

厚度剪切模式铌酸锂基复合材料的磁电性能优化

辛成舟 马健男 马静 南策文

Optimization of magnetoelectricity in thickness shear mode LiNbO₃/magnetostrictive laminated composite

Xin Cheng-Zhou Ma Jian-Nan Ma Jing Nan Ce-Wen

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), **66**, 067502 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.067502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.067502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁铁/压电双晶片复合材料磁电耦合性能的优化设计

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

物理学报.2016, 65(16): 167501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.167501>

Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金磁畴偏转的滞回特性研究

Study on hysteresis characteristics of magnetic domain rotation in Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ alloy

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

Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金的本构参数辨识方法研究

Method of identifying constitutive parameter in Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ Alloy

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

压电材料全矩阵材料常数超声谐振谱反演技术中的变温模式识别

Mode identification via temperature variation in resonant ultrasonic spectroscopy technique for piezoelectric material

物理学报.2017, 66(2): 027703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.027703>

基于介质与铁氧体的通阻捷变磁可调频率选择表面设计研究

Design and research of magnetic tunable frequency selective surface based on dielectric and ferrite

物理学报.2016, 65(19): 197701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.197701>

厚度剪切模式铌酸锂基复合材料的磁电性能优化*

辛成舟 马健男 马静† 南策文

(清华大学材料学院, 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

(2016年11月8日收到; 2016年12月21日收到修改稿)

通过弹性力学方法计算了基于厚度剪切模式的铌酸锂(LiNbO_3)基磁电复合材料磁电系数与铌酸锂晶体切型、磁致伸缩材料种类、材料尺寸的关系, 并讨论了两种不同复合结构边界条件对剪切磁电性能的影响. 计算结果表明: (xzt) 30° 切型铌酸锂单晶具有最大剪切压电系数 d_{p15} , 制作成的复合材料具有最大剪切磁电系数 α_{E15} ; 通过两相尺寸优化, 伸缩-剪切模式Terfenol-D/ LiNbO_3 复合材料最大剪切磁电系数为 $24.13 \text{ V}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$, 剪切-剪切模式Metglas/ LiNbO_3 复合材料最大剪切磁电系数为 $11.46 \text{ V}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$. 实验结果与理论计算规律相符, 研究结果为剪切磁电复合结构的设计、剪切模式铌酸锂切型的选择优化提供了指导, 有望利用高机械品质因数 Q_m 值的铌酸锂单晶设计高频谐振磁场探测器.

关键词: 厚度剪切模式, 铌酸锂, 磁电复合结构

PACS: 75.80.+q, 75.85.+t, 77.84.-s, 77.84.Lf

DOI: 10.7498/aps.66.067502

1 引言

磁电耦合效应是指施加磁场诱发电极化, 或者电场调控磁性能. 磁致伸缩和压电材料通过应力应变耦合, 能够实现比单相材料更大的磁电响应^[1-5]. 近年来, 通过材料和振动模式选择、复合结构设计, 复合材料的磁电系数获得了进一步提高^[6-13]. 在压电材料方面, 锆钛酸铅陶瓷、铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)单晶成为常用材料, 然而它们的居里温度较低, 并且含铅, 不利于高温使用 and 环境保护. 无铅的铌酸锂 LiNbO_3 单晶^[14]由于具有 1210°C 的居里温度、高达 10^4 — 10^5 的机械品质因数 Q_m 、大的压电系数和小的介电常数, 逐渐成为设计磁电复合材料的一种新的选择, 并且铌酸锂具有四个独立的压电系数分量 d_{p31} , d_{p33} , d_{p15} , d_{p22} , 同时具有伸缩和剪切两种振动模式, 通过晶体切型变化, 还可以获得不同的压电系数, 尤其是较大的剪切压电系数, 为磁电器件的各向异性设计带来便利. Wang和Jiang^[15]计算了不同切型铌酸锂的伸缩压电性能, Kuo等^[16]通过切型变化优化了铌酸

锂/磁致伸缩双层复合材料的伸缩模式磁电系数, 使铌酸锂基磁电复合材料的制备成为可能. 在磁致伸缩材料方面, 先前的研究主要关注巨磁致伸缩材料Terfenol-D^[17-19], 然而, Terfenol-D在实际应用中需要大的直流偏置磁场, 并且价格较高, 不利于制作小型化和低成本的磁传感器件, 其替代品铁基非晶合金Metglas更为便宜, 需要的直流偏置场低且具有更大的压磁系数, 在磁电器件的小型化和低成本化方面展现出更广泛的应用前景. 在振动模式方面, 厚度剪切模式^[20-24]具有更高的谐振频率, 制成的磁电复合材料在高频磁场探测方面有潜在的应用前景, 成为近年来的研究热点. 然而, 剪切模式复合结构设计需要的边界条件要求较苛刻, 复合结构设计差异、铌酸锂切型变化、材料种类和尺寸对于剪切磁电系数的影响目前尚不清楚, 深入系统地研究剪切磁电系数的影响因素, 对于实现大的剪切磁电系数 α_{E15} , 进而将高 Q_m 值铌酸锂用于高频磁场探测具有重要意义.

本文利用弹性力学方法探究了伸缩-剪切和剪切-剪切两种模式铌酸锂基复合材料磁电系数的影

* 国家自然科学基金(批准号: 51402164)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ma-jing@mail.tsinghua.edu.cn

响因素,优化了剪切模式铌酸锂切型和材料尺寸,研究了 Terfenol-D 和 Metglas 两种磁致伸缩相对磁电系数的影响差异,并设计了一种可以输出均匀纯净剪切磁电信号的伸缩-剪切复合结构.结果表明,在优化的铌酸锂切型和材料尺寸时获得了大的剪切磁电系数输出,刚性边界条件有利于实现复合结构的剪切振动,并通过实验初步验证了理论计算给出的规律.

2 模型计算

图 1(a) 为伸缩-剪切磁电复合结构示意图^[21],压电相在受到剪切应力的同时会发生伸缩变形,如图 1(b) 所示.当单独研究复合结构一侧与磁致伸缩相黏接的压电相时,其下表面的变形被边界条件抑制,而上表面在与其黏接的磁致伸缩相作用下产生了向两边的伸缩变形,从而使这一侧压电相整体发生了上下表面不均匀的梯形形变,类似于受到两边对称的单面剪切应力,但其产生的对称剪切信号会相互抵消,实际上受到的是单面纯伸缩变形,引发了厚度的变化,输出了长度伸缩磁电信号.显然,是中间未黏接部分磁致伸缩相在磁场作用下的形变才使两侧压电相的上表面均受到单方向的剪切力.因此,伸缩-剪切结构输出的磁电信号为伸缩和剪切信号的叠加,因其在剪切形变同时发生的单面伸缩变形仍能带来大的磁电信号,并且这两种信号无法在同一结构中分离开,只能另外制作仅有一边

的单面伸缩结构才能单独测量其长度伸缩磁电信号,且两个结构制作过程中的偶然差异会给测量、计算复合结构的真实纯剪切信号带来误差.图 1(c) 为在图 1(a) 基础上提出的新的剪切结构设计,可以利用伸缩-剪切复合结构输出纯净的剪切磁电信号,不会发生伸缩变形,其中的刚性层应为理想状态下弹性模量极高的材料,其自身不会发生变形,又能有效传递磁致伸缩相带来的剪切应力和应变,可使压电相产生均匀的平行四边形形变,如图 1(d) 所示.

上述结构中,剪切模式压电相和伸缩模式的磁致伸缩相材料满足下列等式:

$$S_{p5} = s_{55}^E T_{p5} + d_{p15} E_1, \quad (1)$$

$$D_{p1} = d_{p15} T_{p5} + \epsilon_{11}^T E_1, \quad (2)$$

$$S_{m3} = s_{33}^H T_{m3} + d_{m33} H_3, \quad (3)$$

$$B_{m3} = d_{m33} T_{m3} + \mu_{33}^T H_3, \quad (4)$$

其中 d_{p15} 和 d_{m33} 分别是剪切压电系数和伸缩压磁系数; s_{55}^E 和 s_{33}^H 分别是处在电场和磁场中的弹性柔顺系数, ϵ_{11}^T 为介电常数, μ_{33}^T 是磁导率. 等式中的 p 和 m 分别代表压电相和磁致伸缩相, T, S, E, D 分别代表应力、应变、电场和电位移. 当压电相处于短路状态时 $E = 0$, 满足等式:

$$S_{p5} = s_{55}^E T_{p5}, \quad (5)$$

$$D_{p1} = d_{p15} T_{p5} = \frac{S_{p5}}{s_{55}^E} d_{p15}. \quad (6)$$

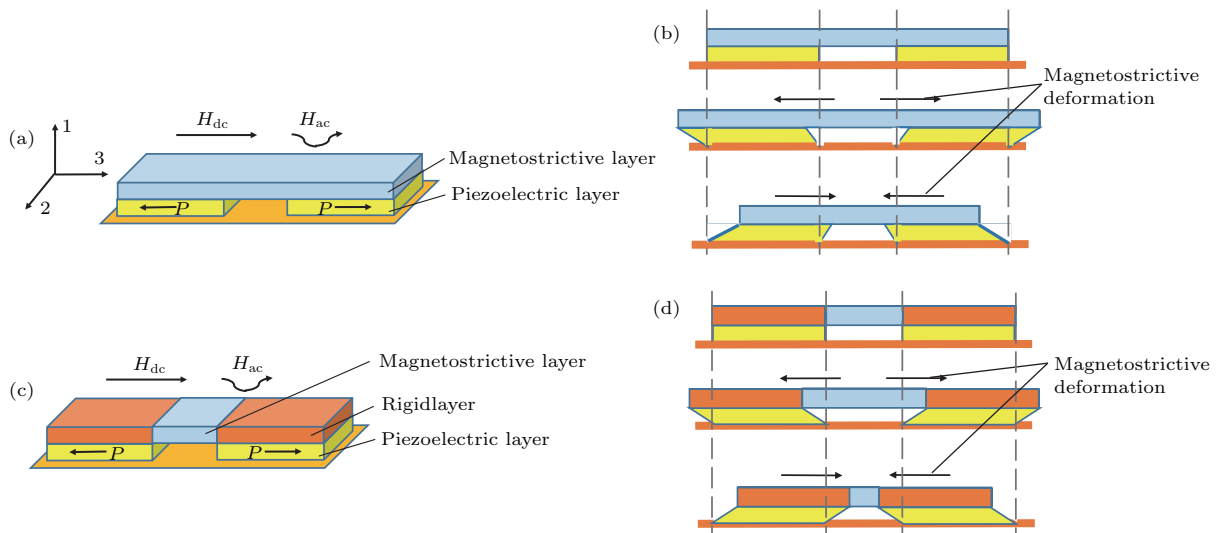


图 1 (网刊彩色) 伸缩-剪切模式磁电复合结构及变形分析 (a) 示意图; (b) 伸缩变形分析; (c) 改进设计图; (d) 改进设计伸缩变形分析

Fig. 1. (color online) Stretch-shear magnetoelastic (ME) composite: (a) Schematic diagram; (b) stretching deformation analysis; (c) optimized design; (d) stretching deformation analysis of the optimized design.

在伸缩-剪切模式复合结构中, 磁致伸缩相的伸缩应力 T_{m3} 被转换为了 T_{m5} , 成为施加在压电相表面上的剪切应力, 如下式所示:

$$T_{m3}A_m = T_{m5}A_p, \quad (7)$$

其中 A_m 和 A_p 分别是磁致伸缩相的横截面积 (图 1(a) 中“3”方向作为其法向量的平面) 和压电相的上表面面积 (图 1(a) 中“1”方向作为其法向量的平面). 由于两相的宽度相同, 则 A_m, A_p 分别和磁致伸缩相厚度、压电相长度相关, 得到

$$T_{m3}t_m = T_{m5}l_p, \quad (8)$$

其中 t_m 和 l_p 分别为磁致伸缩相的厚度和压电相的长度, 磁致伸缩相提供的剪切应力全部变为压电相受到的剪切应力, 从而得到

$$T_{p5} = -T_{m5}. \quad (9)$$

然后有

$$S_{m3} = -s_{33}^H \frac{S_{p5}}{s_{55}^E} \cdot \frac{l_p}{t_m} + d_{m33}H_3. \quad (10)$$

在伸缩-剪切模式磁电复合结构中, 磁致伸缩相的长度方向伸缩应变转换为压电相的厚度方向剪切应变, 因而两相的应变耦合公式如下:

$$S_{m3}l_m = S_{p5}t_p, \quad (11)$$

其中 l_m 和 t_p 分别为提供伸缩应变的磁致伸缩相长度和压电相的厚度, 在该结构中 l_m 为中间部分磁致伸缩相长度的一半. 然后,

$$S_{p5} = \frac{d_{m33}H_3}{\frac{t_p}{l_m} + \frac{s_{33}^H}{s_{55}^E} \cdot \frac{l_p}{t_m}}, \quad (12)$$

$$Q_p = \left(\frac{d_{p15}S_{p5}}{s_{55}^E} \right) A_p = \left(\frac{d_{p15}}{s_{55}^E} \right) \left(\frac{d_{m33}H_3}{\frac{t_p}{l_m} + \frac{s_{33}^H}{s_{55}^E} \cdot \frac{l_p}{t_m}} \right) A_p, \quad (13)$$

$$\frac{V_{out}}{H_3} = \frac{Q_p}{C_f H_3} = \frac{d_{p15}d_{m33}A_p}{C_f s_{44}^E \left(\frac{t_p}{l_m} + \frac{s_{33}^H}{s_{55}^E} \cdot \frac{l_p}{t_m} \right)}, \quad (14)$$

$$C_f = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{11}^T A_p}{t_p}, \quad (15)$$

$$\frac{V_{out}}{H_3} = \frac{Q_p}{C_f H_3}$$

$$= \frac{d_{p15}d_{m33}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{11}^T \left(\frac{s_{55}^E}{l_m} + \frac{s_{33}^H}{t_p} \cdot \frac{l_p}{t_m} \right)}, \quad (16)$$

$$\alpha_{E15} = \frac{V_{out}}{t_p H_3} = \frac{Q_p}{t_p C_f H_3} = \frac{d_{p15}d_{m33}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{11}^T \left(\frac{t_p}{l_m} s_{55}^E + \frac{l_p}{t_m} s_{33}^H \right)}. \quad (17)$$

因此, 在伸缩-剪切模式磁电复合结构中, 磁电耦合系数大小和两相材料的长度、厚度均有关系. 由于 t_p/l_m 的数值比 l_p/t_m 小很多, 则 $t_p/l_m s_{55}^E$ 的变化对剪切磁电耦合系数的影响很小, 因此在铈酸锂基剪切磁电复合材料中, 可以不考虑弹性柔顺系数 s_{55}^E 随切型变化而变化带来的影响, 在材料尺寸固定时满足 $\alpha_{E15} \propto d_{p15}/\varepsilon_{11}^T$; 当用于 (xzt) 系列铈酸锂切型时, 晶体坐标系只是沿其 x 轴方向 (厚度方向) 进行了旋转, 由于铈酸锂晶片坐标系统绕 x 轴旋转后介电常数 ε_{11}^T 的数值是不变的, 因此该系列切型满足 $\alpha_{E15} \propto d_{p15}$, 即剪切磁电耦合系数与剪切压电系数有相同的变化规律.

对于剪切-剪切模式磁电复合结构^[23], 如图 2(a) 所示, 以磁致伸缩相的剪切振动带动压电相的剪切振动, 相应磁电耦合系数计算公式为^[24]

$$\alpha_{E15} = \frac{V_{out}}{t_p H_1} = \frac{Q_p}{t_p C_f H_1} = \frac{d_{p15}d_{m15}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{11}^T \left(s_{44}^E \frac{t_p}{2t_m} + s_{44}^H \right)}. \quad (18)$$

在铈酸锂基磁电复合材料中, $\alpha_{E15} \propto \frac{d_{p15}}{\varepsilon_{11}^T}$ 在剪切-剪切结构的公式中则不能严格成立, 因为 $s_{44}^E \frac{t_p}{2t_m}$ 数值较大, 剪切磁电系数受弹性柔顺系数 s_{44}^E 随切型变化而变化带来的影响则不能忽略. 不难发现, 实现磁电复合结构的剪切-剪切振动需要设计较复杂的边界条件, 如图 2(b) 所示, 边界条件需使复合结构在长度方向上不能产生任何相对位移, 而在厚度方向上又有一定的自由度, 从而满足剪切变形时可能发生的材料厚度变化, 可行的边界条件设计如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 其中使用弹性模量极高的外壳作为边界条件, 需要强调的是, 刚性边界条件应严格限制复合结构在长度方向上的相对位移, 这是该结构能实现剪切-剪切振动的关键.

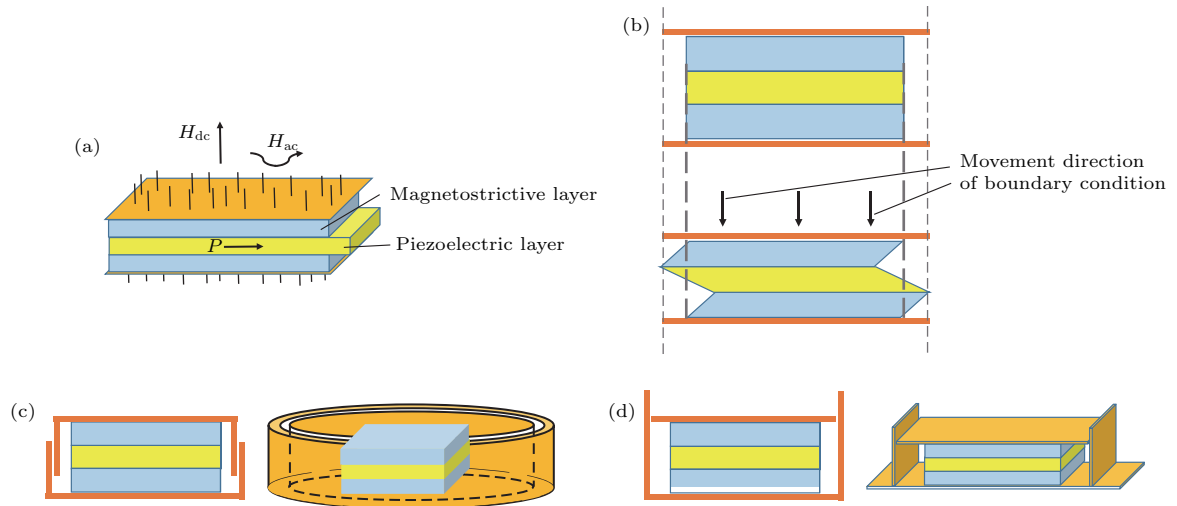


图2 (网刊彩色)剪切-剪切模式磁电复合结构及边界条件设计 (a)示意图; (b)剪切变形分析; (c)边界条件设计1; (d)边界条件设计2

Fig. 2. (color online) Shear-shear ME composite: (a) Schematic diagram; (b) shearing deformation analysis; (c) boundary conditions design 1; (d) boundary conditions design 2.

对于铌酸锂切型变化和压电系数的关系, 本文所用切型转角计算公式来自参考文献[15], 新切型转角的压电应变系数(C/N)张量为 $\mathbf{d}' = \mathbf{A}_z \cdot \mathbf{A}_y \cdot \mathbf{A}_x \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{N}_x^t \cdot \mathbf{N}_y^t \cdot \mathbf{N}_z^t$, 其中 \mathbf{A} 为旋转转角矩阵, \mathbf{N} 为相应的邦德应变变换矩阵, 新切型的介电常数张量为 $\varepsilon_{ij}^{T'} = \mathbf{A} \cdot \varepsilon_{ij}^T \cdot \mathbf{A}^t$. 计算所需的其他材料参数见表1.

表1 铌酸锂、Metglas 和 Terfenol-D 的材料参数 (参数单位: $s, 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$; $d_p, 10^{-12} \text{ C/N}$; $d_m, 10^{-6} \text{ Oe}^{-1}$; $t, 10^{-6} \text{ m}$; $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) [16,25]

Table 1. Material constants of LiNbO₃, Metglas and Terfenol-D (Units: $s, 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$; $d_p, 10^{-12} \text{ C/N}$; $d_m, 10^{-6} \text{ Oe}^{-1}$; $t, 10^{-6} \text{ m}$; $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) [16,25].

性能	铌酸锂	性能	Metglas	性能	Terfenol-D
s_{11}^E	5.55	s_{11}^H	10	s_{11}^H	38.4
s_{33}^E	4.8	s_{33}^H	6	s_{33}^H	45.4
s_{44}^E	20.6	s_{44}^H	15	s_{44}^H	73.5
ε_{11}^T	85	d_{m33}	0.3	d_{m33}	0.7
ε_{33}^T	30	d_{m15}	0.3	d_{m15}	0.634
d_{p31}	0.86	t_m	25		
d_{p33}	6.2	l_m	8×10^3		
d_{p15}	74				
d_{p22}	20.8				
t_p	500				
l_p	6×10^3				

3 结果与讨论

基于图1中的伸缩-剪切磁电复合结构, 首先在正常X切铌酸锂单晶基础上进行切型变化, 对

于伸缩-剪切模式Metglas/LiNbO₃ [($xzlw$) x°/y°], 图3(a)显示当 $x = 30, y = -11.25$ 时, 最大的剪切磁电系数 α_{E15} 为 214.1 mV/(cm·Oe); 对于Metglas/LiNbO₃ [($xzlt$) x°/y°], 图3(b)显示最大 α_{E15} 为 235.1 mV/(cm·Oe), 出现在 $x = 0, y = 30$ 时; 而对于Metglas/LiNbO₃ [($xzwt$) x°/y°], 图3(c)显示最大 α_{E15} 同样为 235.1 mV/(cm·Oe), 此时 $x = 30, y = 0$. 上述计算结果表明 (xzt) 30° 是铌酸锂获得最大剪切磁电系数 α_{E15} 的最优切型, 这是由于 (xzt) 30° 铌酸锂具有最大的剪切压电系数 $d_{p15} = 84.89 \text{ pC/N}$, 计算中 α_{E15} 的数值明显小于伸缩磁电系数 α_{E31} 和 α_{E33} , 原因是该结构使用Metglas的 t_m 和 d_{m33} 数值较小. 当在正常Y切铌酸锂基础上进行切型变化的计算时, 对于伸缩-剪切模式Metglas/LiNbO₃ [($yzlt$) x°/y°], 图4(a)显示当 $x = 30, y = 30$ 时, 最大的剪切磁电系数 α_{E24} 为 235.1 mV/(cm·Oe); 对于Metglas/LiNbO₃ [($yzlw$) x°/y°], 图4(b)显示最大 α_{E24} 为 218.6 mV/(cm·Oe), 出现在 $x = 37.5, y = 11.25$ 时; 而对于Metglas/LiNbO₃ [($yzwt$) x°/y°], 图4(c)显示最大 α_{E24} 为 214.1 mV/(cm·Oe), 此时 $x = -11.25, y = 0$, 上述计算结果表明 ($yzlt$) $30^\circ/30^\circ$ 是铌酸锂获得最大剪切磁电系数 α_{E24} 的最优切型, 且该切型能获得的最大剪切磁电系数与 (xzt) 30° 切型相同, 由于晶体旋转次数与加工难度成正比, 建议使用铌酸锂 (xzt) 30° 切型制作剪切磁电复合材料.

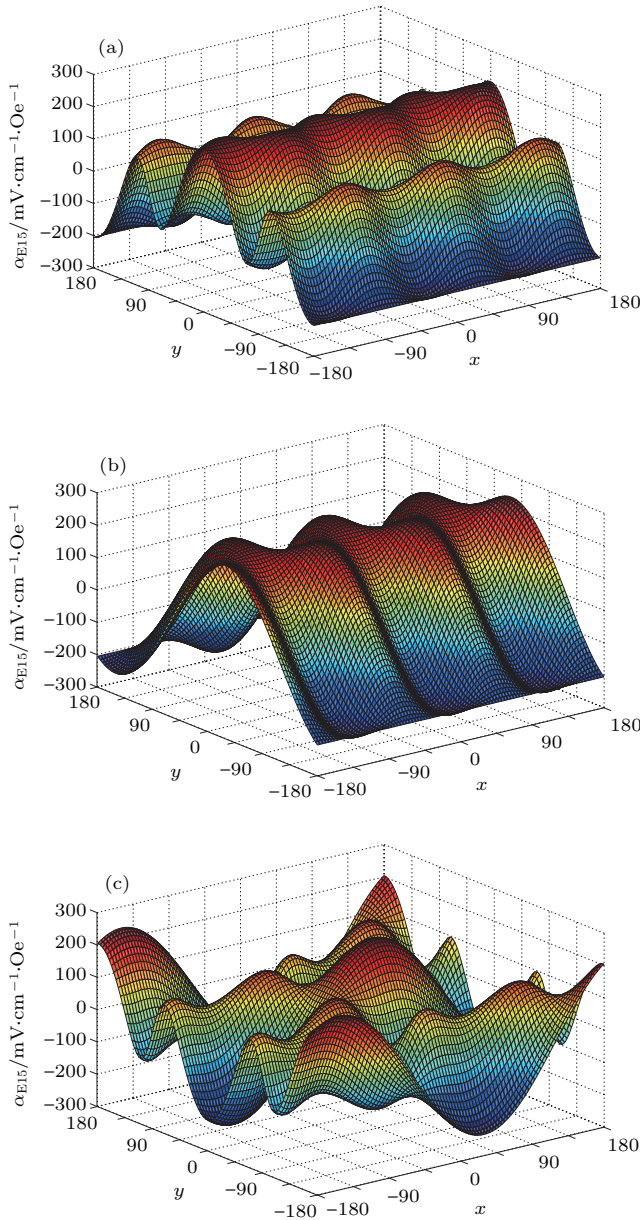


图3 (网刊彩色) 剪切磁电系数 α_{E15} 与铌酸锂 (LiNbO_3) 切型的关系 (a) LiNbO_3 [($xzlw$) x°/y°]; (b) LiNbO_3 [($xzlz$) x°/y°]; (c) LiNbO_3 [($xztw$) x°/y°]

Fig. 3. (color online) ME coefficient α_{E15} as a function of orientations of (a) LiNbO_3 [($xzlw$) x°/y°], (b) LiNbO_3 [($xzlz$) x°/y°], (c) LiNbO_3 [($xztw$) x°/y°].

图5是对伸缩-剪切Metglas/铌酸锂磁电复合结构材料尺寸进行计算优化的结果,表明剪切磁电系数大小与磁致伸缩相和压电相的长度、厚度均有关系, α_{E15} 随着磁致伸缩相厚度 t_m 的上升而上升,这是因为磁致伸缩相提供的应力与其横截面积成正比,当压电相长度 l_p 值下降时,磁电耦合系数提高,是因为 $T_{m3}t_m = T_{m5}l_p$, 应力 T_{m5} 与 l_p 成反比;在伸缩-剪切结构中, t_p/l_m 数值相对较小,因此剪切磁电系数受 t_p 和 l_m 影响较小. 需要说明的是,由

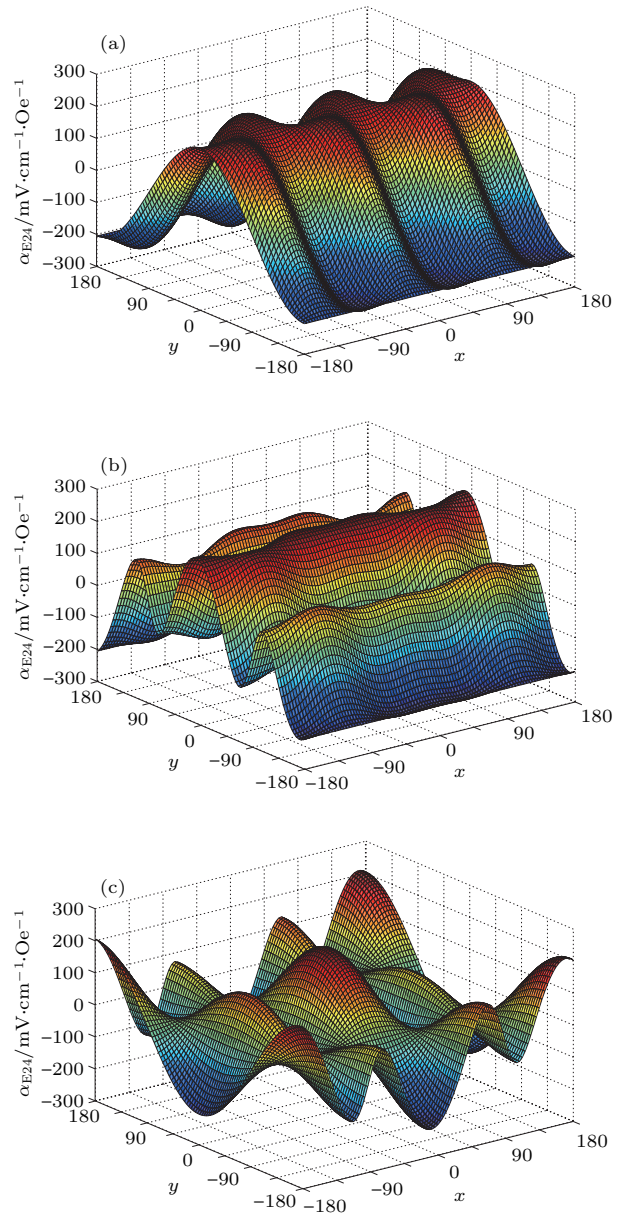


图4 (网刊彩色) 剪切磁电系数 α_{E24} 与铌酸锂 (LiNbO_3) 切型的关系 (a) LiNbO_3 [($yzlt$) x°/y°]; (b) LiNbO_3 [($yzlw$) x°/y°]; (c) LiNbO_3 [($yzwt$) x°/y°]

Fig. 4. (color online) ME coefficient α_{E24} as a function of orientations of (a) LiNbO_3 [($yzlt$) x°/y°], (b) LiNbO_3 [($yzlw$) x°/y°], (c) LiNbO_3 [($yzwt$) x°/y°].

于复合结构中的Metglas是由单层Metglas薄片通过环氧树脂胶黏接成的叠层,因此其厚度很难提高到1 mm,并且黏接多层树脂会显著地降低其压磁系数 d_{m33} ,所以计算结果中假设 d_{m33} 不随 t_m 的上升而下降只是一种理想情况,因此将能够做得很厚的Terfenol-D代入计算公式中会更加符合实际条件,图6显示了剪切磁电系数随Terfenol-D/铌酸锂复合材料中Terfenol-D厚度变化而变化的情况,表明较厚的Terfenol-D会显著提高其剪切磁电耦合系

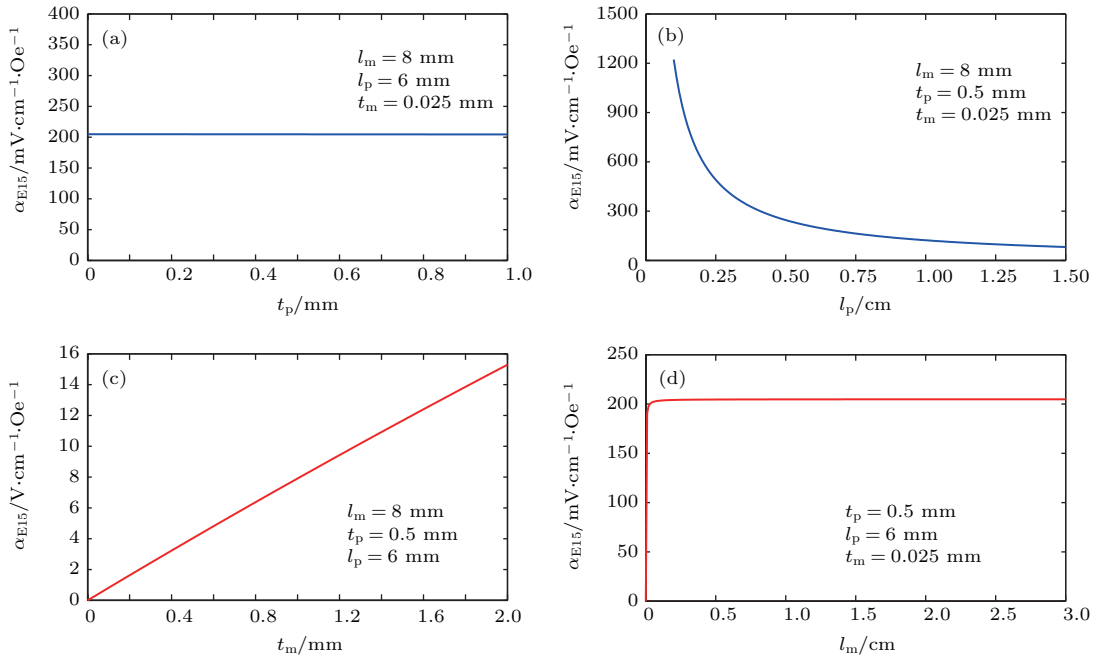


图5 伸缩-剪切结构磁电系数 α_{E15} 随 Metglas 和铌酸锂尺寸的变化, 其中 $d_{p15} = 74 \times 10^{-12}$ C/N, $d_{m33} = 0.3 \times 10^{-6}$ Oe $^{-1}$ (a) α_{E15} 随铌酸锂厚度变化 α_{E15} [mV/(cm·Oe)]- t_p (mm); (b) α_{E15} 随铌酸锂长度变化 α_{E15} [mV/(cm·Oe)]- l_p (cm); (c) α_{E15} 随 Metglas 厚度变化 α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_m (mm); (d) α_{E15} 随 Metglas 长度变化 α_{E15} [mV/(cm·Oe)]- l_m (cm)

Fig. 5. ME coefficient α_{E15} as a function of sizes of stretch-shear Metglas/LiNbO $_3$ composite. From which $d_{p15} = 74 \times 10^{-12}$ C/N, $d_{m33} = 0.3 \times 10^{-6}$ Oe $^{-1}$, (a) α_{E15} [mV/(cm·Oe)]- t_p (mm), (b) α_{E15} [mV/(cm·Oe)]- l_p (cm), (c) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_m (mm), (d) α_{E15} [mV/(cm·Oe)]- l_m (cm).

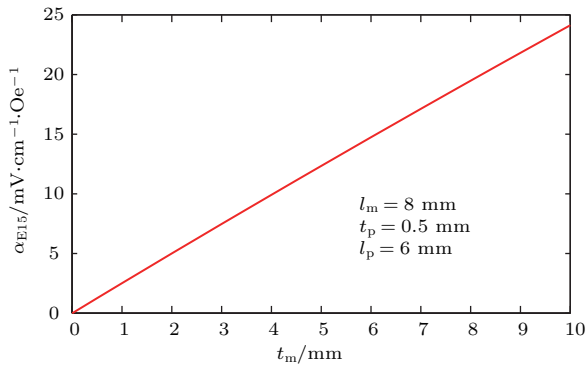


图6 伸缩-剪切结构磁电系数 α_{E15} 随 Terfenol-D 厚度的变化, 其中 $d_{p15} = 74 \times 10^{-12}$ C/N, $d_{m33} = 0.7 \times 10^{-6}$ Oe $^{-1}$
Fig. 6. ME coefficient α_{E15} as a function of sizes of stretch-shear Terfenol-D/LiNbO $_3$ composite. From which α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_m (mm), $d_{p15} = 74 \times 10^{-12}$ C/N, $d_{m33} = 0.7 \times 10^{-6}$ Oe $^{-1}$.

数, 当 t_m 为 1 cm 时, Terfenol-D 能保持其原有的压磁系数 d_{m33} , 而此时理论磁电系数 α_{E15} 可以达到 24.13 V/(cm·Oe).

图 7 是对剪切-剪切磁电复合结构尺寸进行计算优化的结果, 剪切磁电系数大小只与两相材料的厚度有关, 表明剪切磁电系数与磁致伸缩相厚度呈正相关、与压电相厚度呈负相关, 是因为磁致伸

缩相为激发振动的主动相, 而压电相为被动相. 当 $t_m = 0.48$ mm, $t_p = 0.5$ mm 时, Metglas/铌酸锂复合材料最大的 α_{E15} 为 11.46 V/(cm·Oe), Terfenol-D/铌酸锂复合材料最大的 α_{E15} 为 7.40 V/(cm·Oe), 剪切-剪切结构中的 Terfenol-D 比 Metglas 有相对更大的弹性柔顺系数 s_{44}^H , 因此其 α_{E15} 相对较小, 然而, 获得厚度较大且压磁系数保持不变的 Metglas 叠层仍是材料制备中的难题. 值得一提的是, 由于磁致伸缩材料厚度方向上的退磁场大于长度方向上的退磁场, 因此剪切-剪切磁电复合结构需要大的直流偏置磁场来激发大的 α_{E15} , 这限制了该结构在小型化磁传感器领域的应用.

为了初步验证理论结果的可靠性, 利用最优铌酸锂切型 (xzt) 30° ($d_{p15} = 84.89$ pC/N) 制作成如图 1(a) 所示的伸缩-剪切复合结构, 其中将 5 片 Metglas 黏接成单层磁致伸缩相以提供更大的应力, 并选用常规切型 (xzt) 0° ($d_{p15} = 74$ pC/N) 进行对比实验, 其剪切磁电系数如图 8 所示, Metglas/铌酸锂 (xzt) 0° 复合材料的 α_{E15} 为 404.6 mV/(cm·Oe), 而 Metglas/铌酸锂 (xzt) 30° 的 α_{E15} 为 680.3 mV/(cm·Oe), 同时利用仅黏接 1

片铌酸锂的结构对比其单面伸缩磁电信号. 结果表明 (xzt) 30° 铌酸锂基复合材料能比常规切型获得更大的剪切磁电系数, 且该切型的伸缩磁电信号为零, 证实了图 3 中的切型计算结果.

对材料尺寸进行计算优化的结果显示, 剪切磁电系数与 Terfenol-D 的厚度呈显著的正相关, 因此在实验上利用 Terfenol-D/铌酸锂制成复合结构, 其剪切磁电系数如图 9 所示, 当 $t_m = 1$ mm 时, Terfenol-D/铌酸锂复合材料的

α_{E15} 为 431.4 mV/(cm·Oe), 当 $t_m = 2$ mm 时 α_{E15} 为 626.8 mV/(cm·Oe), 表明剪切磁电系数随着 Terfenol-D 厚度上升而上升, 与图 6 中计算结论一致. 但是实验测得的剪切磁电系数仅为计算值的 15% 左右, 这是因为计算中没有考虑树脂黏接层对应变传递的损耗并假设完全刚性的力学受夹边界条件, 剪切磁电系数的进一步优化需要更厚的 Terfenol-D 和更高弹性模量的底部边界条件.

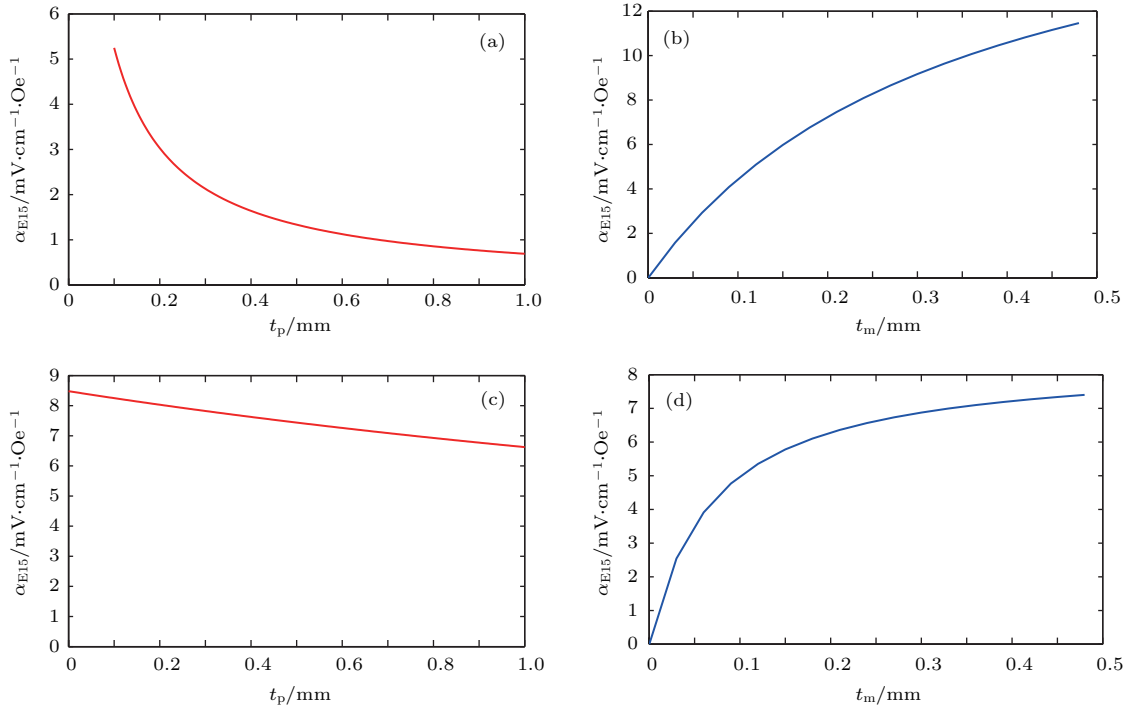


图 7 剪切-剪切结构磁电系数 α_{E15} 随两相材料厚度的变化 (a) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_p (mm), $t_m = 25$ μm , Metglas/铌酸锂复合材料; (b) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_m (mm), $t_p = 0.5$ mm, Metglas/铌酸锂复合材料; (c) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_p (mm), $t_m = 0.5$ mm, Terfenol-D/ 铌酸锂复合材料; (d) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_m (mm), $t_p = 0.5$ mm, Terfenol-D/ 铌酸锂复合材料

Fig. 7. ME coefficient α_{E15} as a function of sizes of shear-shear ME composite: (a) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_p (mm), $t_m = 25$ μm , Metglas/LiNbO₃ composite; (b) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_m (mm), $t_p = 0.5$ mm, Metglas/LiNbO₃ composite; (c) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_p (mm), $t_m = 0.5$ mm, Terfenol-D/LiNbO₃ composite; (d) α_{E15} [V/(cm·Oe)]- t_m (mm), $t_p = 0.5$ mm, Terfenol-D/LiNbO₃ composite.

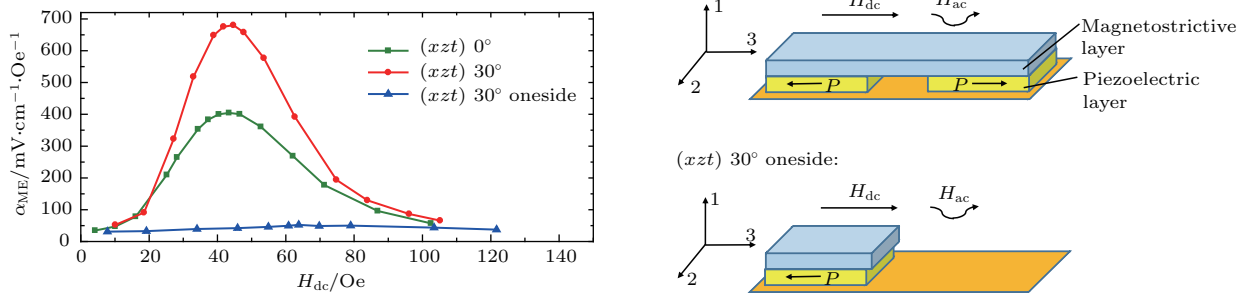


图 8 (网刊彩色) 伸缩-剪切 Metglas/铌酸锂复合结构的实测剪切磁电系数与铌酸锂切型的关系

Fig. 8. (color online) α_{E15} of stretch-shear Metglas/LiNbO₃ ME laminate composite in experiment with different crystal orientations of LiNbO₃.

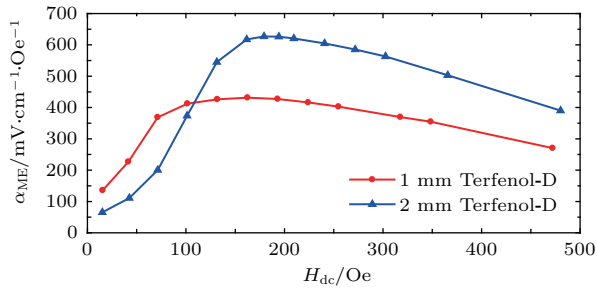


图9 伸缩-剪切 Terfenol-D/铌酸锂复合结构的实测剪切磁电系数与 Terfenol-D 厚度的关系

Fig. 9. α_{E15} of stretch-shear Terfenol-D/LiNbO₃ ME laminate composite in experiment with different thickness of Terfenol-D.

4 结 论

本文研究了基于剪切振动模式的铌酸锂基磁电复合材料, 通过弹性力学方法计算了铌酸锂单晶切型、磁致伸缩材料种类、材料尺寸、复合结构边界条件对剪切磁电系数的影响. 结果表明, 铌酸锂(xzt) 30°切型是实现最优剪切磁电系数 α_{E15} 的切型, 剪切磁电系数与磁致伸缩材料的厚度呈明显正相关, 计算得到的伸缩-剪切模式 Terfenol-D/铌酸锂复合材料最大剪切磁电系数为24.13 V/(cm·Oe), 剪切-剪切模式 Metglas/铌酸锂复合材料最大剪切磁电系数为11.46 V/(cm·Oe). 本研究将铌酸锂单晶和 Metglas 引入剪切磁电复合材料, 为设计剪切磁电复合结构、优化剪切模式铌酸锂单晶切型选择提供了指导, 有望应用于高 Q_m 值高频谐振条件的交流磁场探测.

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] Ma J, Shi Z, Lin Y H, Nan C W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5852 (in Chinese) [马静, 施展, 林元华, 南策文 2009 物理学报 **58** 5852]
- [4] Zhou J P, Shi Z, Liu G, He H C, Nan C W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3766 (in Chinese) [周剑平, 施展, 刘刚, 何泓材, 南策文 2006 物理学报 **55** 3766]
- [5] Shi Z, Nan C W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2766 (in Chinese) [施展, 南策文 2004 物理学报 **53** 2766]
- [6] Jia Y M, Luo H S, Zhao X Y, Wang F F 2008 *Adv. Mater.* **20** 4776
- [7] Li P, Wen Y M, Bian L X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 022503
- [8] Bi K, Wang Y G, Pan D A, Wu W 2011 *J. Mater. Res.* **26** 2707
- [9] Li L, Chen X M, Zhu H Y 2012 *J. Alloys Compd.* **526** 116
- [10] Zeng L Y, Zhou M H, Bi K, Lei M 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 034102
- [11] Zhai J Y, Xing Z P, Dong S X, Li J F, Viehland D 2008 *J. Am. Ceram. Soc.* **91** 351
- [12] Chashin D V, Fetisov Y K, Tafintseva E V, Srinivasan G 2008 *Solid State Commun.* **148** 55
- [13] Wen Y M, Wang D, Li P, Chen L, Wu Z Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 097506 (in Chinese) [文玉梅, 王东, 李平, 陈蕾, 吴治峰 2011 物理学报 **60** 097506]
- [14] Weis R S, Gaylord T K 1985 *Appl. Phys. A* **37** 191
- [15] Wang Y, Jiang Y J 2003 *Opt. Mater.* **23** 403
- [16] Kuo H Y, Slinger A, Bhattacharya K 2010 *Smart Mater. Struct.* **19** 125010
- [17] Ma J, Shi Z, Nan C W 2007 *Adv. Mater.* **19** 2571
- [18] Bi K, Ai Q W, Yang L, Wu W, Wang Y G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057503 (in Chinese) [毕科, 艾迁伟, 杨路, 吴玮, 王寅岗 2011 物理学报 **60** 057503]
- [19] Wan H, Xie L Q, Wu X Z, Liu X C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3872 (in Chinese) [万红, 谢立强, 吴学忠, 刘希从 2005 物理学报 **54** 3872]
- [20] Bichurin M I, Petrov R V, Petrov V M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 092902
- [21] Wang Y J, Hasanyan D, Li J F, Viehland D, Luo H S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 202903
- [22] Zhang J T, Li P, Wen Y M, He W, Yang A C, Lu C J 2014 *Sens. Actuator A: Phys.* **214** 149
- [23] Liu G X, Zhang C L, Dong S X 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 074104
- [24] Lu M C, Mei L, Jeong D Y, Xiang J, Xie H Q, Zhang Q M 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 112905
- [25] Meeks S W, Hill J C 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 6584

Optimization of magnetoelectricity in thickness shear mode LiNbO₃/magnetostrictive laminated composite*

Xin Cheng-Zhou Ma Jian-Nan Ma Jing[†] Nan Ce-Wen

(State Key Laboratory of New Ceramics and Fine Processing, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 8 November 2016; revised manuscript received 21 December 2016)

Abstract

Magnetolectric (ME) composites have recently attracted much attention and triggered a great number of research activities, owing to their potential applications in sensors and transducers. Many researches have focused on the enhancement of ME coefficient by choosing suitable composite material and vibration mode based on the coupling between stress and strain. Besides normal stress, another vibration mode, shear mode, is further discussed as a potential high-frequency resonant device for a high frequency magnetic field detector, and it is useful to optimize the shear ME coefficient to broaden the application scope of the compositions. In this paper, an elasticity method is used to calculate ME coefficients of thickness shear mode LiNbO₃/magnetostrictive laminated composites for various crystal orientations of LiNbO₃, magnetostrictive materials and material sizes. The stretch-shear structure and shear-shear modes of the composite with considering the boundary condition are both discussed and further optimized. According to the structure design of stretch-shear mode composite from the literature, we design a new structure to achieve the uniform and pure shear ME effect, which changes the magnetostrictive phase on the bonding part into rigid material to avoid stretch deformation. We find that in the shear-shear ME composite, the structure should not move in the in-plane direction in order to realize the parallelogram deformation under shear stress, but should be free in the thickness direction to meet the change of thickness with shear deformation. For the stretch-shear mode Metglas/LiNbO₃ [(*xzlt*) *x*[°]/*y*[°]], the shear ME coefficient α_{E15} as a function of orientation of LiNbO₃ shows that the maximum α_{E15} is 235.1 mV/(cm·Oe) when *x* = 0 and *y* = 30. The results indicate that optimal shear ME coefficient is obtained at (*xzt*) 30° LiNbO₃, resulting from the maximum shear piezoelectric coefficient *d*_{p15}. By changing the material size in stretch-shear composite, the shear ME coefficient increases with the increase of thickness of magnetostrictive phase, because the stretch force increases with the increase of the cross-sectional area of magnetostrictive phase. The maximum values of α_{E15} are, respectively, 24.13 V/(cm·Oe) in the stretch-shear mode Terfenol-D/LiNbO₃ and 11.46 V/(cm·Oe) in the shear-shear mode Metglas/LiNbO₃ by the optimization of material sizes. Experimental results are in accordance with calculation results. It is confirmed that LiNbO₃ (*xzt*) 30° is the best choice for achieving the largest shear ME effect, and thicker Terfenol-D can help to achieve a larger ME coefficient in this stretch-shear composite. This work provides a design method to choose the structure and crystal orientation of shear LiNbO₃-based ME laminated composite, which shows a prospect of applications in high-mechanical-quality factor *Q*_m and high-frequency magnetic detectors with shear resonant devices.

Keywords: thickness shear mode, LiNbO₃, magnetolectric composite structure

PACS: 75.80.+q, 75.85.+t, 77.84.-s, 77.84.Lf

DOI: 10.7498/aps.66.067502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51402164).

† Corresponding author. E-mail: ma-jing@mail.tsinghua.edu.cn