

磁铁/压电双晶片复合材料磁电耦合性能的优化设计

张源 高雁军 胡诚 谭兴毅 邱达 张婷婷 朱永丹 李美亚

Optimization design for magnetoelectric coupling property of the magnet/bimorph composite

Zhang Yuan Gao Yan-Jun Hu Cheng Tan Xing-Yi Qiu Da Zhang Ting-Ting Zhu Yong-Dan Li Mei-Ya

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 167501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.167501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.167501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

**Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub> 合金磁畴偏转的滞回特性研究**

**Study on hysteresis characteristics of magnetic domain rotation in Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub> alloy**

物理学报.2016, 65(6): 067501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.067501>

**Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub> 合金的本构参数辨识方法研究**

**Method of identifying constitutive parameter in Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub> Alloy**

物理学报.2015, 64(2): 027501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.027501>

**磁性应力监测中力磁耦合特征及关键影响因素分析**

**Analysis of characteristics and key influencing factors in magnetomechanical behavior for cable stress monitoring**

物理学报.2013, 62(17): 177501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.177501>

**高斯型非均匀应力对铁磁薄膜磁化性质的影响**

**Gaussian type inhomogeneous stress and strain effects on the magnetic properties in ferromagnetic thin films**

物理学报.2013, 62(16): 167503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.167503>

**Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub> 合金磁畴偏转研究**

**Study on magnetic domain deflection in Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub> alloy**

物理学报.2012, 61(16): 167506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.167506>

# 磁铁/压电双晶片复合材料磁电耦合性能<sup>\*</sup>的优化设计<sup>\*</sup>

张源<sup>1)2)</sup> 高雁军<sup>1)</sup> 胡诚<sup>1)</sup> 谭兴毅<sup>1)</sup> 邱达<sup>1)</sup> 张婷婷<sup>1)</sup>  
朱永丹<sup>1)2)†</sup> 李美亚<sup>2)‡</sup>

1) (湖北民族学院理学院, 恩施 445000)

2) (武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072)

(2016年5月6日收到; 2016年6月12日收到修改稿)

本文采用弹性力学的方法, 基于压电方程, 给出了磁铁/压电双晶片 (Bimorph) 复合材料磁电耦合系数的理论表达式, 并选取不同的结构参数和材料参数对其磁电耦合系数进行了数值计算. 研究表明: Bimorph 存在最佳的压电层厚度, 使得磁铁/Bimorph 复合材料的磁电耦合系数达到最大; 金属层材料和压电相材料也均会影响磁铁/Bimorph 复合材料的磁电耦合系数. 该研究结果为磁铁/Bimorph 复合材料的优化设计、实际应用提供了有益的理论指导.

**关键词:** 磁电耦合效应, 复合材料, 压电双晶片, 磁铁

**PACS:** 75.80.+q, 75.85.+t, 77.80.bg, 77.84.Lf

**DOI:** 10.7498/aps.65.167501

## 1 引言

在外界磁场的作用下材料的极化强度发生变化或者在外界电场的作用下材料的磁化强度发生变化的效应称为磁电耦合效应<sup>[1,2]</sup>. 具有磁电耦合效应的材料称为磁电材料, 它不仅蕴藏着丰富的物理内涵, 而且具有广泛的应用前景, 如传感器<sup>[3-8]</sup>、电可控微波器件<sup>[9-11]</sup>、多相存储等<sup>[12,13]</sup>. 单相磁电材料 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 通常在低温下才展现出微弱的磁电耦合效应<sup>[14-16]</sup>, 而磁电复合材料则能够通过多相非磁电材料的相互耦合实现明显的室温下的磁电耦合效应<sup>[17,18]</sup>. 其中典型的磁电复合材料是韩国学者 Ryu<sup>[19,20]</sup> 于2001年提出的磁致伸缩/压电层状复合材料. 自那时起, 国际上关于磁电复合材料的研究就大多集中于磁致伸缩材料与压电材料的复合<sup>[21]</sup>. 经过10多年的发展, 磁致伸缩/压电复

合材料的磁电耦合性能有了显著的提高, 磁电耦合系数提升了4个数量级<sup>[22]</sup>, 也逐步从实验室研究走向了工业应用<sup>[23]</sup>.

然而, 除了基于磁致伸缩/压电复合原理的磁电材料, 还报道了基于其他工作原理的磁电复合材料, 如基于洛伦兹效应和压电效应复合的金属/压电材料<sup>[24]</sup>、基于磁热效应和热释电效应复合的磁热/热释电材料<sup>[25]</sup>、基于磁扭矩效应和压电效应复合的磁铁/压电材料等<sup>[26]</sup>. 而邢增平<sup>[27,28]</sup> 在 NdFeB/PZT-Bimorph 材料中发现了超强的磁电耦合效应, 低频磁电系数达到  $100 \text{ V/cm}\cdot\text{Oe}$ . 这种磁铁/压电复合材料的磁电耦合机理完全不同于传统的磁致伸缩/压电复合材料: 传统的磁致伸缩/压电复合材料是基于界面的应力/应变耦合实现的磁电效应, 而这种磁铁/压电复合材料的磁电耦合来源于界面的力矩耦合. 这种新型的磁电复合材料一经报道, 立刻引起了国内外研究人员的关注, 并对

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 51132001)、国家自然科学基金 (批准号: 11504101, 11364018, 51372174, J1210061)、湖北省自然科学基金 (批准号: 2014CFB610) 和湖北省青年创新团队基金 (批准号: T201429) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yongdan\_zhu@whu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: myli@whu.edu.cn

此做了深入的跟踪研究<sup>[29,30]</sup>, 并提出了不同的结构设计, 进一步提高了磁铁/压电复合材料的磁电耦合性能. 然而这其中针对磁铁/压电复合材料典型结构深入全面的理论研究却一直缺失.

在本文中, 我们采用弹性力学的方法, 建立了磁铁/压电双晶片 (Bimorph) 的磁电耦合理论, 并获得了其磁电耦合系数的表达式, 系统全面地研究了材料参数、结构参数对复合材料磁电耦合性能的影响, 为磁铁/Bimorph 复合材料的优化设计提供了有益的理论指导.

## 2 磁铁/Bimorph 复合材料的磁电耦合理论

磁铁/Bimorph 磁电复合材料的原理模型如图 1 所示, 它是由悬臂梁结构的压电 Bimorph 与连接在自由端的磁铁组合而成. 其中两片压电晶片均沿厚度方向极化 (图中用  $\mathbf{P}$  表示), 并电学并联在一起; 自由端磁铁的磁化方向 (图中用  $\mathbf{J}$  表示) 沿垂直于 Bimorph 主平面. 在沿 Bimorph 长度方向的外界磁场中, 自由端磁铁会产生扭矩, 并通过界面接触作用在 Bimorph 上, 致使其弯曲变形, 最终产生电压输出  $U$ .

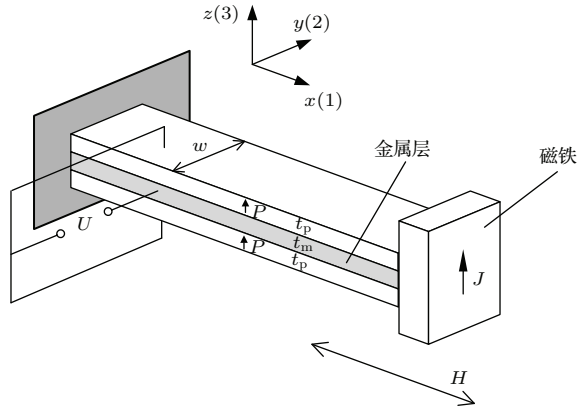


图 1 磁铁/Bimorph 磁电复合材料的原理模型图及建立的坐标系, 其中 Bimorph 的宽度为  $w$ , 压电层的厚度为  $t_p$ , 金属层的厚度为  $t_m$

Fig. 1. Schematic illustration of magnets/Bimorph ME composite and the constructed coordinates system, where  $w$  is the width of the Bimorph,  $t_p$  and  $t_m$  are the thickness of piezoelectric layer and metal layer respectively.

建立关于磁铁/Bimorph 复合材料的磁电耦合理论, 要从相材料的本构方程出发. 根据 Bimorph 的结构特点, 这里采取  $g$  型压电方程比较合适:

$$S_{1,p} = s_{11}^D T_{1,p} + g_{31} D_3, \quad (1)$$

$$E_3 = -g_{31} T_{1,p} + D_3 / \epsilon_{33}^T, \quad (2)$$

式中, 下标  $p$  代表压电相材料. 对于金属层, 其力学本构方程为

$$S_{1,m} = s_{11,m} T_{1,p}, \quad (3)$$

式中, 下标  $m$  代表金属层材料. 其中  $S_1$  和  $T_1$  分别为 Bimorph 在外界作用下产生的纵向应变和应力;  $D_3$  和  $E_3$  分别为压电相材料的电位移量和感生电场, 在开路条件下

$$D_3 = 0; \quad (4)$$

$s_{11}^D$ ,  $g_{31}$  和  $\epsilon_{33}^T$  分别为压电相材料在恒电位移下的柔顺系数、压电电压系数和在恒应力下的介电常数;  $s_{11,m}$  为金属层材料的柔顺系数.

根据梁的弯曲理论, 发生小挠度弯曲变形时, 应变表达式为

$$S_1 = -\kappa z, \quad (5)$$

式中,  $\kappa$  为弯曲曲率. 根据 (1)–(5) 式, 可得

$$T_{1,p} = -\frac{\kappa}{s_{11}^D} z, \quad (6)$$

$$E_3 = \frac{g_{31} \kappa}{s_{11}^D} z, \quad (7)$$

$$T_{1,m} = -\frac{\kappa}{s_{11,m}} z. \quad (8)$$

于是, 由 (6) 式和 (8) 式可得 Bimorph 的弯矩  $M$  表达式为

$$M = w \left( \int_{-(\frac{t_m}{2} + t_p)}^{-\frac{t_m}{2}} z T_{1,p} dz + \int_{-\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2}} z T_{1,m} dz + \int_{\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2} + t_p} z T_{1,p} dz \right) = -w \Omega \kappa, \quad (9)$$

式中,

$$\Omega = \frac{2}{3s_{11}^D} \left( t_p^3 + \frac{3}{2} t_p^2 t_m + \frac{3}{4} t_p t_m^2 \right) + \frac{t_m^3}{12s_{11,m}} \quad (10)$$

为 Bimorph 单位宽度的弯曲刚度.

在外界磁场  $H$  的作用下, 磁铁由于磁扭矩效应施加给 Bimorph 自由端的弯矩为

$$M_H = mH = J_r V H, \quad (11)$$

其中,  $m$ ,  $J_r$  和  $V$  分别为磁铁的磁矩、剩余磁化强度和体积. 根据力矩平衡条件, 对于 Bimorph 有

$$-M_H = M = -w \Omega \kappa, \quad (12)$$

则得

$$\kappa = J_r V H / \Omega. \quad (13)$$

将(13)式代入(7)式中则可得压电相中感生电场的表达式, 然后  $E_3$  沿压电相厚度方向积分, 则可得磁铁/Bimorph 复合材料在外界磁场作用下的输出电压为

$$\begin{aligned} -U &= \int_{\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2}+t_p} E_3 dz = \frac{g_{31} J_r V H}{w s_{11}^D \Omega} \frac{z^2}{2} \Big|_{\frac{t_m}{2}}^{\frac{t_m}{2}+t_p} \\ &= \frac{g_{31} J_r V H}{2 w s_{11}^D \Omega} (t_p^2 + t_p t_m). \end{aligned} \quad (14)$$

由(14)式, 再根据磁电耦合系数的定义, 便可得到磁铁/Bimorph 复合材料的磁电耦合系数的表达式为

$$\alpha_{ME} = \left| \frac{U}{H} \right| = \left| \frac{g_{31} J_r V}{2 w s_{11}^D \Omega} (t_p^2 + t_p t_m) \right|. \quad (15)$$

(15)式给出了磁铁/Bimorph 复合材料磁电耦合性能与材料参数、结构参数的关系.

### 3 数值计算结果与讨论

根据(15)式模拟计算不同参数对磁铁/Bimorph 复合材料磁电耦合性能的影响. 若无特殊说明, 模拟计算中 Bimorph 所选取的压电相材料为 PZT-5 H 陶瓷, 金属层材料为黄铜, 自由端磁铁为钕铁硼. 各种材料的性能、几何参数如下[30]: PZT-5H 陶瓷恒电位移下的柔顺系数  $s_{11}^D = 14.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ , 压电电压系数  $g_{31} = -9.11 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m}/\text{N}$ ; 黄铜的柔顺系数  $s_{11,m} = 9.09 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ; 磁铁的剩余磁化强度  $J_r = 1.2 \text{ T}$ ; Bimorph 的宽度  $w$  固定为 7 mm, 钕铁硼磁铁的体积  $V$  固定为  $1 \text{ cm}^3$ .

图 2 显示了不同金属层材料厚度 ( $t_m = 0.2, 0.5, 0.8 \text{ mm}$ ) 的磁铁/Bimorph 复合材料磁电耦合系数  $\alpha_{ME}$  与压电层厚度  $t_p$  的关系. 从图 2 中的计算结果可以看出: 金属层厚度越小, 磁电耦合系数越大,  $t_m = 0.2 \text{ mm}$  时对磁铁/Bimorph 复合材料能够获得的最大磁电耦合系数为  $0.33 \text{ V/Oe}$ ; 而  $t_m = 0.5$  和  $0.8 \text{ mm}$  时该值分别只有  $0.13$  和  $0.08 \text{ V/Oe}$ . 这是由于金属层越薄, Bimorph 的弯曲刚度越小, 在同样弯矩作用下, 发生的形变越大导致的. 另外值得注意的是, 金属层厚度越小, 磁铁/Bimorph 复合材料获得最大磁电耦合系数所对应的压电层厚度也越小, 分别对应  $t_p = 0.09, 0.22,$

$0.36 \text{ mm}$ . 工程上厚度小于  $0.2 \text{ mm}$  的块体压电材料是很难加工的. 于是, 当金属层厚度为  $0.2 \text{ mm}$  时, 要使磁铁/Bimorph 复合材料获得最大磁电耦合系数是具有相当难度的. 综合考虑器件的最终性能和加工难度, 相较而言, 将 Bimorph 中金属层材料的厚度设置为  $0.5 \text{ mm}$  是最优的. 而且, 当金属层厚度为  $0.5 \text{ mm}$  或更高时, 复合材料的磁电耦合性能对压电层厚度的敏感性更低, 这会有利于器件性能一致性的控制.

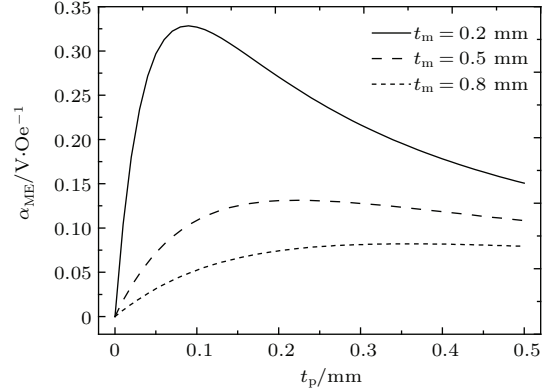


图 2 不同金属层材料厚度的磁铁/Bimorph 复合材料磁电系数  $\alpha_{ME}$  与压电层厚  $t_p$  的关系

Fig. 2. The ME voltage coefficient  $\alpha_{ME}$  of magnet/Bimorph composite with different thickness of metal layer as a function of the thickness  $t_p$  of the piezoelectric layer.

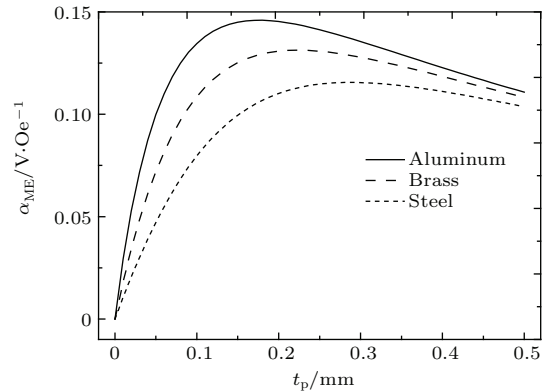


图 3 不同金属层材料的磁铁/Bimorph 复合材料磁电系数  $\alpha_{ME}$  与压电层厚度  $t_p$  的关系

Fig. 3. The ME voltage coefficient  $\alpha_{ME}$  of magnet/Bimorph composite with different kinds of metal layer as a function of the thickness  $t_p$  of the piezoelectric layer.

图 3 比较了金属层材料 (硬铝 aluminum、黄铜 brass、软钢 steel) 对磁铁/Bimorph 复合材料磁电耦合性能的影响. 在计算中, 硬铝和软钢的柔顺系数分别为  $15.4 \times 10^{-12}$  和  $5.13 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$  [31]; 同时金属层材料的厚度固定为  $0.5 \text{ mm}$ . 由计算结果可

见: 选取弹性模量( $1/s_{11,m}$ )越小的金属层材料(意味着Bimorph更小的弯曲刚度), 磁铁/Bimorph复合材料磁电耦合系数越大, 而且获得最大磁电耦合系数对应的压电层厚度也越小. 然而当金属层材料为硬铝时, 最大的磁电耦合系数为0.146 V/Oe, 相对于黄铜和软钢的优势并不明显. 若还要考虑到金属层材料的韧性和导电性对于Bimorph力学、电学性能的重要性, 则黄铜依然是最佳的选择.

图4则比较了压电层材料(PZT-4, PZT-5H陶瓷和PZN-PT单晶)对磁铁/Bimorph复合材料磁电耦合性能的影响. 在计算中, 采用的压电材料的参数如下[32,33]: 对于PZT-4陶瓷,  $s_{11}^D = 10.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $g_{31} = -11.1 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m}/\text{N}$ ; 对于PZN-PT单晶,  $s_{22}^D = 26.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $g_{32} = -51.9 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m}/\text{N}$ (实际制作中, [011]方向极化的PZN-PT单晶, [100]方向为Bimorph的长度方向); 同时金属层材料固定为黄铜, 厚度固定为0.5 mm. 当压电层材料为PZT-4和PZT-5H陶瓷时, 虽然PZT-4陶瓷具有更高的弹性模量, 导致Bimorph具有更高的弯曲刚度, 但是更高的压电电压系数弥补了这一弱势, 使得它提高了复合材料的磁电耦合系数. 令人惊喜的是, 当压电层材料为PZN-PT单晶时, 复合材料的磁电耦合系数获得了显著的提高, 最大的磁电耦合系数达到0.65 V/Oe, 分别为PZT-4和PZT-5H陶瓷的3.8和5倍; 同时最大磁电耦合系数对应的压电层厚度为0.3 mm, 相较PZT陶瓷更易加工. 磁铁/PZN-PT Bimorph复合材料突出的磁电耦合性能主要源自于PZN-PT单晶无比优异的压电耦合性能.

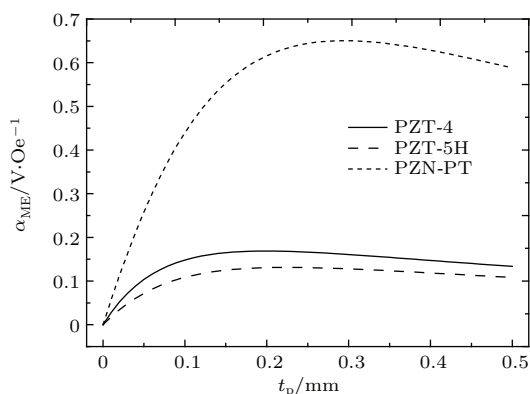


图4 不同压电相材料的磁铁/Bimorph复合材料磁电系数 $\alpha_{ME}$ 与压电层厚度 $t_p$ 的关系

Fig. 3. The ME voltage coefficient  $\alpha_{ME}$  of magnet/Bimorph composite with different kinds of piezoelectric layer as a function of the thickness  $t_p$  of the piezoelectric layer.

## 4 结 论

本文基于电压材料的本构方程和弹性力学理论, 推导了磁铁/Bimorph复合材料准静态下的磁电耦合系数表达式, 建立了其磁电耦合性能与材料参数、结构参数的关系. 通过理论计算可知, 当金属层厚度一定时, 存在最佳的压电层厚度使得磁铁/Bimorph复合材料的磁电耦合系数最大; 而且最佳压电层厚度随着金属层厚度、金属层材料弹性模量的增大而增大. 综合考虑结构参数敏感性、金属层韧性和导电性, 选取0.5 mm厚度的黄铜作为磁铁/Bimorph复合材料的金属层是最合理的. 另外, 选取压电单晶材料作为磁铁/Bimorph复合材料的压电层, 会获得优异的磁电耦合性能.

## 参考文献

- [1] Nan C W, Bichurin M I, Dong S X, Viehland D, Srinivasan G 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 031101
- [2] Ma J, Hu J M, Li Z, Nan C W 2011 *Adv. Mater.* **23** 1062
- [3] Dong S X, Zhai J Y, Bai F M, Li J F, Viehland D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 062502
- [4] Dong S X, Zhai J Y, Xing Z P, Li J F, Viehland D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 102901
- [5] Gao J, Shen L, Wang Y, Gray D, Li J F, Viehland D 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 074507
- [6] Leung C M, Or S W, Ho S L 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 125003
- [7] Jia Y M, Xue A X, Zhou Z H, Wu Z, Chen J R, Ma K, Zhang Y H, Zhou J Y, Wang Y, Chan H L W 2013 *Int. J. Hydrogen Energy.* **38** 14915
- [8] Yu X J, Wu T Y, Li Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 058503 (in Chinese) [于歆杰, 吴天逸, 李臻 2013 物理学报 **62** 058503]
- [9] Fetisov Y K, Srinivasan G 2005 *Electron. Lett.* **41** 1066
- [10] Tatarenko A S, Srinivasan G, Bichurin M I 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 183507
- [11] Lou J, Reed D, Liu M, Sun N X 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 112508
- [12] Li Z, Wang J, Lin Y, Nan C W 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 162505
- [13] Hu J M, Li Z, Chen L Q, Nan C W 2011 *Nat. Commun.* **2** 553
- [14] Astrov D 1961 *Sov. Phys. JETP* **13** 729
- [15] Folen V, Rado G, Stalder E 1961 *Phys. Rev. Lett.* **6** 607
- [16] Wang J, Neaton J B, Zheng H, Nagarajan V, Ogale S B, Liu B, Viehland D, Vaithyanathan V, Schlom D G, Waghmare U V, Spaldin N A, Rabe K M, Wuttig M, Ramesh R 2003 *Science* **299** 1719
- [17] Nan C W 1994 *Phys. Rev. B: Condens. Matter* **50** 6082
- [18] Priya S, Islam R, Dong S X, Viehland D 2007 *J. Electroceram.* **19** 149



- [19] Ryu J, Priya S, Carazo A V, Uchino K, Kim H E 2001 *J. Am. Ceram. Soc.* **84** 2905
- [20] Ryu J, Carazo A V, Uchino K, Kim H E 2001 *J. Appl. Phys.* **40** 4948
- [21] Srinivasan G 2010 *Annu. Rev. Mater. Res.* **40** 153
- [22] Kirchof C, Krantz M, Teliban I, Jahns R, Marauska S, Wagner B, Knöchel R, Gerken M, Meyners D, Quandt E 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 232905
- [23] Leung C M, Or S W, Ho S L, Lee K Y 2014 *IEEE Sens. J.* **14** 4305
- [24] Jia Y M, Zhou D, Luo L H, Zhao X Y, Luo H S, Or S W, Chan H L W 2007 *Appl. Phys. A* **89** 1025
- [25] Lu S G, Fang Z, Furman E, Wang Y, Zhang Q M, Mudryk Y, Gschneidner K A, Pecharsky V K, Nan C W 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 102902
- [26] Xing Z P, Li J F, Viehland D 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 013505
- [27] Xing Z P, Xu K, Dai G Y, Li J F, Viehland D 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 104510
- [28] Xing Z P, Xu K 2013 *Sens. Actuators A* **189** 182
- [29] Liu G X, Li X T, Chen J G, Shi H D, Xiao W L, Dong S X 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 142904
- [30] Radchenko G S, Radchenko M G 2014 *Tech. Phys.* **50** 1457
- [31] Liu G X, Ci P H, Dong S X 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 164104
- [32] Luan G D, Zhang J D, Wang R Q 2005 *Piezoelectric Transducers and Arrays* (Revised Edition) (Beijing: Peking Univ. Press) p93 (in Chinese) [栾桂冬, 张金铎, 王仁乾 2005 压电换能器和换能器阵 (修订版) (北京: 北京大学出版社) 第93页]
- [33] Zhang R, Jiang B, Jiang W H, Cao W W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 242908

# Optimization design for magnetoelectric coupling property of the magnet/bimorph composite\*

Zhang Yuan<sup>1)2)</sup> Gao Yan-Jun<sup>1)</sup> Hu Cheng<sup>1)</sup> Tan Xing-Yi<sup>1)</sup> Qiu Da<sup>1)</sup>

Zhang Ting-Ting<sup>1)</sup> Zhu Yong-Dan<sup>1)2)†</sup> Li Mei-Ya<sup>2)‡</sup>

1) (School of Science, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China)

2) (School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

( Received 6 May 2016; revised manuscript received 12 June 2016 )

## Abstract

Magnetoelectric (ME) composite as one kind of ME material that can yield a strong coupling effect between magnetic and electric fields at room temperature, has drawn widespread attention for decades due to its rich physics contents and significant technological prospect. Except for traditional magnetostrictive/piezoelectric based ME composites, other ME composites have been reported, among which the magnet/piezo-cantilever composites show super strong ME coupling effect. The magnet/piezo-cantilever composite is generally composed of a piezoelectric cantilever and magnets attached at the free end of the cantilever, which realizes ME coupling by force moment-mediated magnetic torque effect and piezoelectric effect. Recently, various configurations of the magnet/piezo-cantilever composites for obtaining higher ME coupling coefficients have been proposed and demonstrated experimentally. However, few theoretical researches of these magnet/piezo-cantilever composites of different configurations have been carried out, which is of great importance for optimizing the design of ME coupling property of the magnet/piezo-cantilever composites. Here in this paper, a theoretical expression for the low-frequency ME coupling coefficient in the magnet/piezo-cantilever composite is deduced based on piezoelectric constitutive equations by using the theory of elastic mechanics. The typical magnet/bimorph composite is chosen as the theoretical model. Based on the deduced theoretical expression, the dependences of the low-frequency ME coupling coefficients in the magnet/bimorph composite on material and structural parameters are numerically calculated. The results show that there are optimal thickness values of the piezoelectric layers in the magnet/bimorph composite with different metal thickness values and material constituents for achieving maximal low-frequency ME coupling coefficients. The thicker the metal layer in the magnet/bimorph composite, the less insensitive the low-frequency ME coupling coefficient to the thickness of the piezoelectric layer will be. And the low-frequency ME coupling coefficient of the magnet/bimorph composite decreases when a metal with higher elastic module is selected for bimorph. For the magnet/bimorph composite consisting of hard piezoelectric ceramics (PZT-4), the low-frequency ME coupling coefficient is higher than that of the composite consisting of the soft counterpart ones (PZT-5 H), which is due to the hard piezoelectric ceramics with higher piezoelectric voltage coefficient than the soft counterpart ones. What is more interesting is that when the piezoelectric material in the magnet/bimorph composite is changed into relaxor ferroelectric single crystals  $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PZN-PT), an extremely high low-frequency ME coupling coefficient can be obtained, which is 3.8 and 5 times those of the composites with hard and soft piezoelectric ceramics, respectively. This research gives a theoretical guidance for optimal design and practical applications of the magnet/Bimorph composite.

**Keywords:** magnetoelectric coupling effect, composite, bimorph, magnet

**PACS:** 75.80.+q, 75.85.+t, 77.80.bg, 77.84.Lf

**DOI:** 10.7498/aps.65.167501

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51132001), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11504101, 11364018, 51372174, J1210061), the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2014CFB610), and the Excellent Young Innovation Team Project of Hubei Province, China (Grant No. T201429).

† Corresponding author. E-mail: [yongdan\\_zhu@whu.edu.cn](mailto:yongdan_zhu@whu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [myli@whu.edu.cn](mailto:myli@whu.edu.cn)