/Oe.

2. FeNi 内部有效磁场分析

铁磁材料处于磁场强度为 H 的磁场中, 磁场方向和材料的磁化方向一致. 材料内部会产生磁感应强度 $B = \mu_0 \mu_r H$. FeCuNbSiB 在外加磁场强度 $H_{\text{bias}} \geq 0.8 \text{ Oe}$ 即可达到磁化饱和, 其饱和磁感应强度 $B_s = 1.25 \text{ T}$. 如图 1 所示, FeCuNbSiB 的长、宽、厚分别为 a, b, t , FeCuNbSiB 沿 x 轴方向磁化, 坐标原点位于 FeCuNbSiB 几何中心, 设宽 b 无穷大, FeCuNbSiB 磁化后沿 x 轴方向产生的磁场强度 H_x 为^[10]

* 国家自然科学基金(批准号:10776039,50830202)资助的课题.

[†] E-mail: ymwen@cqu.edu.cn

$$H_x = \frac{M}{2\pi} \left[\operatorname{atan}\left(\frac{z+t}{x-a}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{z-t}{x-a}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{z+t}{x+a}\right) + \operatorname{atan}\left(\frac{z-t}{x+a}\right) \right], \quad (1)$$

M 为 FeCuNbSiB 磁化强度.

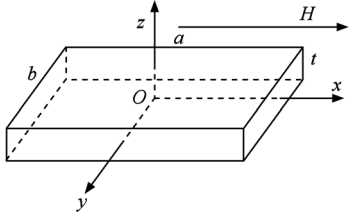


图1 FeCuNbSiB 示意图

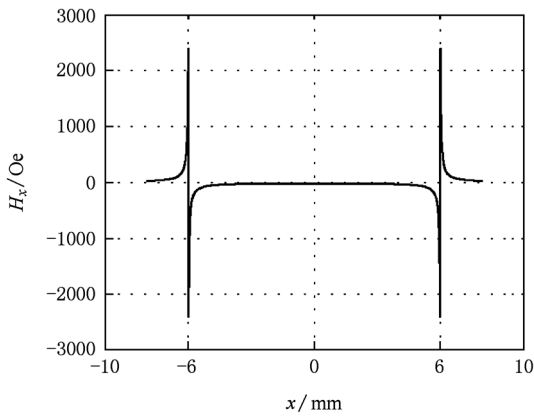


图2 $y=0, z=-0.015 \text{ mm}, a=12 \text{ mm}, t=0.028 \text{ mm}$, H_x 沿 x 方向的分布

图 2 给出了 $y=0, z=-0.015 \text{ mm}$ 时

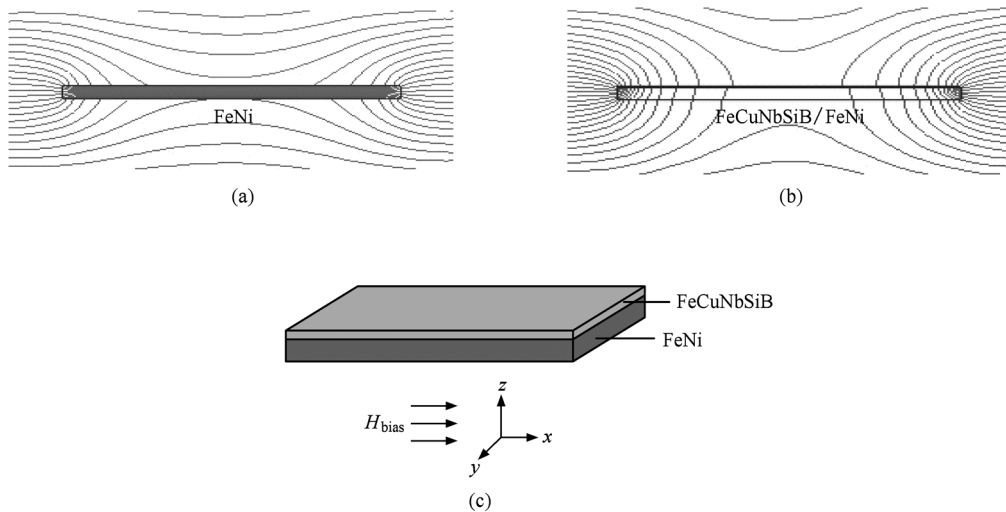


图3 (a) FeNi 磁化时磁力线分布;(b) FeCuNbSiB/FeNi 磁化时磁力线分布;(c) FeCuNbSiB/FeNi 结构示意图

FeCuNbSiB 沿 x 方向的磁场分布,可以看出 FeCuNbSiB 两个边缘处的磁场很强.使用 ANSOFT 工程电磁场有限元分析软件对 FeNi, FeCuNbSiB/FeNi 在偏置磁场 H_{bias} 中的磁化进行仿真.

图 3 (a), (b) 分别给出了 FeNi, FeCuNbSiB/FeNi 磁化后磁场分布图.当二者分别处在 $H_{\text{bias}} = 76 \text{ Oe}$ 的磁场中,其磁场强度沿 x 方向的分布如图 4 所示;其中 FeNi 的几何中心坐标为 $(0, 0, 0)$; FeCuNbSiB, FeNi 长宽厚分别为 $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.028 \text{ mm}, 12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$.

从图 4 和图 5 可以看出, FeCuNbSiB/FeNi 内端面处的磁场强度大于 FeNi 内端面的磁场强度, $H_{\text{bias}} = 76 \text{ Oe}$ 时,二者相差 13 Oe ; $H_{\text{bias}} = 200 \text{ Oe}$ 时,二者相差 30 Oe .这是由于 FeCuNbSiB 的相对磁导率 (6×10^5) 远大于 FeNi 的相对磁导率 (36) , 根据 $B = \mu_0 \mu_r H$, FeCuNbSiB/FeNi 两端汇聚的磁场强度将大于 FeNi 两端的磁场强度;而对于 FeNi 中心部分的磁场强度,比较图 3 (a), (b) 可以看到, FeCuNbSiB/FeNi 中的磁场几乎与其表面垂直,所以贴了 FeCuNbSiB 后的 FeNi 中心部分沿 x 方向磁场的分量是减小的.

根据磁荷观点,磁性材料被磁化后,磁荷均聚集在磁性材料的两个端面^[11],因此,内端面磁场强度的大小直接反映了磁性材料的磁化状态;比较图 4、图 5 细节图可以看出,当 $H_{\text{bias}} = 200 \text{ Oe}$ 时, FeNi 内端面的磁场强度与 $H_{\text{bias}} = 76 \text{ Oe}$ 时复合结构 FeCuNbSiB/FeNi 中 FeNi 的内端面磁场强度近似相等,相差约 0.2 Oe .因此,二者的磁化状态近似一致,磁化后反映出的特性应该具有相似性.

FeNi 压磁系数受到偏置磁场的影[12], 当偏置磁场 H_{bias} 为 200 Oe 时, FeNi 的压磁系数达到最大; 根据上述分析, FeCuNbSiB/FeNi 处在 76 Oe 时, 其压

磁系数也会达到最大; 这表明加入 FeCuNbSiB 后可能会使得 FeNi 压磁系数的最优偏置磁场降低到 76 Oe.

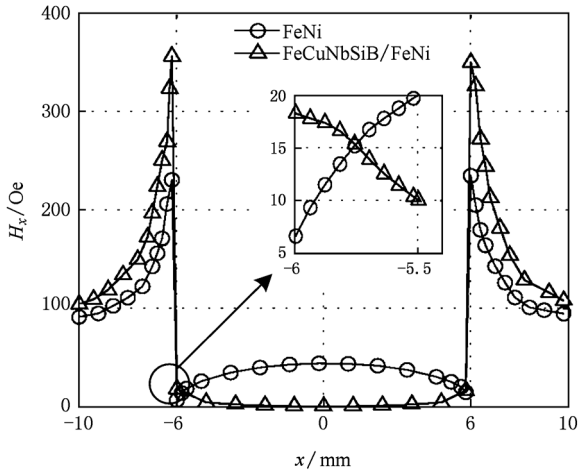


图4 $H_{bias} = 76$ Oe, FeNi, FeCuNbSiB/FeNi 沿 x 方向上的磁场分布

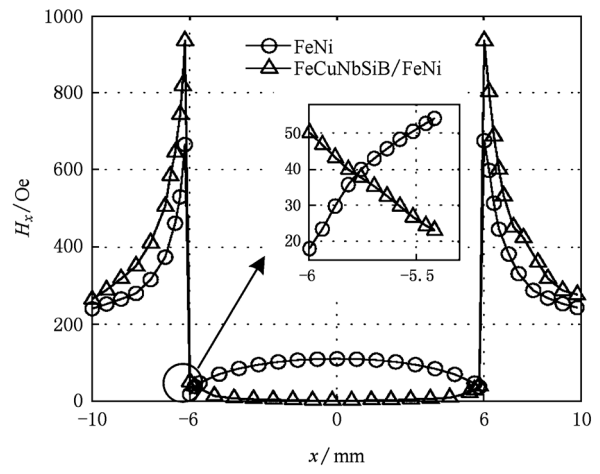


图5 $H_{bias} = 200$ Oe, FeNi, FeCuNbSiB/FeNi 沿 x 方向上的磁场分布

磁电层合结构 FeCuNbSiB/FeNi/PZT 谐振时的

磁电电压转换系数为[13]

$$\alpha_{ME} = \frac{8Q_{mech}n(1-n)td_{33,m}d_{31,p}}{\epsilon_{33}[n(1-k_{31}^2)s_{11}^E + (1-n)(\pi^2 + (8Q_{mech} - \pi^2)k_{31}^2)s_{33}^H]}, \quad (2)$$

n 为磁致伸缩层的厚度与总厚度的比值, t 为层合材料总厚度, $d_{31,p}$ 为压电常数, s_{33}^H, s_{11}^E 分别为磁致伸缩材料和压电材料的柔顺系数, ϵ_{33}, k_{31} 分别为压电材料的介电常数和机电耦合系数, Q_{mech} 为层合材料的机械品质因数. 可以看出 $\alpha_{ME} \propto d_{33,m}$, FeNi 具有很小的 ΔE 效应 ($\Delta E = 1.6\%$), 因此 s_{33}^H 随偏置磁场的变化不大. 不考虑压电层的影响时, 磁电电压转换系数 α_{ME} 主要受到压磁系数 $d_{33,m}$ 的影响, 所以高磁导率材料通过影响 FeNi 的压磁系数而影响层合结构的磁电电压转换系数, FeNi 的压磁系数最优偏置磁场的降低使得层合结构的磁电电压转换系数最优偏置磁场相应地降低.

3. 实验及结果分析

3.1. 压磁系数

实验样品 FeCuNbSiB, FeNi 尺寸分别为 12 mm × 6 mm × 0.028 mm, 12 mm × 6 mm × 0.6 mm, 均沿纵向磁化 (L 模式). 分别测量了 FeNi, FeCuNbSiB/

FeNi 的压磁系数, 其中 FeCuNbSiB/FeNi 是使用环氧树脂胶黏剂按照如图 3(c) 配置将两者对称黏结; 测量压磁系数时, 使用德国生产的 Polytec OFV-5000 型多普勒测振仪 (LDV), 测得样品端面处的振动速度 v 的振幅随偏置磁场的变化曲线. 根据公式 $v = 2\pi f\lambda_{33}, d_{33,m} = 2\lambda_{33}/lH_{ac}$ (f 为样品振动频率, λ_{33} 为样品纵向伸缩位移, l 为样品长度, H_{ac} 为激励交变磁场) 可得磁致伸缩材料的压磁系数 $d_{33,m}$. 测试原理图如图 6 所示; 其中偏置磁场 H_{bias} 由一对环形 NdFeB 永磁体 (内直径 3 cm, 外直径 7 cm, 厚度 1.4 cm) 产生, 调节磁铁间距可改变偏置磁场大小, 磁场大小使用高斯计测量. 交变磁场 $H_{ac} = 1$ Oe, 采用长直螺线管产生, 样品放在长直螺线管中部. 偏置磁场和交变磁场都沿样品长度方向施加. 整个系统通过计算机实现自动控制测量, 使用 LabVIEW 软件对仪器进行控制和数据采集.

图 7 显示了样品的压磁系数随着偏置磁场的变化曲线. 当 $|H_{bias}| < 200$ Oe 时, FeCuNbSiB/FeNi 的压磁系数是 FeNi 压磁系数的 1—10 倍, 其中在 $H_{bias} = 55$ Oe 处是 4 倍; 当 $700 \text{ Oe} > |H_{bias}| > 200$ Oe

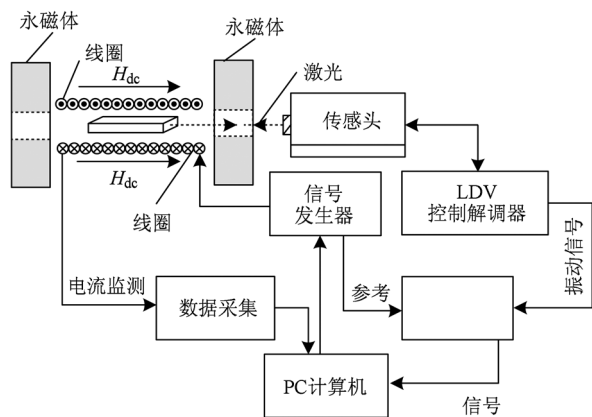


图6 磁致伸缩材料振动特性测试系统

时,两者的压磁系数近似相等.从图中可以看出 FeNi, FeCuNbSiB/FeNi 压磁系数的最优偏置磁场分别为 200 Oe, 55 Oe, 即加入 FeCuNbSiB 使得 FeNi 压磁系数最优偏置磁场降低.根据上文所述 FeNi 压磁系数最优偏置磁场会降低到 76 Oe 附近,而实验值为 55 Oe,这是因为理论仿真并没有考虑胶层、温度、以及实验中的其他干扰因素.可以预测,随着 FeNi 最优偏置磁场的降低, FeCuNbSiB/FeNi/PZT 的磁电电压转换系数的最优偏置磁场也应该降低到 55 Oe 附近;在低偏置磁场中,随着压磁系数的增大, FeCuNbSiB/FeNi/PZT 的磁电电压转换系数相对于 FeNi/PZT 的磁电电压转换系数也将有所提高.

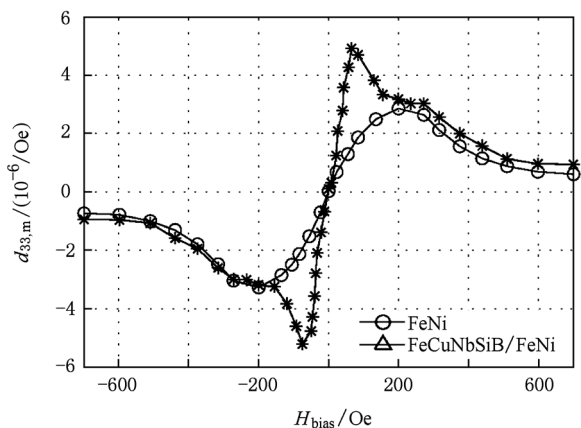


图7 FeNi 和 FeCuNbSiB/FeNi 的有效压磁系数

3.2. 磁电谐振响应

制作了一种磁电层状复合结构,如图 8(a) 所示.图 8(b) 为 LT 模式坐标定义. FeCuNbSiB, FeNi 为测量压磁系数时的样品. PZT 尺寸为 12 mm × 6 mm × 0.8 mm,沿厚度方向极化(T 模式).使用环氧

树脂胶黏剂按照如图 8(a) 配置将三种样片对称黏结. L, w, t 分别表示长、宽、厚.实验测试系统如图 9 所示.

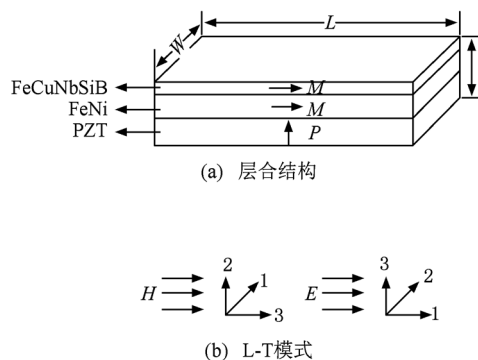


图8 层合结构示意图



图9 层合结构磁电电压转换系数测试系统

图 10 为偏置磁场中层合结构的磁电电压转换系数随频率的变化曲线.取层合结构在谐振处的磁电电压转换系数(峰值),得到层合结构谐振磁电电压转换系数-偏置磁场的变化曲线如图 11 所示.当 $H_{bias} < 200$ Oe 时, FeCuNbSiB/FeNi/PZT 的磁电电压转换系数高于 FeNi/PZT 的磁电电压转换系数.当 700 Oe $> |H_{bias}| > 200$ Oe 时,两者的磁电电压转换系数近似相等;从图中可以看出 FeNi/PZT, FeCuNbSiB/FeNi/PZT 的磁电电压转换系数最优偏置磁场分别为 200 Oe, 50 Oe, 加入 FeCuNbSiB 使得 FeNi/PZT 的磁电电压转换系数最优偏置磁场降低,最大的磁电电压转换系数从 1.59 V/Oe 增大到 2.77 V/Oe,这可能是因为:1) 在交变磁场中, FeCuNbSiB 产生了一个交变磁场作用到 FeNi 中;2) 高磁导率材料 FeCuNbSiB 提高了 FeNi 的磁导率^[14].在低偏置磁场中,层合结构的磁电电压对静态磁场的灵敏度有所提高,从 19.1 mV/Oe 增大到 158.6 mV/Oe.

根据(1)式分析可知,材料厚度 t 影响材料端面

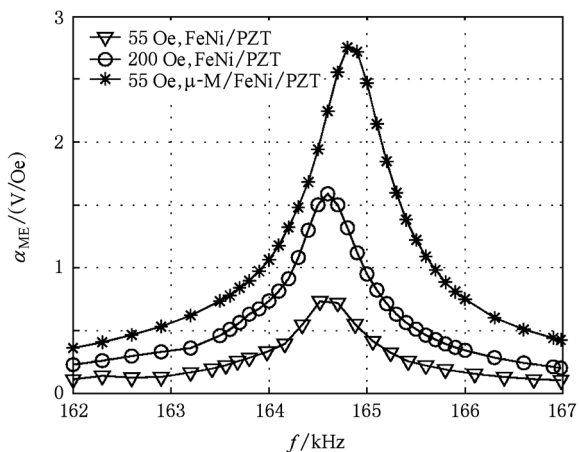


图 10 不同层合结构磁电电压转换系数-频率曲线 (μ -M 表示 FeCuNbSiB)

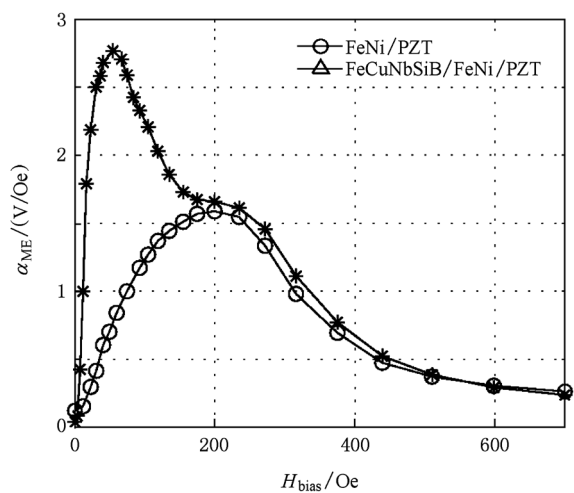


图 11 不同层合结构的谐振磁电电压转换系数随偏置磁场变化曲线

磁场强度的大小. 图 12 给出在给定的长度和宽度下, FeCuNbSiB 的厚度变化与材料端面磁场强度的关系.

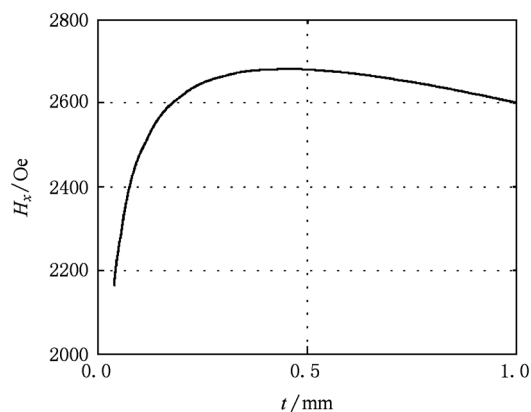


图 12 不同厚度 t 的 FeCuNbSiB 端面的磁场强度分布曲线

从图 12 可看出, 当 $t = 0.457$ mm 时, H_x 达到最大; 因此可以通过改变 FeCuNbSiB 厚度来改变复合结构 FeCuNbSiB/FeNi 端面汇聚磁场的大小. 当复合结构 FeCuNbSiB/FeNi 中 FeCuNbSiB 厚度为 0.457 mm 时, FeNi 的压磁系数与 FeCuNbSiB/FeNi/PZT 磁电电压系数的最优偏置磁场均会降至最低.

4. 结 论

通过高磁导率材料 FeCuNbSiB 对 FeNi 内部磁场的影响分析, 发现高磁导率材料相的加入使压磁相的磁化增强. 测试表明 FeNi 的压磁系数随偏置磁场变化, 加入 FeCuNbSiB 后的 FeNi 压磁系数在低偏置磁场 ($= 55$ Oe) 下有所增大, 其最优偏置磁场明显降低. 在此基础上提出了一种三相磁电层合结构 FeCuNbSiB/FeNi/PZT, 三相层合结构的最优偏置磁场从二相层合结构的 200 Oe 降低到 55 Oe, 最大磁电电压转换系数从 1.59 V/Oe 增大到 2.77 V/Oe, 磁电电压转换系数对静态磁场的灵敏度从 19.1 mV/Oe 提高到 158.6 mV/Oe.

[1] Ryu J, Carazo A V, Uchino K, Kim H 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 4948
 [2] Dong S X, Zhai J Y, Li J F, Viehland D 2006 *Appl. Phys.* **100** 124108-1
 [3] Dong S X, Zhai J Y, Li J F, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 122903
 [4] Dong S X, Cheng J R, Li J F, Viehland D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4812

[5] Dong S X, Li J F, Viehland D, Cheng J, Cross L E 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3534
 [6] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2307
 [7] Dong S X, Li J F, Viehland D 2006 *Mater. Sci.* **41** 97
 [8] Li P, Zheng M 2006 *IEEE International Conference on Information Acquisition* **1** 1010
 [9] Bian L X, Wen Y M, Li P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4205 (in Chinese) [卞雷祥, 文玉梅, 李平 2009 物理学报 **58** 4205]

- [10] Liu X X, Dai B, Ni J 2009 *J. Mag. Mat. & Dev* **6** 24 (in Chinese) [刘晓霞、代波、倪经 2009 磁性材料及器件 **6** 24]
- [11] Zhao K H, Chen X M 2003 *Electromagnetism* (Beijing: Higher Education Press) p226 (in Chinese) [赵凯华、陈熙谋 2003 电磁学 (北京: 高等教育出版社) 第 226 页]
- [12] Yang C H, Wen Y M, Li P, Bian L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7292 (in Chinese) [阳昌海、文玉梅、李平、卞雷祥 2008 物理学报 **57** 7292]
- [13] Yang F, Wen Y M, Li P, Zheng M, Bian L X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3539 (in Chinese) [杨帆、文玉梅、李平、郑敏、卞雷祥 2007 物理学报 **56** 3539]
- [14] Hashin Z, Shtrikman S 1962 *J. Appl. Phys.* **33** 3125

Influence of high-permeability FeCuNbSiB alloy on magnetoelectric effect of FeNi/PZT laminated composite *

Wen Yu-Mei[†] Wang Dong Li Ping Chen Lei Wu Zhi-Yi

(College of Optoelectronic Engineering, The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(Received 16 October 2010; revised manuscript received 13 December 2010)

Abstract

A FeCuNbSiB/FeNi/PZT laminated composite is developed and comparatively studied with a FeNi/PZT laminated composite. The influence of high-permeability FeCuNbSiB alloy on applied DC magnetic field, piezomagnetic coefficient and optimal bias magnetic field of FeNi is investigated. The experimental results show that compared with in the two-phase FeNi/PZT, in the three-phase FeCuNbSiB/FeNi/PZT laminated composite, (i) the optimal bias magnetic field decreases from 2000e to 550e, and the maximum magnetoelectric (ME) voltage coefficient increases from 1.59V/Oe to 2.77V/Oe; (ii) under small bias magnetic field, the ME voltage coefficient increases by a factor of 1.7—7.8; (iii) the sensitivity of the ME voltage coefficient for the laminated composite to a DC magnetic field increases from 19.1mV/Oe to 158.6mV/Oe. The variations in ME effect of three-phase composite result from the enhancement of magnetization at end faces, which is generated by introducing the high permeability material phase.

Keywords: laminated composite, optimum bias magnetic, high-permeability, magnetoelectric voltage coefficient

PACS: 75.80.+q, 75.85.+t, 77.65.-j

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10776039 and 50830202).

[†] E-mail: ymwen@cqu.edu.cn