

伸缩-剪切模式自偏置铌酸锂基复合材料的磁电性能和高频谐振响应

辛成舟 马健男 马静 南策文

Magnetoelectric effect in stretch-shear mode self-biased LiNbO_3 based composite with high-frequency resonant response

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 157502 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180810

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180810>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于 Jiles-Atherton 理论的铁磁材料塑性变形磁化模型修正](#)

Modeling plastic deformation effect on the hysteresis loops of ferromagnetic materials based on modified Jiles-Atherton model

物理学报.2017, 66(10): 107501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.107501>

[厚度剪切模式铌酸锂基复合材料的磁电性能优化](#)

Optimization of magnetoelectricity in thickness shear mode LiNbO_3 /magnetostrictive laminated composite

物理学报.2017, 66(6): 067502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.067502>

[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>

[\$\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2\$ 合金磁畴偏转的滞回特性研究](#)

Study on hysteresis characteristics of magnetic domain rotation in $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ alloy

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

[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>

多铁性: 物理、材料及器件专题

伸缩-剪切模式自偏置铌酸锂基复合材料的 磁电性能和高频谐振响应*

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)

(2018年4月25日收到; 2018年5月18日收到修改稿)

选用多种切型铌酸锂(LiNbO_3)单晶, 研究了铁基非晶合金(Metglas)/ LiNbO_3 叠层复合材料基于伸缩-剪切模式的磁电耦合性能, 揭示了铌酸锂单晶压电系数与复合材料剪切磁电耦合系数的对应关系, 在使用铌酸锂 $xzt/30^\circ$ 切型时得到了最优化剪切磁电系数. 通过 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 薄磁带提供偏置磁场, Metglas/ LiNbO_3 磁电复合材料可在没有外加直流磁场时实现剪切磁电响应, 并在0.991 MHz和3.51 MHz频率时分别测出了谐振磁电系数, 有望将铌酸锂基剪切磁电复合材料用于高频磁场探测.

关键词: 伸缩-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.67.20180810

1 引言

由于在磁场探测、能量收集等领域具有潜在应用前景, 多铁性磁电复合材料已经引起了持续的关注^[1-3]. 磁电复合材料包含磁致伸缩相和压电相, 通过两相界面进行应力应变传递, 从而通过对材料施加交流磁场引发振动, 这种振动传递到压电相会引发电极化, 进而引发磁电响应^[4-6]. 通过两相材料的选择、振动模式的优化, 复合材料磁电耦合系数明显提高, 特别是近年来剪切磁电系数受到广泛关注^[7-11], 在高频磁场探测中具有广阔的应用前景, 可获得高的信噪比^[12]. 先前的工作使用铽镓铁合金(Terfenol-D)^[8]和钇铁石榴石^[7]等磁致伸缩材料提供伸缩或剪切应力, 带动具有较大剪切压电系数的铌镁酸铅^[8]、钛酸镓镧^[7]、聚偏氟乙烯^[11]等材料实现剪切应变, 制备伸缩-剪切或剪切-剪切振动模式磁电复合材料. 而作为一种具有高机械品质因数 Q_m 和低介电常数 ϵ 的无铅压电材料^[13], 铌酸锂单晶具有较大的剪切压电系数 d_{15} 和 d_{24} , 有望实现大的剪切磁电响应; 同时铌酸锂可以通过单晶切

型变化获得不同的压电系数^[14-17], 有利于设计各向异性的剪切振动模式磁电器件. 因此, 通过使用不同切型铌酸锂单晶研究剪切磁电系数具有理论和实用意义. 我们之前的工作^[18,19]设计了一种伸缩-剪切磁电复合结构, 通过坐标变换计算了铌酸锂基复合材料的剪切磁电系数, 展现出使用优化的铌酸锂切型来设计廉价剪切磁电器件的可能性. 同时, 针对铌酸锂单晶不同切型剪切磁电系数和压电系数对应变化规律的实验研究仍然不足, 将其应用于MHz高频磁场探测和设计自偏置剪切磁电复合材料^[20]的思路仍有待实验探索, 这些研究对于设计小型、一体化的磁电器件具有较大意义.

本文使用一系列不同切型的铌酸锂获得不同的剪切压电系数 d_{15} 或 d_{16} , 并分别测试了实际剪切压电系数和伸缩-剪切结构Metglas/ LiNbO_3 的磁电系数 α_{E15} 或 α_{E16} . 实验结果表明铌酸锂 $xzt/30^\circ$ 切型具有最大剪切压电系数 d_{15} 和对应的磁电系数 α_{E15} , 与理论计算结果一致, 剪切压电系数随切型转动的变化规律和剪切磁电系数的变化规律相同, 同时对伸缩-剪切磁电复合结构进行了优化. 在此基础上, 设计制备了自偏

* 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

置 SrFe₁₂O₁₉/Metglas/LiNbO₃ 复合材料, 在零外部直流偏置磁场时得到了剪切磁电响应, 并在 0.991 MHz 和 3.51 MHz 高频时得到了剪切模式谐振磁电系数 α_{E15} .

2 实验

实验步骤详见参考文献 [18, 19]. 将单片尺寸为 16 mm × 5 mm × 25 μm 的 3, 5, 10 片 Metglas 薄片 (安泰科技股份有限公司, 北京) 分别用环氧树脂粘接成 Metglas 叠层, 从而提高其厚度和磁致伸缩应力. 使用尺寸为 13 mm × 5 mm × 0.5 mm 的铌酸锂单晶 (中国科学院上海光学精密机械研究所) 制备 Metglas/LiNbO₃/Metglas 叠层复合材料. 伸缩-剪切结构的机械夹持玻璃通过环氧树脂或 α-氰基丙烯酸乙酯 (502 胶) 进行粘接, 制备成如图 1 所示的叠层磁电复合材料 [18], 其中使用具有不同压电系数 d_{15} (或 d_{16}) 的铌酸锂 $xzt/0^\circ$, $xzt/30^\circ$, $xyt/0^\circ$, $xyt/30^\circ$, $xyt/41^\circ$ 等单晶切型. 然后, 使用 ZJ-6 型准静态 $d_{33}/d_{31} (+d_{15})$ 测量仪 (中国科学院声学研究所) 测试铌酸锂的剪切压电系数, 使用 E4990A 阻抗频谱分析仪 (德科技 (中国) 有限公司) 测试铌酸锂的电容和阻抗频谱并计算介电常数. 之后, 将尺寸为 12 mm × 5 mm × 1 mm 的商用 SrFe₁₂O₁₉ 薄磁带 (北京磁性材料厂) 放于伸缩-剪切结构磁电复合材料的单侧或两侧各放一片, 并通过铁氟龙胶带固定其位置 [20], 使用实验室自行搭建的测试系统在 1 kHz 时测试复合结构的磁电系数 [21], 并在 1 kHz—4.5 MHz 频率范围内使用 HSA4101 高速双极放大器 (日本 NF 公司) 测试磁电响应随频率的变化.

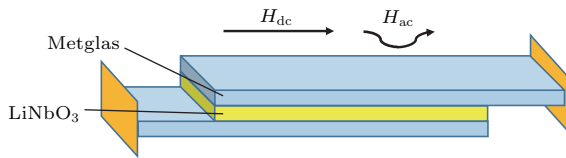


图 1 伸缩-剪切模式磁电复合结构示意图 [18]

Fig. 1. Schematic diagram of the stretch-shear mode magnetoelectric composite [18].

3 结果与讨论

基于之前的工作 [18], 由于随着 Metglas 薄片粘接层数上升, 磁性层厚度 t_m 上升而压磁系数 d_{m33} 降低, 因此需要优化 Metglas 的粘接层数, 以便获

得最大的磁电系数. 图 2(a) 和图 2(b) 显示了不同粘接层数 Metglas/LiNbO₃ ($xzt/0^\circ$) 伸缩-剪切复合结构分别用环氧树脂和 α-氰基丙烯酸乙酯粘接机械夹持玻璃时的磁电系数, 图中写明了相应的剪切磁电系数, 计算剪切磁电系数的公式为 $\alpha_{E15} = \alpha_{E-Clamping} - \alpha_{E-Freedom}$, 其中 $\alpha_{E-Clamping}$ 表示机械夹持状态测得的伸缩+剪切磁电系数, $\alpha_{E-Freedom}$ 表示机械自由状态测得的伸缩磁电系数. 图中显示最优直流偏置磁场 H_{dc} 随着 Metglas 薄片层数的上升而上升, 这是由于更厚的磁致伸缩层需要更大的直流偏置磁场, 而在 10 层 Metglas 薄片粘接时需要的直流偏置磁场仍小于 100 Oe (1 Oe = 79.5775 A/m), 这得益于 Metglas 在面内方向比传统磁致伸缩材料 Terfenol-D 拥有更高的磁导率. 在 5 层 Metglas 粘接时, 磁性层厚度和压磁系数的乘积有最优值, 此时复合材料具有最大磁电系数. 当把机械夹持玻璃的粘接剂换为环氧树脂时, 剪切磁电系数从 82 mV/(cm·Oe) 提高到 109 mV/(cm·Oe), 且更换粘接剂使剪切磁电系数在不同层数 Metglas 的复合材料中均有提高, 这是因为环氧树脂比 α-氰基丙烯酸乙酯粘接剂具有更高的弹性模量, 可以对 Metglas 向两侧的振动起到更好的抑制效果, 使振动能量更多地施加在压电相上. 可以预计, 更高弹性模量的机械夹持材料更有利于抑制振动能量在机械边界上的损耗, 实现剪切磁电系数的进一步提高.

为了证实剪切磁电系数和压电系数的对应关系, 通过准静态 $d_{33}/d_{31} (+d_{15})$ 测量仪实测了铌酸锂单晶的剪切压电系数 d_{15} . 图 3(a) 和图 3(b) 显示了通过坐标转换法则 [14] 计算得到的铌酸锂单晶剪切压电系数 d_{15} (或 d_{16}) 与切型方向的关系, 其中图 3(a) 是铌酸锂 xyt/x° 切型的 d_{16} , 图 3(b) 是铌酸锂 xzt/x° 切型的 d_{15} , 其中的红色点代表对应晶片压电系数的实测值. 结果表明实测剪切压电系数和理论值能够较好符合, 铌酸锂 $xzt/30^\circ$ 切型的最大 d_{15} 为 77 pC/N, 实测值略小于理论值, 是由于购买的正常切型铌酸锂剪切压电系数 66 pC/N 也小于理论值 74 pC/N. 为了研究晶体方向和介电常数的关系, 使用阻抗频谱分析测试了铌酸锂的电容. 图 3(c) 和图 3(d) 是尺寸为 13 mm × 5 mm × 0.5 mm 的铌酸锂晶片电容值 C_p 和频率 f 的关系, xyt 和 xzt 系列切型铌酸锂在频率为 1 kHz 时的电容值均为 90 pF, 计算得到对应的介电常数 ϵ_{11}^T 为 80, 与理论结果一致 [13].

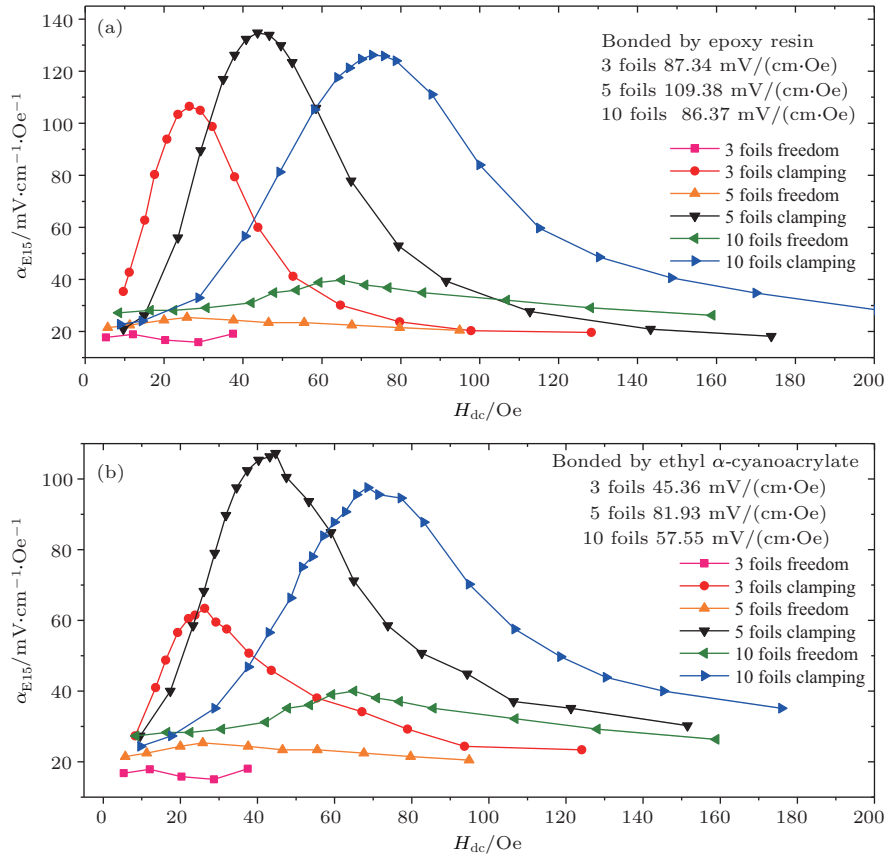


图2 粘接不同层数 Metglas 伸缩-剪切复合结构磁电系数 α_{E15} 与直流偏置磁场的关系 (a) 机械夹持玻璃由环氧树脂粘接; (b) 机械夹持玻璃由 α -氰基丙烯酸乙酯粘接

Fig. 2. Magneto-electric coefficient α_{E15} as a function of direct current magnetic bias for the stretch-shear mode composite with different Metglas foils: (a) With mechanical clamping glass bonded by epoxy resin; (b) with mechanical clamping glass bonded by ethyl α -cyanoacrylate.

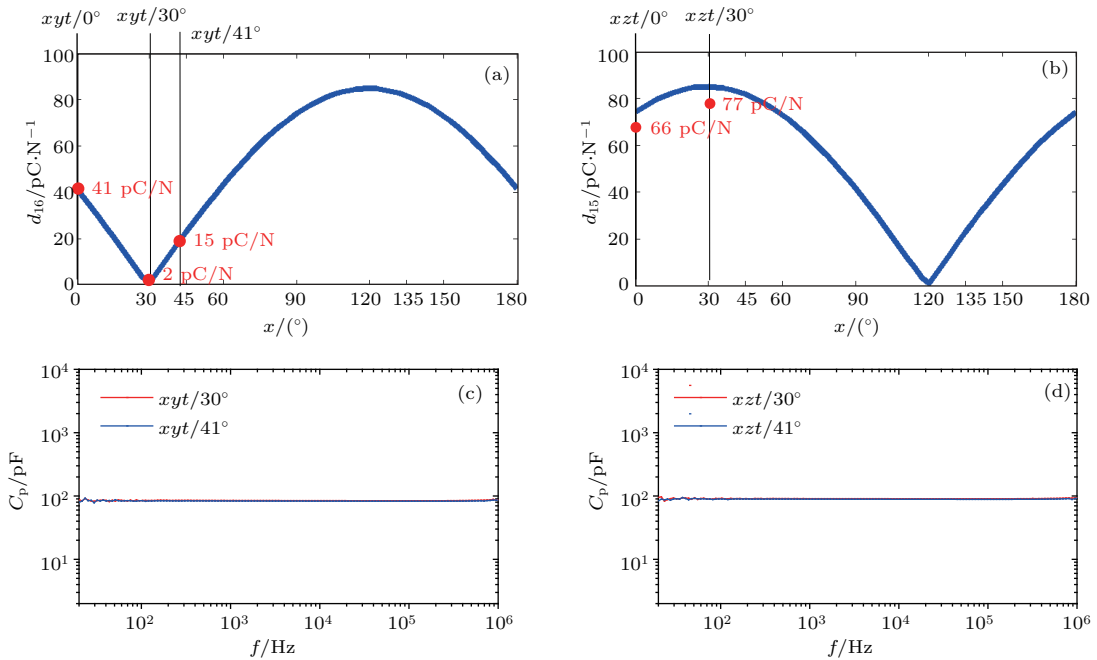


图3 铌酸锂切型方向与剪切压电系数的关系 (a) xyt 切型的压电系数 d_{16} ; (b) xzt 切型的压电系数 d_{15} ; (c) xyt 切型和 (d) xzt 切型铌酸锂晶片电容与频率关系

Fig. 3. LiNbO_3 's crystal orientation dependence of shear-piezoelectric coefficient: (a) d_{16} of xyt ; (b) d_{15} of xzt ; capacitance as a function of frequency for (c) xyt , (d) xzt cut.

图 4(a) 和图 4(b) 为 $xyt/0^\circ$, $xyt/30^\circ$, $xyt/41^\circ$, $xzt/0^\circ$, $xzt/30^\circ$ 等切型铌酸锂基伸缩-剪切复合结构的磁电系数 α_{E16} 和 α_{E15} , 其中 Metglas 薄片使用 5 层粘接叠层、机械夹持玻璃使用环氧树脂粘接, 图中写明了对应的剪切磁电系数. 图 4(c) 为不同切型铌酸锂实测压电系数 d_{15} (或 d_{16}) 和磁电耦合系数 α_{E15} (或 α_{E16}) 的关系, 表明两者具有相同的变

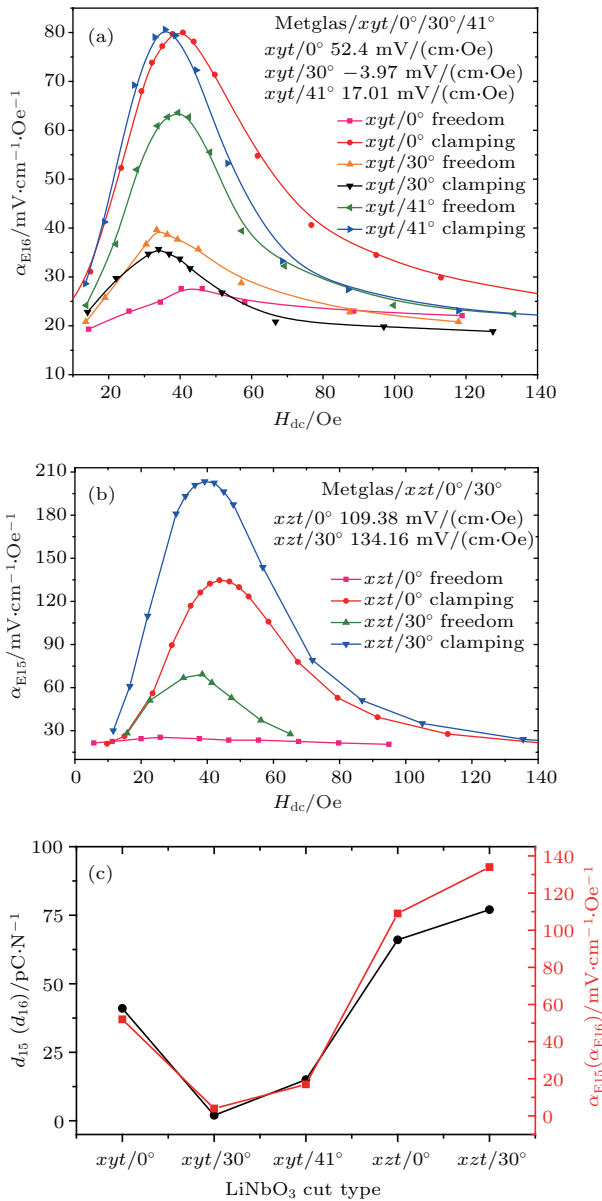


图 4 伸缩-剪切复合结构的磁电系数 α_{E16} , α_{E15} 和铌酸锂不同切型方向的关系 (a) Metglas/LiNbO₃ ($xyt/0^\circ$, $xyt/30^\circ$, $xyt/41^\circ$); (b) Metglas/LiNbO₃ ($xzt/0^\circ$, $xzt/30^\circ$); (c) 压电系数和剪切磁电系数的比较

Fig. 4. Magnetoelectric coefficient α_{E16} and α_{E15} as a function of direct current magnetic bias for the stretch-shear mode composite with different crystal orientation: (a) Metglas/LiNbO₃ ($xyt/0^\circ$, $xyt/30^\circ$, $xyt/41^\circ$); (b) metglas/LiNbO₃ ($xzt/0^\circ$, $xzt/30^\circ$); (c) comparison of piezoelectric coefficient and shear magnetoelectric coefficient.

化规律, 这是因为铌酸锂 xyt 和 xzt 系列切型的介电常数 ϵ_{11}^T 、复合结构压磁系数 d_{m33} 等其他参数几乎相同, 不随切型变化而变化, 因此剪切磁电系数只随压电系数变化, 当在 $xzt/30^\circ$ 切型压电系数 d_{15} 达到最大值 77 pC/N 时, 相应磁电系数 α_{E15} 也达到最优值 134.16 mV/(cm·Oe). 需要说明的是, 在 Metglas/LiNbO₃ ($xyt/30^\circ$) 中, 机械自由时磁电系数 $\alpha_{E-Freedom}$ 略大于机械夹持磁电系数 $\alpha_{E-Clamping}$, 这来自于伸缩磁电系数 $\alpha_{E-stretch}$ 和剪切磁电系数 α_{E16} 的电压输出方向相反. 同时, 铌酸锂 $xyt/30^\circ$ 切型对应复合结构的剪切磁电系数接近零, 与该切型剪切压电系数很小的结论相符合.

图 5 为伸缩-剪切模式 SrFe₁₂O₁₉/Metglas/LiNbO₃ ($xzt/30^\circ$) 复合材料的磁电系数 α_{E15} 和直流偏置磁场 H_{dc} 的关系, 由于 SrFe₁₂O₁₉ 薄磁带提供了内部磁场, 得到最大 α_{E15} 所需的外部直流偏置磁场随着薄磁带数目增加而变小, 也即最优直流偏置磁场从 40 Oe 下降到 19 Oe, 且在零直流偏置磁场时剪切磁电系数 α_{E15} 增加, 显示薄磁带使复合材料具有自偏置剪切磁电效应. 由于实验使用的 SrFe₁₂O₁₉ 薄磁带提供磁场较弱, 因此后续研究应进一步寻找能提供 40 Oe 直流磁场的磁带, 可使复合结构在零直流偏置磁场时得到最优磁电系数.

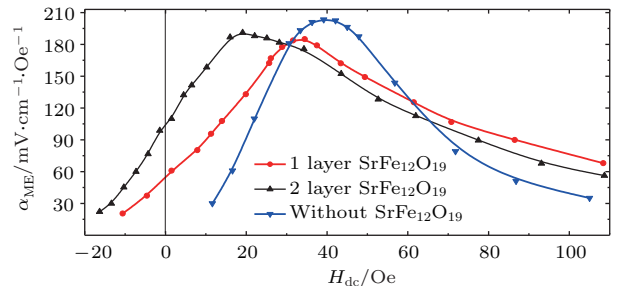


图 5 伸缩-剪切模式 SrFe₁₂O₁₉/Metglas/LiNbO₃ 复合材料在复合不同层数 SrFe₁₂O₁₉ 薄磁带时的磁电系数 α_{E15}
Fig. 5. Magnetoelectric coefficient α_{E15} of stretch-shear mode SrFe₁₂O₁₉/Metglas/LiNbO₃ composite as a function of H_{dc} with different layer of SrFe₁₂O₁₉ ribbon.

剪切模式磁电复合材料的谐振频率在 MHz 数量级, 适用于高频磁场探测. 图 6(a) 为 Metglas/LiNbO₃ ($xzt/30^\circ$) 复合结构的阻抗频谱, 显示该复合结构有 991 kHz 和 3.51 MHz 两个谐振频率, 分别对应图 6(b) 中的谐振磁电系数 8.16 V/(cm·Oe) 和 9.17 V/(cm·Oe). 需要说明的是, 复合材料在 3.51 MHz 高频时具有较大的涡流

损耗和明显的法拉第效应,使得整体机械品质因数较低,磁电系数有一定的测试误差.

感谢中国科学院声学研究所提供 ZJ-6 型准静态 $d_{33}/d_{31} (+d_{15})$ 测量仪进行测试.

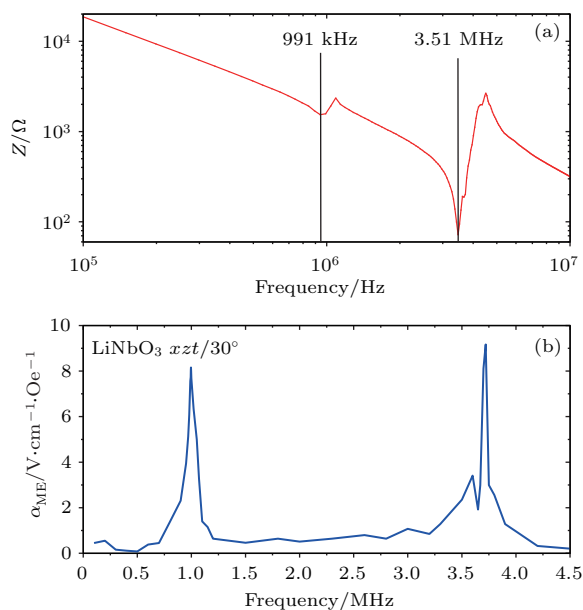


图6 伸缩-剪切模式 Metglas/LiNbO₃ ($xzt/30^\circ$) 复合结构 (a) 阻抗频谱; (b) 磁电系数 α_{E15} 和频率的关系
 Fig. 6. Stretch-shear Metglas/LiNbO₃ ($xzt/30^\circ$) laminated composite: (a) Impedance spectroscopy; (b) variation of α_{E15} as a function of frequency at optimized direct current magnetic bias.

4 结 论

本文通过铌酸锂切型优化和高弹性模量机械夹持材料的选择,优化了伸缩-剪切复合结构的磁电耦合系数,实验验证了剪切磁电系数和铌酸锂单晶压电系数的对应规律,并引入 SrFe₁₂O₁₉ 薄磁带制备了自偏置剪切磁电复合材料. LiNbO₃ ($xzt/30^\circ$)/5层 Metglas 复合结构的准静态条件最优剪切磁电系数为 134.16 mV/(cm·Oe),谐振条件磁电系数达到了 9.17 V/(cm·Oe). 本研究探明铌酸锂不同切型对复合材料磁电耦合性能的影响和规律,有助于将铌酸锂基磁电复合材料应用于各向异性、小型、一体化的高频谐振器件.

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] Chu Z Q, Shi H D, Shi W L, Liu G X, Wu J G, Yang J K, Dong S X 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606022
- [4] Ma J, Shi Z, Nan C W 2007 *Adv. Mater.* **19** 2571
- [5] Shi Z, Ma J, Lin Y H, Nan C W 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 043902
- [6] Zeng L Y, Zhou M H, Bi K, Lei M 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 034102
- [7] Bichurin M I, Petrov R V, Petrov V M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 092902
- [8] Wang Y J, Hasanyan D, Li J F, Viehland D, Luo H S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 202903
- [9] Zhang J T, Li P, Wen Y M, He W, Yang A C, Lu C J 2014 *Sens. Actuator A: Phys.* **214** 149
- [10] Liu G X, Zhang C L, Dong S X 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 074104
- [11] Lu M C, Mei L, Jeong D Y, Xiang J, Xie H Q, Zhang Q M 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 112905
- [12] Fang Z, Mokhariwale N, Li F, Datta S, Zhang Q M 2011 *IEEE Sens. J.* **11** 2260
- [13] Weis R S, Gaylord T K 1985 *Appl. Phys. A* **37** 191
- [14] Wang Y, Jiang Y J 2003 *Opt. Mater.* **23** 403
- [15] Kuo H Y, Slinger A, Bhattacharya K 2010 *Smart Mater. Struct.* **19** 125010
- [16] Timopheev A A, Vidal J V, Kholkin A L, Sobolev N A 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 044102
- [17] Vidal J V, Timopheev A A, Kholkin A L, Sobolev N A 2015 *Vacuum* **122** 286
- [18] Xin C Z, Ma J N, Ma J, Nan C W 2017 *Sci. Bull.* **62** 388
- [19] Xin C Z, Ma J N, Ma J, Nan C W 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 067502 (in Chinese) [辛成舟, 马健男, 马静, 南策文 2017 物理学报 **66** 067502]
- [20] Ma J N, Xin C Z, Ma J, Lin Y H, Nan C W 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 405002
- [21] Ma J N, Xin C Z, Ma J, Zhang Q M, Nan C W 2016 *Sci. Bull.* **61** 378

SPECIAL TOPIC — Multiferroicity: Physics, materials, and devices

Magnetolectric effect in stretch-shear mode self-biased LiNbO₃ based composite with high-frequency resonant response*

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 25 April 2018; revised manuscript received 18 May 2018)

Abstract

Magnetolectric (ME) composites have received attention abidingly due to the promising potential applications in magnetic field sensor and energy harvester. In recent years, shear mode ME composite was frequently discussed with promising applications in high-frequency magnetic field with large signal-to-noise ratio. Single-crystal LiNbO₃, as a lead-free piezoelectric phase with high mechanical quality factor and small dielectric constant, is suitable for achieving a large shear ME effect with large shear piezoelectric coefficient d_{15} or d_{24} , and different piezoelectric coefficients can be obtained by crystal-cut transformation. The transformation rule of shear ME coefficient with transformation of LiNbO₃ crystal orientation and the MHz high-frequency magnetic detection is still lacking. Furthermore, self-biased ME composite can be obtained with SrFe₁₂O₁₉ ribbon, which is useful for the integration and miniaturization of ME sensor. In the present work, we use a series of X -cut LiNbO₃ to obtain different d_{15} or d_{16} in a stretch-shear ME composite. Piezoelectric coefficient d_{15} and ME coefficient α_{E15} of Metglas/LiNbO₃ composite are obtained in experiment, respectively. The results show that LiNbO₃ $xzt/30^\circ$ has the largest d_{15} and α_{E15} , and the transformation rule of α_{E15} is consistent with the coordinate transformation of d_{15} . The structure of stretch-shear ME composite is optimized to improve the ME coefficient. Then the stretch-shear mode self-biased SrFe₁₂O₁₉/Metglas/LiNbO₃ composite is fabricated, and shear ME response is observed under zero external direct current magnetic bias. Moreover, α_{E15} at electromechanical resonance frequency is gained at shear-mode high frequency (0.991 MHz and 3.51 MHz). The largest ME coefficient α_{E15} is acquired in the stretch-shear 5-foil Metglas/LiNbO₃ ($xzt/30^\circ$) composite of 134.16 mV/(cm·Oe) at 1 kHz and 9.17 V/(cm·Oe) at 3.51 MHz. This work is beneficial to the confirming of the corresponding rules of shear ME coefficient and LiNbO₃ piezoelectric coefficient, showing that the composite possesses the potential applications in integration, miniaturization and high-frequency resonant sensor.

Keywords: stretch-shear mode, LiNbO₃, magnetolectric composite structure

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

DOI: 10.7498/aps.67.20180810

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

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