

高磁导率材料 FeCuNbSiB 对超磁致伸缩/压电层合材料磁电性能的影响*

陈 蕾 李 平[†] 文玉梅 王 东

(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 400044)

(2010年8月30日收到; 2010年9月16日收到修改稿)

采用超磁致伸缩材料 $Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$ ($x \approx 0.3$) (Terfenol-D)、压电材料 $PbZr_x Ti_{1-x} O_3$ (PZT) 和高磁导率材料 FeCuNbSiB 构造了新型的层合结构. 由于引入高磁导率材料 FeCuNbSiB 改变了 Terfenol-D 的内部磁场分布, 并且在磁场作用下, FeCuNbSiB 发生形变对 Terfenol-D 产生应力, 增大了 Terfenol-D 的饱和磁致伸缩系数, 使得该层合结构具有更高的磁电电压输出. 利用磁荷理论, 分析了 FeCuNbSiB 对 Terfenol-D 内部有效磁场分布的影响, 并采用磁致伸缩材料 Terfenol-D 的非线性本构关系和等效电路法研究了 FeCuNbSiB 对其磁致伸缩系数的影响以及该层合结构的低频磁电电压系数理论计算公式. 通过实验研究表明: 理论值和实验值定性符合, 且该结构的低频最大磁电电压系数是 Terfenol-D/PZT-8H(MP) 层合结构的 1.3 倍. 同时发现, 当 FeCuNbSiB 厚度小于 180 μm 时, 层合结构的最大磁电电压系数与高磁导率材料 FeCuNbSiB 的厚度呈线性关系.

关键词: 磁电效应, 磁致伸缩材料, 压电材料, 高磁导率材料

PACS: 75. 85. +t, 75. 70. Cn, 75. 50. Kj

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电极化的现象^[1]. 早期的研究主要集中在具有磁电效应的单相化合物上^[2,3], 然而单相材料的磁电效应很小, 而且通常在低温下才能实现, 因此难以用于实际应用. 2001年, Ryu 等^[4]设计了一种压电/磁致伸缩层合材料, 其磁电转换系数远高于颗粒磁电复合材料, 引起了广泛的关注.

磁电层合材料具有高的磁电转换系数这一特性使得它在传感器与换能器领域有着广阔的应用前景, 因而近年来成为了国际上的一个研究热点^[5-10]. 美国的 Srinivasan 等^[5,6]利用薄膜层合技术制备出了镍铁氧体(NFO)- $PbZr_x Ti_{1-x} O_3$ (PZT) 磁电复合材料. Dong 等^[7,8,10]对矩形和环状等多种结构的 $Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$ ($x \approx 0.3$) (Terfenol-D) 和 PZT 层合材料以及层合材料的多种工作模式进行了理论

和实验研究. 此外, Li 等^[11-15]也对层状磁电复合材料进行了研究. 目前, 大量的理论和实验分析^[5-15]主要集中在如何通过提高磁电电压系数来进一步扩展磁电层合材料的应用范围, 但是磁电层合材料的磁电电压系数依赖于材料的特性, 使得这方面的研究至今仍然没有取得较大的进展. 尽管超磁致伸缩材料 Terfenol-D 具有大的磁致伸缩效应和高的磁耦合系数, 但其相对较低的磁导率($\mu_r = 3-20$)限制了 Terfenol-D 的磁致伸缩系数^[16]. 由于磁电电压系数与磁致伸缩系数成正比, 磁电层合材料的磁电电压系数很难进一步提高. 为此, Dong 等^[17]提出利用高磁导率材料 $MnZnFe_2 O_4$ 的磁汇聚效应, 增大整个磁电合成物的有效磁导率, 进一步提高 Terfenol-D 的磁致伸缩系数以达到更强的磁电耦合. 但文献[17]未从理论上分析高磁导率材料对磁致伸缩材料性能以及磁致伸缩/压电/高磁导率材料的磁电特性的影响, 而磁电特性的理论研究对磁电层合材料的结构设计和优化有着非常重要的意义. 本文利用 FeCuNbSiB 磁导率高 ($\mu_r > 100000$) 和磁

* 国家自然科学基金(批准号: 50830202, 60774055, 10776039)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: liping@cqu.edu.cn

致伸缩特性好等特性设计了新型的磁电层合结构,即在磁致伸缩层和压电层下增加一层 FeCuNbSiB,利用 FeCuNbSiB 形变产生对 Terfenol-D 的应力以提高 Terfenol-D 磁致伸缩系数. 结合磁致伸缩材料 Terfenol-D 的非线性本构关系^[18]和层合材料的等效电路^[19,20],详细讨论了高磁导率材料 FeCuNbSiB 对磁致伸缩/压电材料低频磁电特性的影响,为更合理地设计该类磁电层合材料的结构提供了普遍的指导意义.

2. 超磁致伸缩/压电/高磁导率材料复合结构的理论分析

2.1. 磁致伸缩/压电/高磁导率材料的结构

磁致伸缩/压电/高磁导率材料的 3 种结构如图 1 所示. 结构一采用环氧树脂胶剂将 FeCuNbSiB 粘结在磁致伸缩/压电复合结构中磁致伸缩材料的底部,如图 1 (a) 所示;结构二采用环氧树脂胶剂将 FeCuNbSiB 粘结在磁致伸缩/压电复合结构中磁致伸缩材料的左右两侧,如图 1 (b) 所示;结构三采用环氧树脂胶剂将 FeCuNbSiB 粘结在磁致伸缩材料和压电材料中间,如图 1 (c) 所示. 磁致伸缩材料选用 Terfenol-D,沿其长度方向磁化,压电材料选用 PZT-8H 压电陶瓷片,沿厚度方向极化. 外加磁场 H_{app} (由偏置磁场 H_{dc} 和交变激励磁场 H_{ac} 构成) 沿长度方向作用于磁电层合结构时,磁致伸缩层沿长度方向振动产生机械应变,机械应变通过粘结层传递到压电层产生电能输出^[21],从而实现磁电转换. 在这 3 种结构中,由于结构二的 Terfenol-D/PZT-8H (MP) 层合结构与粘结的 FeCuNbSiB 层接触面较小,增强的磁电电压系数不明显. 结构三的 FeCuNbSiB 粘结在 Terfenol-D 和 PZT-8H 中间,影响了 Terfenol-D 和 PZT-8H 的层间耦合,降低了磁电电压系数. 因此本文将重点研究结构一的磁电特性.

从上述分析可知:磁电层合材料的磁电响应特性与超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的磁机特性密切相关,而超磁致伸缩材料的动态磁致伸缩系数受外加磁场的影响. 研究发现^[22],磁致伸缩材料的磁致伸缩系数是外加磁场的函数,这导致磁电层合材料的特性依赖于外加磁场,其磁电电压系数随外加磁场的改变而变化. 然而高磁导率材料 FeCuNbSiB 的引入必然会改变磁致伸缩材料 Terfenol-D 内部的磁场

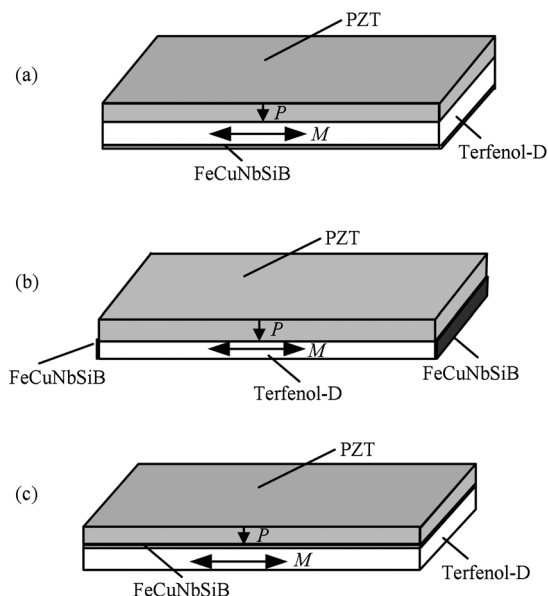


图 1 磁致伸缩/压电/高磁导率材料层合结构示意图 (a) 结构一;(b)结构二;(c)结构三

分布. 为了进一步研究磁致伸缩/压电/高磁导率材料的磁电电压特性,分析高磁导率材料 FeCuNbSiB 对 Terfenol-D 内部有效磁场以及 Terfenol-D 磁机特性的影响是磁电层合材料的重要基础研究之一.

2.2. 高磁导率材料对 Terfenol-D 有效磁场分布的影响

Terfenol-D 在外加磁场 H_{app} 中被均匀磁化后,在其两端面上出现了正负磁荷. 这些正负磁荷将在 Terfenol-D 周围空间产生与外加磁场方向相反的退磁场 H_d ; 同时高磁导率材料 FeCuNbSiB 被磁化后,其磁化电荷也会在 Terfenol-D 内外产生与磁化强度方向相反的附加磁场 H_f . 考虑退磁效应和 FeCuNbSiB 的影响后,磁致伸缩/压电/高磁导率层合材料中 Terfenol-D 所受到的有效磁场强度 H_{eff} 可表示为

$$H_{eff} = H_{app} + H_d + H_f, \quad (1)$$

其中外加磁场 H_{app} 包括偏置磁场 H_{dc} 和所加的交变激励磁场 H_{ac} 两部分,即

$$H_{app} = H_{dc} + H_{ac}. \quad (2)$$

由于退磁效应导致 Terfenol-D 感应到的有效磁场强度的变化从而影响整个层合物的磁电电压系数^[23],因此在计算 Terfenol-D 有效磁场强度时考虑了退磁场的影响. 假设 Terfenol-D 磁化均匀,则 Terfenol-D 的磁化磁荷在磁介质中产生的退磁场 H_d

也是均匀磁场,且与磁化强度 \mathbf{M} 成比例而方向相反. Terfenol-D 的退磁场可表示为^[23]

$$\mathbf{H}_d = -N_d \mathbf{M}, \quad (3)$$

其中 N_d 为退磁因子. 利用 Aharoni 提供的方法^[24], 得到退磁因子 N_d 的值为 0.0704. 磁化强度 \mathbf{M} 可由下式求得^[25]:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}_{\text{eff}}, \quad (4)$$

其中 χ 为磁致伸缩材料的磁化系数. 将(4)式代入(3)式可计算出退磁场

$$\mathbf{H}_d = -N_d \cdot \chi \mathbf{H}_{\text{eff}}. \quad (5)$$

研究发现^[26], 高磁导率的磁性材料可看作静态磁场源在其周围空间产生一个较高的磁场. 假设高磁导率材料 FeCuNbSiB 被均匀磁化, 其内部的磁化强度 $\mathbf{M} = \mathbf{M}_0$, 而外部的磁化强度 $\mathbf{M} = 0$, 磁荷密集分布在 FeCuNbSiB 的边界处. 由于 FeCuNbSiB 的磁导率相当高 ($\mu_{\text{eff}} > 100000$), 在较低的磁场下就能达到饱和, 那么可认为磁化强度 \mathbf{M} 几乎与外加磁场 \mathbf{H} 无关, FeCuNbSiB 可看作一个静态的磁场源, 其在周围空间产生附加磁场 \mathbf{H}_f . 磁荷理论认为, 理想均匀磁体的磁荷只分布在磁极面上, N 极分布正磁荷, S 极分布负磁荷, 它们的磁荷面密度 σ_m 相等, 均为 $\sigma_m (= \mu_0 \mathbf{M} \cdot \mathbf{n})$ ^[25,27], 其中 \mathbf{n} 为磁极面的外法向单位矢量, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率. 因此, 采用磁荷理论可计算附加磁场 \mathbf{H}_f 的值.

坐标原点取 FeCuNbSiB 的中心位置处, 建立笛卡尔坐标系, FeCuNbSiB 长为 $2a$, 宽为 $2b$, 厚为 $2c$, 如图 2 所示. 设 Terfenol-D 中一点 $P(x, y, z)$, 此点的磁场强度由 FeCuNbSiB 的正负磁极面 S_+ 和 S_- 共同产生. 下面先求磁极面 S_+ 在 P 点产生的磁场强度 \mathbf{H}_{x+} . 设磁极面 S_+ 上任意一点 $Q(a, y_1, z_1)$ 的磁荷为 $dM_Q = \sigma_m ds_+$, 则有

$$H_{x+} = \frac{\sigma_m}{4\mu_0\mu_r\pi} \int_{-b}^b \int_{-c}^c \frac{(x-a)}{[(x-a)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{3/2}} dy_1 dz_1, \quad (9)$$

$$H_{x-} = \frac{\sigma_m}{4\mu_0\mu_r\pi} \int_{-b}^b \int_{-c}^c \frac{(x+a)}{[(x+a)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{3/2}} dy_1 dz_1. \quad (10)$$

P 点的合磁场强度在 x 方向的分量 H_x 为

$$H_x = H_{x+} - H_{x-}. \quad (11)$$

同理, 可以求出 FeCuNbSiB 的磁极面 S_+ 和 S_- 在 Terfenol-D 的平均磁场强度在 x 方向的分量 H_f . 由于 H_f 的公式较复杂, 这里只将(2)和(5)式代入(1)

$$d\mathbf{H}_+ = \frac{dM_Q}{4\mu_0\mu_r\pi|r_+|^3} \mathbf{r}_+ = \frac{\sigma_m ds_+}{4\mu_0\mu_r\pi|r_+|^3} \mathbf{r}_+, \quad (6)$$

其中, $|r_+|^3 = [(x-a)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{3/2}$, μ_r 为 Terfenol-D 的相对磁导率.

同样可求出磁极面 S_- 在 P 点产生的磁场强度

$$d\mathbf{H}_- = \frac{dM_Q}{4\mu_0\mu_r\pi|r_-|^3} \mathbf{r}_- = \frac{\sigma_m ds_-}{4\mu_0\mu_r\pi|r_-|^3} \mathbf{r}_-. \quad (7)$$

P 点的合磁场强度 \mathbf{H} 为

$$\begin{aligned} \mathbf{H} = \mathbf{H}_+ + \mathbf{H}_- = & \iint \frac{\sigma_m}{4\mu_0\mu_r\pi|r_+|^3} \mathbf{r}_+ ds_+ \\ & + \iint \frac{\sigma_m}{4\mu_0\mu_r\pi|r_-|^3} \mathbf{r}_- ds_-. \end{aligned} \quad (8)$$

由于 Terfenol-D 沿 x 方向(长度方向)取向, x 方向为 Terfenol-D 主伸缩方向, y 方向和 z 方向磁场使其产生的伸缩量较小, 可忽略不计^[7], 故只求 \mathbf{H} 在 x 轴上的分量 H_x .

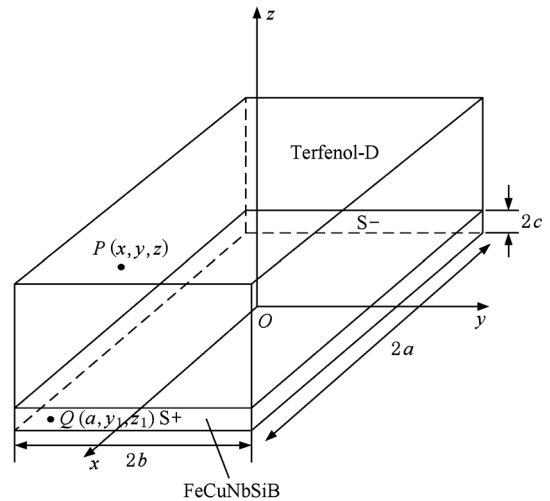


图 2 FeCuNbSiB/Terfenol-D 层合材料模型

式得

$$H_{\text{eff}} = \frac{H_{\text{dc}} + H_{\text{ac}} + H_f}{1 + \chi N_d} \approx \frac{H_{\text{dc}} + H_f}{1 + \chi N_d}. \quad (12)$$

从(12)式可以看出, Terfenol-D 的内部有效磁场强度与外加偏置磁场 H_{dc} 、交变激励磁场 H_{ac} ,

FeCuNbSiB 产生的附加磁场 H_f 以及退磁因子有关. 而根据(6)–(11)式可知, 附加磁场 H_f 的大小受 FeCuNbSiB 尺寸的影响. 不同尺寸的 FeCuNbSiB 将产生不同大小的附加磁场, 导致 Terfenol-D 感应到的有效磁场强度的变化从而影响整个层合物的磁

电电压系数. 因此, 在 Terfenol-D 几何尺寸一定的情况下, 可以通过改变 FeCuNbSiB 的几何尺寸优化层合结构的磁电响应. 此外, 由于 $\sigma_m = \mu_0 \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} = \mu_0(1 - \mu_{rf}) \mathbf{H} \cdot \mathbf{n}$ 且 FeCuNbSiB 的相对磁导率 $\mu_{rf} \gg 1$, 代入(9)和(10)式得

$$H_{x+} \approx -\frac{H}{4\pi} \frac{\mu_{rf}}{\mu_r} \int_{-b}^b \int_{-c}^c \frac{(x-a)}{[(x-a)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{3/2}} dy_1 dz_1, \quad (13)$$

$$H_{x-} \approx -\frac{H}{4\pi} \frac{\mu_{rf}}{\mu_r} \int_{-b}^b \int_{-c}^c \frac{(x+a)}{[(x+a)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{3/2}} dy_1 dz_1. \quad (14)$$

由(13)和(14)式可知, 附加磁场 H_f 的大小和 FeCuNbSiB 与 Terfenol-D 相对磁导率之比 μ_{rf}/μ_r 有关. 由于 $\mu_{rf} \gg \mu_r$, 将产生一个较高的附加磁场 H_f , 从而导致有效磁场强度的变化.

2.3. 高磁导率材料对 Terfenol-D 磁机特性的影响

磁致伸缩/压电/高磁导率材料放入磁场后, 由于高磁导率材料 FeCuNbSiB 具有高的磁致伸缩性能^[9], 在低的磁场作用下发生机械应变, 此机械运动通过粘结层传递到超磁致伸缩材料 Terfenol-D, 对 Terfenol-D 产生一个应力. 假定忽略磁场的变化和耦合面的影响, FeCuNbSiB 对 Terfenol-D 产生的应力 T 可以表示为

$$T = \frac{-E_m E_f t_f \Delta \varepsilon_0}{(1-\nu)(E_m t_m + E_f t_f)}, \quad (15)$$

其中, $\nu = 0.34$ 为泊松比, E 为杨氏模量, t 为厚度, $\Delta \varepsilon_0$ 为 FeCuNbSiB 的伸缩应变系数, 下标 m 和 f 分别代表 Terfenol-D 和 FeCuNbSiB. 当 $t_m = 1 \text{ mm}$ 和 $t_f = 30 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 利用附录中的参数, 得到应力的幅值为 $3.44 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

采用文献[28]提出的磁致伸缩材料的非线性本构关系, 得到 Terfenol-D 在长度方向上的一维本构关系为

$$\varepsilon = \frac{T}{E_s} + \lambda_0(T) + \frac{\lambda_s - \lambda_0(T)}{M_s^2} M^2, \quad (16)$$

$$H_{\text{app}} = \frac{1}{\xi} f^{-1}\left(\frac{M}{M_s}\right) - \frac{2[\lambda_s T - \Lambda_0(T)]}{\mu_0 M_s^2} M, \quad (17)$$

其中

$$\frac{\lambda_0(T)}{\lambda_s} = \begin{cases} \tanh\left(\frac{T}{T_s}\right) & (T \geq 0), \\ \tanh\left(\frac{2T}{T_s}\right)/2 & (T < 0), \end{cases}$$

$$\frac{\Lambda_0(T)}{\lambda_s T_s} = \begin{cases} \ln\left(\cosh\left(\frac{T}{T_s}\right)\right) & (T \geq 0), \\ \text{Incosh}\left(\frac{2T}{T_s}\right)/4 & (T < 0), \end{cases}$$

$$T_s = \lambda_s / (1/E_0 - 1/E_s),$$

$$f(x) = \coth(x) - 1/x.$$

这里 $\xi = 3\chi_m/M_s$, ε 为应变, M_s 为饱和磁化强度, M 为磁化强度, λ_s 为饱和磁致伸缩应变系数, χ_m 为初始磁化系数, E_0 为初始杨氏弹性模量, E_s 为饱和杨氏弹性模量, T_s 为饱和应力, H_{app} 为外加磁场, 考虑到 Terfenol-D 的退磁场和 FeCuNbSiB 产生的附加磁场的影响, 可用有效磁场 H_{eff} 来代替外加磁场 H_{app} .

根据磁致伸缩系数的定义, Terfenol-D 的磁致伸缩系数为

$$d_{33,m} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial H_{\text{eff}}}. \quad (18)$$

同理, 可得到磁导率的表达式

$$\mu_r = \frac{\partial M}{\partial H_{\text{eff}}} + 1. \quad (19)$$

由(16)式对磁化强度 M 求偏导得

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial M} = \begin{cases} 2M \frac{\lambda_s \left(1 - \tanh\left(\frac{T}{T_s}\right)\right)}{M_s^2} & (T \geq 0), \\ 2M \frac{\lambda_s \left(1 - \tanh\left(\frac{2T}{T_s}\right)/2\right)}{M_s^2} & (T < 0). \end{cases} \quad (20)$$

将(19)和(20)式代入(18)式, 可得

$$d_{33,m} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial H_{\text{eff}}} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial H_{\text{eff}}}$$

$$= \begin{cases} 2(\mu_r - 1) \frac{\lambda_s \left(1 - \tanh\left(\frac{T}{T_s}\right)\right)}{M_s^2} M & (T \geq 0), \\ 2(\mu_r - 1) \frac{\lambda_s \left(1 - \tanh\left(\frac{2T}{T_s}\right)/2\right)}{M_s^2} M & (T < 0). \end{cases} \quad (21)$$

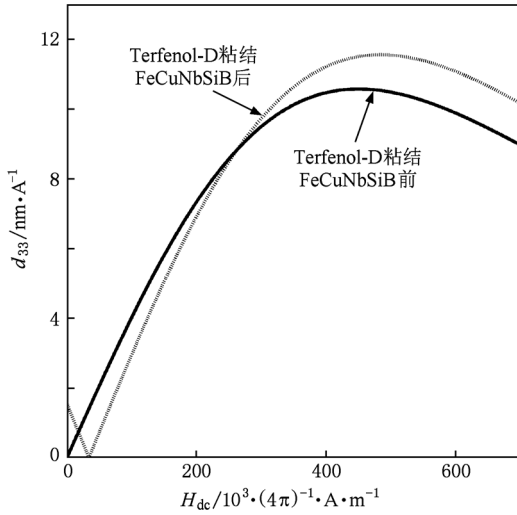


图3 计算得到的磁致伸缩系数与偏置磁场的关系

联立(12), (15)–(17)和(21)式求解, 可得到磁致伸缩系数与偏置磁场强度的关系如图3所示. 从图3可以看到, 随着偏置磁场的增大, Terfenol-D 粘结 FeCuNbSiB 后的 $d_{33,m}$ 先逐渐减小到零, 然后逐渐增大到一个最大值, 最后再逐渐减小. 而随着偏置磁场的增大, Terfenol-D 粘结 FeCuNbSiB 前的 $d_{33,m}$ 先逐渐增大后逐渐减小. 二者之间变化趋势的不同主要是受附加磁场 H_f 的影响. 由于附加磁场 H_f 的方向与外加磁场方向相反, 根据(12)和(18)式可知, 当外加偏置磁场 H_{dc} 较小且 $H_f > H_{dc}$ 时, $H_{eff} < 0$, 然而超磁致伸缩材料 Terfenol-D 在正反向磁场中都会伸长, 因此 H_{eff} 为反向磁场时, Terfenol-D 同样会伸长, 即 $d_{33,m} > 0$. 随着 H_{dc} 磁场的继续增加, H_{eff} 逐渐减小, 相应的 Terfenol-D 的磁致伸缩系数 $d_{33,m}$ 逐渐减小. 当 H_{dc} 增加到 $H_f = H_{dc}$ 时, $H_{eff} = 0$ (Terfenol-D 的内部有效磁场等于零), Terfenol-D 的磁致伸缩系数 $d_{33,m}$ 也趋于零. 之后 H_{dc} 磁场继续增加, $H_f < H_{dc}$, H_{eff} 此时为正向磁场且随 H_{dc} 的增加而增加, 同时随 H_{eff} 的增加磁致伸缩系数 $d_{33,m}$ 先增加到一个最大值, 之后逐渐降低. 此外, 从图3还可观察到, 当偏置磁场接近 $3.597 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 粘结

FeCuNbSiB 前后的 Terfenol-D 磁致伸缩系数均接近饱和, 其中粘结 FeCuNbSiB 后的磁致伸缩系数为 11.624 nm/A , 粘结 FeCuNbSiB 前为 10.635 nm/A . 可见粘结 FeCuNbSiB 后使磁致伸缩材料的饱和磁致伸缩系数提高约 9.29%, 并且饱和磁致伸缩系数所对应的最优偏置磁场发生了偏移. 这是由于磁致伸缩材料 Terfenol-D 的饱和磁致伸缩应变会随外加应力的增大而增大, 粘结 FeCuNbSiB 后对 Terfenol-D 产生应力, 从而增大了饱和磁致伸缩系数.

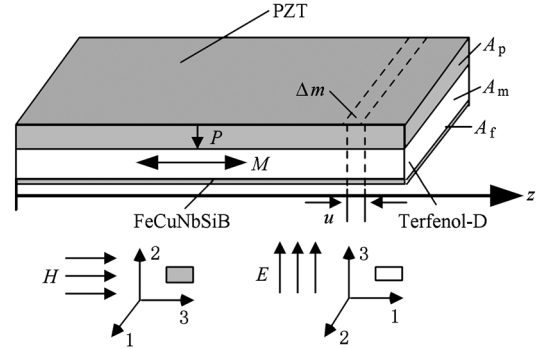


图4 层合结构的坐标示意图

2.4. 高磁导率材料对低频磁电特性的影响

假设理想粘结条件下, Terfenol-D/PZT/FeCuNbSiB (MPF) 层合结构沿 z 方向的小块质量单元 Δm 上的磁致伸缩层、压电层与 FeCuNbSiB 层沿 z 方向保持一致的位移 u 、相等的应变 ε , 有

$$u_p = u_m = u_f = u,$$

或者

$$\varepsilon_p = \varepsilon_m = \varepsilon_f = \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (22)$$

根据牛顿定律可以写出动力学方程

$$\begin{aligned} & (A_p \rho_p + A_f \rho_f + A_m \rho_m) \Delta z \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ & = \frac{\partial (A_m T_m + A_p T_p + A_f T_f)}{\partial z} \Delta z, \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $T_f = E_f \varepsilon_f$, T_f 是 FeCuNbSiB 沿 z 方向的应力, ε_f 是 FeCuNbSiB 沿 z 方向的应变; E_f 是 FeCuNbSiB 的杨氏模量, ρ_p , ρ_m 和 ρ_f 分别是压电材料、磁致伸缩材料和 FeCuNbSiB 的密度, T_m 和 T_p 分别是磁致伸缩层和压电层的应力, A_f 是 FeCuNbSiB 层横截面积, A_m 是磁致伸缩层横截面积, A_p 是压电层横截面积, A 是总横截面积, 则有 $A = A_f + A_p + A_m$.

采用等效电路法^[20]分析图4所示层合结构磁

电材料,可以得到 MPF 层合结构自由振动时的等效电路,如图 5 所示.

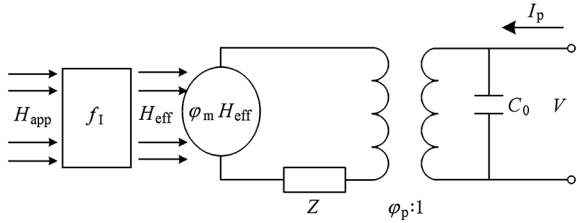


图 5 MPF 层合结构的等效电路

应用阻抗转换方法和欧姆定理从图 5,可以得到下式:

$$\left| \frac{\varphi_p V}{\varphi_m H_{\text{eff}}} \right| = \left| \frac{\varphi_p^2}{j\omega C_0 Z + \varphi_p^2} \right|. \quad (24)$$

这里 $\varphi_m = \frac{A_m d_{33,m}^H}{s_{33}^H}$ 磁机耦合因子, $\varphi_p = \frac{w d_{31,p}^E}{s_{11}^E}$ 机电耦合因子,其中 w 是压电材料的宽度, $d_{33,m}^H$ 和 $d_{31,p}^E$ 分别是磁致伸缩系数和压电系数, s_{33}^H 和 s_{11}^E 分别是

磁致伸缩材料和压电材料的柔顺系数; $Z = -\frac{1}{2}j\rho v \text{Atan} \frac{kl}{2}$ 是机械端等效阻抗, $C_0 = \frac{l w \bar{\epsilon}_{33}}{t_p}$, 其中 t_p 是压电材料的厚度, $\bar{\epsilon}_{33} = \epsilon_{33}^T (1 - k_{31,p}^2)$, $k^2 = \frac{\omega^2}{v^2}$, $v^2 = \left(\frac{n_m}{s_{33}^H} + \frac{n_p}{s_{11}^E} + n_f E_f \right) / \bar{\rho}$ 是层合结构中的平均声速, $n_m = \frac{A_m}{A}$, $n_p = \frac{A_p}{A}$, $n_f = \frac{A_f}{A}$ 分别是磁致伸缩材料、压电材料和 FeCuNbSiB 的横截面积占总截面积 A 的比例, $\bar{\rho} = n_m \rho_m + n_p \rho_p + n_f \rho_f$ 是层合结构中的平均密度, ϵ_{33}^T 和 $k_{31,p}$ 分别是压电材料的介电常数和机电耦合系数,图 5 中 f_i 是 FeCuNbSiB 和退磁场的影响因子. 根据(12)式,可得到

$$H_{\text{eff}} = \frac{H_{\text{app}} + H_f}{1 + \chi N_d}. \quad (25)$$

联立(24)和(25)式,可得到在低频下 MPF 层合结构的磁电电压转换系数

$$\alpha_{\text{low}} = \left| \frac{dV}{dH_{\text{app}}} \right| = \frac{d_{31,p} d_{33,m} n_m n_p t_c \cdot \delta}{\epsilon_{33}^T [(1 - k_{31}^2) n_m s_{11}^E + n_p s_{33}^H + n_f E_f (1 - k_{31}^2) s_{11}^E s_{33}^H]}, \quad (26)$$

其中, $\delta = \frac{1}{1 + \chi N_d}$ 与退磁场有关. 考虑到 $k_{31}^2 \ll 1$, (26)式可以简化为

$$\alpha_{\text{low}} \approx \frac{d_{31,p} d_{33,m} n_m n_p t_c \cdot \delta}{\epsilon_{33}^T (n_m s_{11}^E + n_p s_{33}^H + n_f E_f s_{11}^E s_{33}^H)}. \quad (27)$$

将(21)式代入后, (27)式可重新写为

$$\alpha_{\text{low}} \approx 2M(\mu_r - 1) \frac{\lambda_s \left(1 - \tanh\left(\frac{2T}{T_s}\right)/2 \right)}{M_s^2} \frac{d_{31,p} n_m n_p t_c \cdot \delta}{\epsilon_{33}^T (n_m s_{11}^E + n_p s_{33}^H + n_f E_f s_{11}^E s_{33}^H)}. \quad (28)$$

利用(28)式可很好解释 FeCuNbSiB 对低频磁电电压系数的影响. 在外加磁场作用下, FeCuNbSiB 发生形变对 Terfenol-D 产生应力, 进一步影响 Terfenol-D 的磁致伸缩系数, 由于磁致伸缩系数与低频磁电电压系数成正比, 最终导致了低频磁电电压系数的变化.

联立(15), (17), (19)和(28)式可得到低频磁电电压系数与偏置磁场的关系, 如图 6 所示. 随着偏置磁场的增加, MPF 的低频磁电电压系数先减小后增加, 在偏置磁场约为 $3.597 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 低频磁电电压系数达到极大值 139.6 mV/Oe ($1 \text{ mV/Oe} = 4\pi \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$), 随偏置磁场 H_{dc} 的进一步增加, 低频磁电电压系数开始逐渐减小, 并且 MPF 复

合结构的最大磁电电压系数相对于 MP 结构提高了近 9%. 此外, 对比图 3 和图 6 可以发现, MPF 磁电电压系数和磁致伸缩系数随磁场的变化趋势是一致的. 这一结果进一步验证上述的预测; FeCuNbSiB 通过影响磁致伸缩系数, 从而改变低频磁电电压系数.

3. 实验结果及讨论

制作了 MPF 和 MP 实验样片, PZT8-H 的尺寸为 $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, Terfenol-D 的尺寸为 $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, FeCuNbSiB 的厚度分别为 30, 60, 90, 120, 150, 180 μm , 长宽分别为 12 和 6 mm.

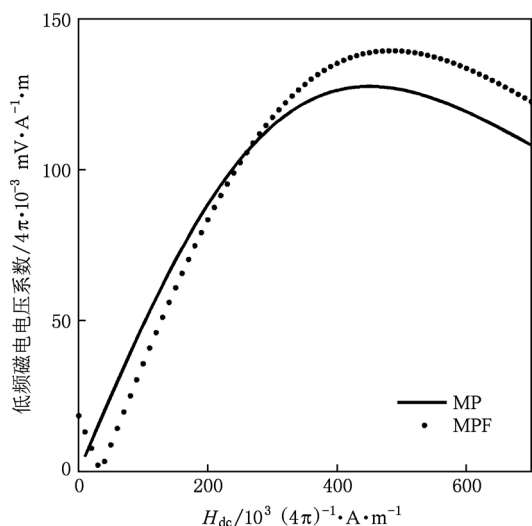


图6 计算得到的低频磁电电压系数与偏置磁场的关系

在制备复合材料时,先用有机溶剂将实验样片清洗干净,用环氧树脂胶剂按图1(a)所示粘接后置于烤箱中,在80℃条件下烘烤1h,取出冷却后得到磁电复合材料.用一对环形超强磁铁钕铁硼来施加直流偏置磁场,调整两环形磁铁距离改变偏置磁场的大小,偏置磁场由高斯计测量.长直螺线管用于产生交变激励磁场,其大小为峰峰值1Oe.实验样片放置于螺线管中心,交流磁场和直流偏置磁场沿着Terfenol-D长度方向相互平行.通过改变偏置磁场大小,从而得到不同偏置磁场下材料的磁致伸缩系数和低频磁电电压转换系数.附录为本文所使用的Terfenol-D、FeCuNbSiB和PZT-8H的参数.

采用多普勒测振仪测得 Terfenol-D 端面处的振

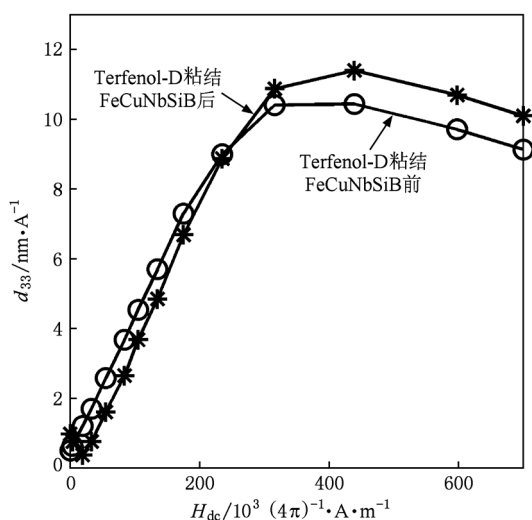


图7 实验得到的磁致伸缩系数与偏置磁场的关系

动位移 u_1 , 利用公式 $d_{33,m} = \frac{2u_1}{lH_{ac}}$ (其中 l 是 Terfenol-D 的长度) 求出在不同的偏置磁场下 Terfenol-D 的磁致伸缩系数如图7所示.对比图7和图3可以发现,理论和实验得到的磁致伸缩系数随偏置磁场变化具有相同趋势,且理论与实验得到的饱和磁致伸缩系数以及所对应的最优偏置磁场比较接近.在最优偏置磁场为439 Oe时, Terfenol-D 的实验磁致伸缩系数达到饱和(11.356 nm/A),在最优偏置磁场为452 Oe时,理论磁致伸缩系数达到饱和(11.624 nm/A),但是饱和磁致伸缩系数的理论值比实验数据偏大,这是因为没有考虑粘结层的影响.

图8所示为在不同偏置磁场下的低频磁电电压系数的实验数据.对比图6和图8可以发现,磁电电压系数的理论值与实验值随偏置磁场的变化具有相同的趋势,但理论值是实验值的5—7倍左右(随偏置磁场不同而有所不同).究其原因,是理论推导时忽略了沿长度方向的磁致伸缩对其宽度和厚度方向的影响,以及推导时没有考虑粘结层的损耗、泊松效应、引线焊点和实验环境等各种损耗,从而造成理论值偏大.此外,从图8可观察到,MPF层合结构的最大磁电电压系数为18.99 mV/Oe,与MP层合结构(其中磁致伸缩层尺寸为12 mm × 6 mm × 1 mm,压电层尺寸为12 mm × 6 mm × 0.8 mm)相比,该层合结构的最大磁电电压系数约是MP层合结构中的最大磁电电压系数的1.3倍,而MP层合结构中的最大磁电电压系数仅为14.08 mV/Oe.这是由于FeCuNbSiB对Terfenol-D产生的应力,使得Terfenol-D饱和磁致伸缩系数的增加,进一步导

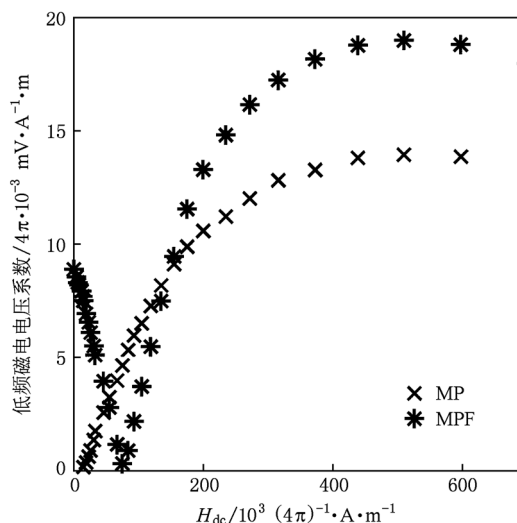


图8 实验得到的低频磁电电压系数与偏置磁场的关系

致了层合结构的最大磁电电压系数增加。

考虑到 FeCuNbSiB 对磁致伸缩系数和低频磁电电压系数的影响,在给定 PZT-8H 与 Terfenol-D 厚度分别为 0.8 和 1 mm 时,通过实验测得 FeCuNbSiB 厚度对低频磁电电压系数的影响如图 9 所示. FeCuNbSiB 的厚度从 30 μm 增加到 180 μm ,MPF 层合结构最大磁电电压系数从 18.99 mV/Oe 增加到 34.12 mV/Oe,随 FeCuNbSiB 的厚度的增加复合结构的最大磁电电压系数近似呈线性增长.这主要是由于 FeCuNbSiB 厚度增加引起应力的增强(见 15 (式)),导致了饱和磁致伸缩系数和最大磁电电压系数的增加.与 MP 层合结构相比,MPF($t_f = 180 \mu\text{m}$)的最大磁电电压系数提高了 2.4 倍.该实验结果有助于我们更合理地设计磁电复合材料的结构,

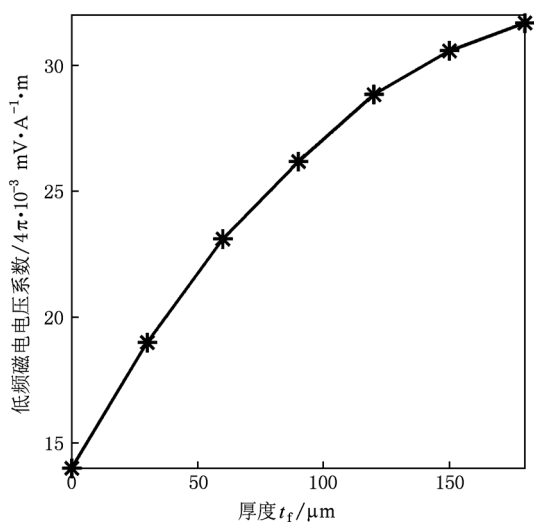


图 9 实验得到的低频磁电电压系数与 FeCuNbSiB 厚度的关系

通过在 MP 层合结构中加入 FeCuNbSiB 增强了磁电电压系数,以满足实际应用中不同器件对磁电性能的要求。

4. 结 论

本文提出了一种新型的层合结构 MPF,并利用等效磁荷理论,分析了层合结构中 Terfenol-D 内部的有效磁场,在此基础上结合磁致伸缩材料 Terfenol-D 的非线性本构关系和层合材料的等效电路,分析了该层合结构的磁电特性,讨论了 FeCuNbSiB 的厚度对磁致伸缩/压电/高磁导率材料低频磁电电压转换系数的影响,并与实际结构的磁电响应进行了比较.研究表明:理论结果与实验结果相符合.磁致伸缩材料粘结 FeCuNbSiB 后的饱和磁致伸缩系数比粘结 FeCuNbSiB 前提高了约 9%,且 MPF(FeCuNbSiB 厚度为 30 μm)层合结构的低频最大磁电电压系数是 MP 的 1.3 倍. FeCuNbSiB 厚度在 180 μm 以内,随 FeCuNbSiB 厚度的增加,层合结构的低频最大磁电电压系数近似呈线性增长。

附录 本文中用到的材料参数

Terfenol-D 的参数: $E_0 = 2 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $E_s = 6 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $s_{33,m} = 40 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $\chi_m = 20$, $\lambda_s = 0.001$, $\mu_0 M_s = 1.6 \text{ T}$, $\rho_m = 9200 \text{ kg/m}^3$.

PZT-8H 的参数: $d_{31,p} = 93 \text{ pC/N}$, $s_{33,p} = 11.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $\rho_p = 7600 \text{ kg/m}^3$, $\varepsilon_r = 1000$.

FeCuNbSiB 的参数: $E_f = 10 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\rho_f = 7250 \text{ kg/m}^3$.

- [1] Landau L D, Lifshitz E 1960 *Electrodynamics of Continuous Media* (Oxford: Pergamon Press) p119
- [2] Folen V J, Rado G T, Stalder E W 1961 *Phys. Rev. Lett.* **6** 607
- [3] Rado G T, Folen V J 1961 *Phys. Rev. Lett.* **7** 310
- [4] Ryu J, Carazo A V, Uchino K, Kim H 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 4948
- [5] Srinivasan G, Rasmussen E T, Hayes R 2003 *Phys. Rev. B* **67** 14418
- [6] Srinivasan G, Rasmussen E T, Bush A A, Kametsev K E, Meshcheryakov V F, Fetisov Y K 2004 *Appl. Phys. A* **78** 721
- [7] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contrl.* **51** 793
- [8] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5305
- [9] Giang D T H, Quynh L K, Dung N V, Nghi N H 2009 *J. Phys. : Conf. Ser.* **187** 012057
- [10] Dong S X, Li J F, Viehland D 2006 *J. Mater. Sci.* **41** 97
- [11] 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]
- [12] Li P, Wen Y M, Bian L X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 022503
- [13] Yang W W, Wen Y M, Li P, Bian L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4545 (in Chinese) [杨伟伟、文玉梅、李平、卞雷祥 2008 物理学报 **57** 4545]
- [14] Zhang Y F, Wen Y M, Li P, Bian L X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 546 (in Chinese) [张延芳、文玉梅、李平、卞雷祥 2009 物理学报 **58** 546]

- [15] 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]
- [16] Or S W, Nersessian N, Carman G P 2004 *IEEE Trans. Magn.* **40** 71
- [17] Dong S X, Zhai J Y, Li J F, Viehland D 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 124108
- [18] Wan Y P, Fang D N 2003 *Acta Mech. Sin.* **19** 324
- [19] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2625
- [20] Dong S X, Li J F, Viehland D 2003 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* **50** 1253
- [21] Ryu J, Priya S, Carazo A V, Uchino K 2001 *J. Am. Ceram. Soc.* **84** 2905
- [22] Wan J G, Liu J M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9916
- [23] Chang C M, Carman G P 2007 *Phys. Rev. B* **76** 134116
- [24] Aharoni A 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 3432
- [25] Liang C B, Qing G 1980 *Electromagnetics* (Beijing: Higher Education Press) p464 (in Chinese) [梁灿彬、秦光 1980 电磁学(北京:高等教育出版社)第464页]
- [26] Van Roy W, De Boeck J, Borghs G 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 3056
- [27] Yi J Z 1987 *Magnetic Field Calculation and Magnetic Circuit Design* (Chengdu: Chengdu Electronic Information Engineering College Press) p16 (in Chinese) [易敬曾 1987 磁场计算与磁路设计(成都:成都电讯工程学院出版社)第16页]
- [28] Zheng X J, Liu X E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 053901

Effect of High-permeability FeCuNbSiB on magnetolectric property of magnetostrictive/piezoelectric composite*

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

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(Received 30 August 2010; revised manuscript received 16 September 2010)

Abstract

A brand-new magnetostrictive/piezoelectric laminated composite is presented using the giant magnetostrictive Terfenol-D, piezoelectric PZT and high-permeability FeCuNbSiB. Since the high-permeability FeCuNbSiB changes the effective magnetic field in the Terfenol-D and the deformed FeCuNbSiB applies a stress to the Terfenol-D in an external magnetic field, thus the saturation magnetostrictive coefficient of Terfenol-D is enhanced, resulting in a higher magnetolectric voltage output for the composite. Based on the equivalent magnetic charge theory, the effect of the FeCuNbSiB on the effective magnetic field in the Terfenol-D is analyzed, and the magnetostrictive coefficient of Terfenol-D and the theoretical formula of low-frequency magnetolectric voltage coefficient are derived based on the nonlinear constitutive model of magnetostrictive material and the equivalent circuit method. The analytical results accord with the experiments qualitatively, and the magnetolectric voltage of the composite is 1.3 times as high as that of the Terfenol-D/PZT-8H (MP) composite. The experimental results indicate that the thickness of FeCuNbSiB has a great influence on magnetolectric property. The magnetolectric voltage coefficient increases nearly linearly with the increase of the thickness of FeCuNbSiB until 180 μm .

Keywords: magnetolectric effect, magnetostrictive material, piezoelectric material, high-permeability material

PACS: 75.85.+t, 75.70.Cn, 75.50.Kj

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50830202, 60774055, 10776039).

[†] Corresponding author. E-mail: liping@cqu.edu.cn