

磁电异质结及器件应用

杨娜娜 陈轩 汪尧进

Magnetoelectric heterostructure and device application

Yang Na-Na Chen Xuan Wang Yao-Jin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 157508 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180856

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180856>

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

四方相多铁 BiMnO_3 电控磁性的理论研究

Theoretical study on magnetoelectric effect in multiferroic tetragonal BiMnO_3

物理学报.2018, 67(15): 157511 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180946>

基于磁电耦合效应的基本电路元件和非易失性存储器

Fundamental circuit element and nonvolatile memory based on magnetoelectric effect

物理学报.2018, 67(12): 127501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.127501>

引入界面耦合系数的长片型磁电层状复合材料的等效电路模型

Equivalent circuit model for plate-type magnetoelectric laminate composite considering an interface coupling factor

物理学报.2018, 67(2): 027501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172080>

基于能量转换原理的磁电层合材料低频磁电响应分析

Low frequency magnetoelectric response analysis of magnetoelectric laminate material based on energy conversion principle

物理学报.2014, 63(20): 207501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.207501>

多铁材料 HoMnO_3 中光学吸收和畸变驱动的第一性原理研究

Research on optical absorption and distortion driving in multiferroic HoMnO_3 from the first principles

物理学报.2013, 62(12): 127502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.127502>

多铁性: 物理、材料及器件专题

磁电异质结及器件应用*

杨娜娜 陈轩 汪尧进†

(南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094)

(2018年4月30日收到; 2018年6月1日收到修改稿)

磁电异质结是由铁磁和铁电材料通过连接层耦合而成, 其磁电效应来源于铁电相的压电效应和铁磁相的磁致伸缩效应. 相对于颗粒混相磁电复合材料, 层状磁电异质结材料具有更高的磁电耦合系数和更低的介电损耗, 使得其在磁场传感器、能量收集器、天线以及存储器等领域都有着巨大的应用前景. 本综述重点总结了磁电异质结材料的发展历程以及相关应用领域的最新进展, 最后评述了磁电异质结材料发展的挑战和前景展望.

关键词: 磁电效应, 磁电异质结, 磁电传感器, 磁电器件

PACS: 75.85.+t, 77.84.Lf, 85.80.Jm

DOI: 10.7498/aps.67.20180856

1 引言

多铁性材料具有两种或两种以上铁性^[1-4]: 铁磁性(磁场响应产生磁极化)、铁电性(电场响应产生电极化)以及铁弹性(应力响应产生应变). 磁电材料是一种典型的多铁材料, 其具备的磁电效应是指在外加磁场下产生电极化的改变(正磁电效应)或者在外加电场下产生磁矩的改变(逆磁电效应), 即磁有序和铁电有序的相互耦合. 磁电材料由于蕴含丰富的物理效应以及在多功能电子器件方面的应用前景而受到国内外科研工作者的广泛关注, 成为近年来材料、物理和信息学科中的研究热点.

1894年, 法国物理学家 Pierre Curie 首先从理论上提出了本征磁电效应的概念, 随后 Dzyaloshinskii Astrov 于 1961 年在反铁磁材料 Cr_2O_3 单晶中观察到了磁电效应. 然而, 单相磁电材料的居里温度远远低于室温, 使得它们在室温附近的磁电效应普遍不高, 导致磁电材料的发展和应用停滞不前. 1972年, van Suchtelen 首次提出由铁磁和铁电

元件组成的磁电复合材料的概念, 解决了单相材料中电-磁有序难以耦合的难题, 这种复合材料可以通过应力/应变传递实现铁电相和铁磁相之间的耦合^[5,6]. 当磁场作用于复合材料时, 磁致伸缩相产生磁致伸缩应变, 应变通过界面耦合传递给压电相, 进而压电相由于压电效应产生介电极化. 由于磁电复合材料具有耦合磁电效应, 科学家们在 $\text{Ba-TiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_3$ 和铁氧体- $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 体系中研究了各种相连接结构(即 0-3, 1-3 和 3-3)^[7-11] 的颗粒磁电复合材料^[5,12,13], 但由于该类磁电复合材料的低磁电系数和高介电损耗, 使得其在传感器及其他应用方面具有很大的技术挑战性. 通过使用异质结材料代替颗粒混相复合材料, 磁电材料所面临的发展障碍终于得以攻破^[14,15]. 2001年, Ryu 等设计了具有 $4.7 \text{ V}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$ 的高磁电系数的 PZT/Terfenol-D 异质结材料, 远高于文献报道的任何颗粒混相复合材料最高值^[12,15], 并且该异质结材料具有远高于室温的居里温度, 掀起了国际上磁电异质结材料的研究热潮.

* 国家自然科学基金(批准号: 51602156, 51790492)、江苏省自然科学基金青年项目(批准号: BK20160824)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 30916011104, 30916011208)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yjwang@njust.edu.cn

2 磁电异质结的发展

2.1 层状磁电异质结

随着层状磁电异质结的发展, 目前报道的层状磁电异质结有以下三种^[5,12,16-20]: 1) 磁性铁氧体(即 CFO, NFO)和压电陶瓷(即 PZT); 2) 磁性合金(即 Terfenol-D, Ni, Metglas)和压电聚合物/陶瓷/单晶(即 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$, $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$); 3) 磁性合金、叉指电极和压电纤维(即 PZT, PMN-PT, PZN-PT). 如何提高磁电异质结材料的磁电系数, 可以从以下三个方面考虑: 1) 复合相的基本材料参数(介电常数、磁导率、弹性刚度以及压电和压磁系数)^[21-24]; 2) 复合相的体积/厚度比^[19,25-27]; 3) 铁磁、铁电层的

层状耦合模式^[5,6,25,27-32].

根据磁致伸缩相磁化方向和压电相极化方向, 层状磁电异质结可以分为四种基本结构: L-T 结构、L-L 结构、T-T 结构、T-L 结构. 由于 L-T 结构、L-L 结构的磁电复合材料具有更低的退磁效应和更高的磁-电耦合, 使得大量的理论和实验研究的着重点都是 L-T 结构、L-L 结构的层状磁电异质结^[33-38].

2017年, Dong 等^[39]设计制备了 L-T 结构的一维磁电异质结, 其由(011)取向的 PMN-PT 单晶纤维和退火处理后的 Metglas 纤维复合而成, 如图 1(a)所示. 该磁电异质结利用激光退火后的 Metglas 拥有很高的品质因素以及一维磁电异质结具有很大的磁感应强度, 获得了准静态下 $22.92 \text{ V}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$ 和谐振态下 $7000 \text{ V}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$ 的磁

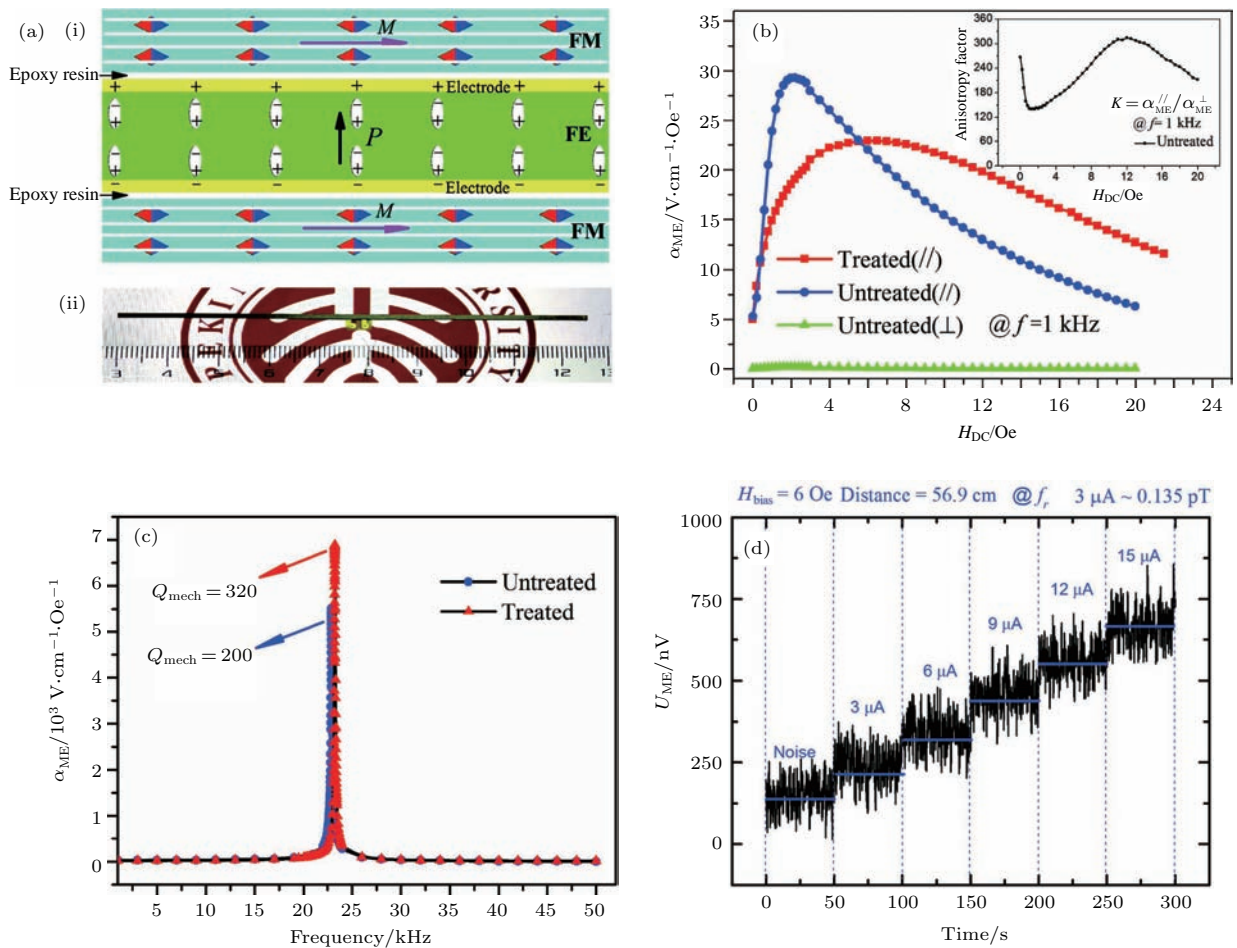


图1 一维层状磁电异质结的(a)-(i)结构示意图和(a)-(ii)实物图; (b) 准静态下的磁电系数和各向异性因子(插图)随偏置磁场的变化; (c) 谐振态下的磁电系数随偏置磁场的变化; (d) 响应 $1.35 \times 10^{-13} \text{ T}$ 的弱阶跃交流磁场变化的磁电电压输出信号^[39]

Fig. 1. (a)-(i) The schematic view for the (1-1) laminated magnetoelectric composite and (a)-(ii) the prototype snapshot of the magnetoelectric sample; (b) magnetoelectric coupling coefficient and the anisotropy factor for untreated Metglas alloy (see the inset) as a function of the DC magnetic-field bias; (c) the frequency dependence of the magnetoelectric coupling coefficient; (d) magnetoelectric voltage output signal in response to an extremely weak step AC magnetic-field variation of $1.35 \times 10^{-13} \text{ T}$.

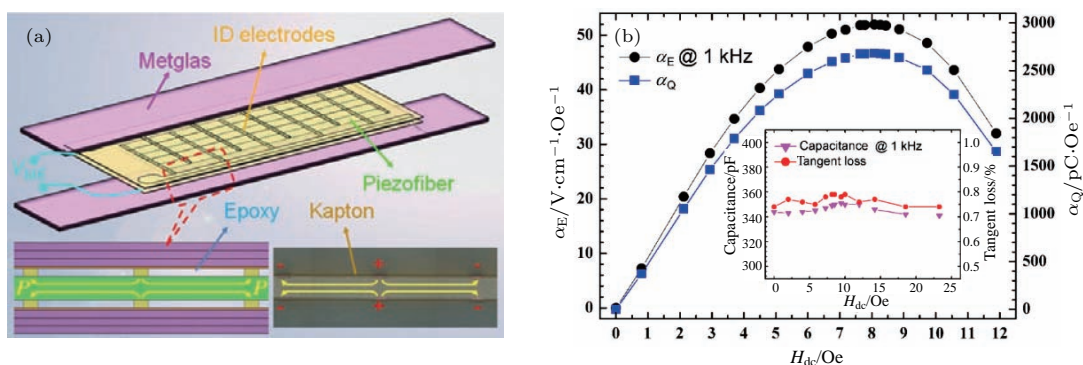


图2 (a) 多重推拉结构的Metglas/PMN-PT磁电异质结的结构示意图,由叉指电极/PMN-PT纤维芯复合材料和在芯复合材料底部和顶部的三层对称Metglas组成; (b) Metglas/piezofiber传感器的磁电电压系数和磁电电荷系数随偏置磁场的变化^[16]

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the Metglas/piezofiber configuration consisting of an interdigitated (ID) electrodes/PMN-PT fibers core composite and symmetric three-layer Metglas actuators on the bottom and top of the core composite; (b) the magnetic field dependence of the magneto-electric voltage coefficient and magneto-electric charge coefficient of the Metglas/piezofiber sensor^[16].

电系数,是以往文献所报道数值的7倍。并且该磁电异质结在谐振态和室温时可以实现 1.35×10^{-13} T 的弱磁场检测,如图1(b)—(d)。

另一方面,材料工作者也致力于研究设计新的层状耦合模式。Dong等^[40]设计了推拉结构的磁电复合材料,该结构是对L-L结构的一种改进,采用从中间向两端的极化方式对PMN-PT单晶进行极化,然后和Terfenol-D复合成推拉结构的层状磁电异质结。2013年,Bihurin等^[41]报道了一种层状磁电异质结,其磁致伸缩层和压电层均以厚度剪切模式工作,这种类型的磁电耦合定义为S-S (sheer-shear) 结构。然而,S-S结构层状磁电异质结的谐振频率很高(高达几兆赫),磁致伸缩层中伴随的涡流损耗会使磁致伸缩层的磁机械耦合衰减,从而严重削弱磁电效应,因此S-S结构的磁电异质结只适合在准静态下工作。Liu等^[42]从理论上分析对比了S-S结构、L-T结构层状异质结材料在准静态时的磁电系数(包括磁电电压、电场和电荷系数),由于S-S结构的磁致伸缩层和压电层的磁机械耦合和机电耦合程度较高,使得S-S结构的异质结材料表现出比L-T结构更强的磁电效应。

2011年,Wang等^[16]设计制备了多重推拉结构的Metglas/PMN-PT磁电异质结,如图2(a)所示。该磁电异质结在准静态下具有52 V/(cm·Oe)的高磁电电场系数和2680 pC/Oe的磁电电荷系数,如图2(b)所示。这种高磁电耦合性能的产生是由于使用了平面内叉指电极代替了传统层状磁电

异质结平行板电容器的结构。

2.2 薄膜磁电异质结

近年来,Ryu课题组^[43-45]采用真空颗粒喷射(GSV)法室温沉积Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃(PZT)与激光辐射局部热处理相结合的方法制备PZT厚膜。图3(a)为真空GSV沉积PZT厚膜原理图。PZT颗粒与Metglas衬底高速碰撞,使得破碎变形颗粒有效排列并且填充孔隙,从而形成具有高致密度的PZT膜。PZT颗粒的部分动能转化为结合能,使得粒子与衬底间的耦合增强,更大的界面耦合有利于有效的应变传递和磁电耦合。图3(b)为激光辐射局部热处理的原理图,通过激光退火诱导了PZT薄膜的结晶,解决了实现薄膜与Metglas衬底界面相容性的挑战。

2018年,Ryu课题组^[44]继续采用GSV结合激光局部退火的方法将PZT厚膜沉积在柔性Ni箔上,制备了PZT/Ni的磁电异质结。这种PZT/Ni磁电异质结表现出高度增强的自偏置磁电耦合系数——3.15 V/(cm·Oe),是以往文献报道的同类材料中的最高值。

为了进一步满足磁电子器件小型化、阵列化及柔性可穿戴的新应用要求,微纳薄膜磁电异质结在硅衬底上的集成研究也是一个重要的发展方向^[46-50]。目前,虽然薄膜异质结具有原子级别的耦合界面,但是其耦合效应能与块体磁电异质结材料相比拟的薄膜材料至今尚未报道^[47]。这主要由

于传统的刚性衬底对薄膜磁电异质结的强夹持效应, 大大降低了其磁电耦合性能. 针对这一关键技术难题, 目前主要有两种研究思路: 1) 引入缓冲层, 从而释放衬底机械夹持作用并同时可诱导磁、电两相薄膜的取向生长; 2) 减薄衬底的厚度, 可最有效地降低基片对薄膜的机械夹持作用, 提高磁电耦合性能.

最常见的薄膜磁电异质结的制备方法为物理气相沉积法和溶胶凝胶旋涂法^[51-54]. 微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 是一种基于半导体制造技术发展的融合了腐蚀、光刻、硅微加工、精密机械加工和非硅微加工的加工方式, 是一项具有极大应用前景的高新技术. 薄膜磁电异质结和 MEMS 的整合有望实现高灵敏度、高空间分

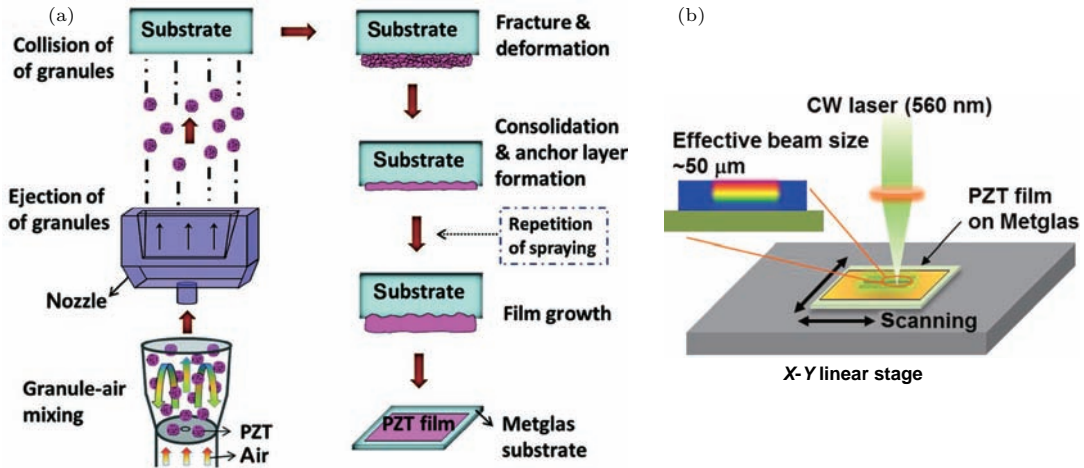


图3 (a) GSV 喷雾沉积 PZT 膜的原理图^[45]; (b) Metglas 上沉积的 PZT 薄膜激光退火原理^[43]

Fig. 3. (a) Schematic illustration of PZT film growth by GSV deposition technique^[45]; (b) schematic of laser annealing of deposited PZT film on Metglas^[43].

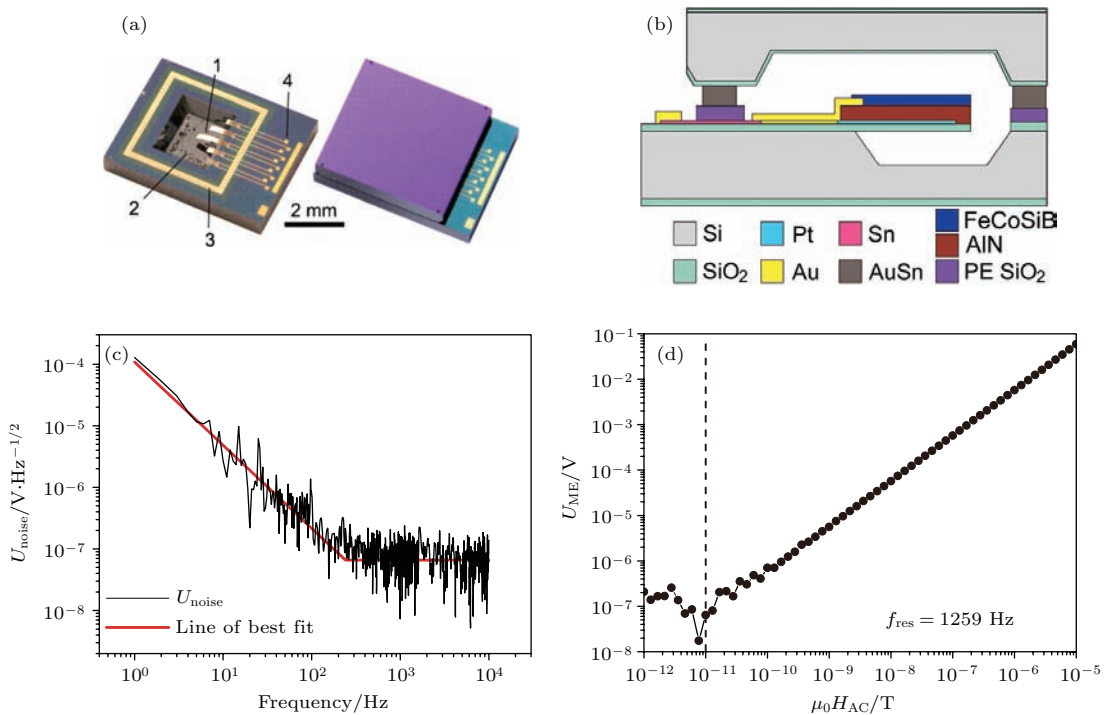


图4 (a) MEMS 磁电异质结的实物图 (1 为磁电悬臂梁, 2 为蚀刻槽, 3 为带状线, 4 为接合焊盘)^[56]; (b) 真空封装 MEMS 磁电异质结的横截面^[56]; (c), (d) 结合电荷放大器的磁电传感器的性能^[59]

Fig. 4. (a) Photographs of a sensor element with (1) cantilevers, (2) etch groove, (3) bond frame, and (4) bond pads prior to and after capping^[56]; (b) cross-sectional sketch of the vacuum encapsulated MEMS sensor^[56]; (c), (d) performance of magnetoelectric sensor operated with a charge amplifier^[59].

辨率、低成本传感器的小型化^[55,56]. 德国基尔大学研究人员报道了基于薄膜磁电异质结的MEMS传感器^[55,57,58], 使用表面微加工工艺在直径为150 mm的Si(100)晶圆上制造由SiO₂/Ti/Pt/AlN/Cr/FeCoSiB复合薄膜组成的悬臂梁, 如图4(a)和图4(b)所示^[56], 微型磁电悬臂梁厚度为4 μm, 横向尺寸为0.2 mm × 1.12 mm, 明显小于最先进的厘米级传感器的尺寸. 随后, 该研究组进一步引入反铁磁相MnIr, 利用其交换偏置效应在零偏置磁场作用下的谐振态磁电系数达到96.7 V/(cm·Oe), 探测灵敏度可以达到10 pT/√Hz, 如图4(c)和图4(d)所示^[59]. 但是其性能仅限于谐振态, 探测频率的单一化也难以推动薄膜磁电异质结的实际应用.

3 磁电异质结的器件应用

3.1 磁场传感器

美国国家标准和技术研究所在《磁传感器总结与展望》中强调了基于磁电异质结材料的新型磁传感器研究的重要意义, 指出其具有灵敏度高、体积小、成本低、功耗小的优点, 有望打破超导量子干涉仪、磁通门、霍尔探头等传统磁场传感器的市场统治地位, 在医学检测、智能交通、无线传感网、国防建设等领域获得广泛应用^[26].

3.1.1 被动式探测交流磁传感器

在2008—2012的五年里, Wang等^[60,61]设计了多推拉结构的Metglas/叉指电极/压电纤维层状磁电异质结和低噪声电荷放大器, 用于检测低频弱磁场的变化, 如图5(c)所示. 磁电传感器对磁场变化的感知能力由响应激励磁场的输出信号和不存在激励磁场时的信号噪声两者共同决定^[62,63], 此外磁电异质结的性能和检测电路的参数对等效磁噪声也有一定的影响. 因此, 必须考虑噪声源的种类和分布, 并且在此基础上对检测电路和层压板设计进行优化, 从而降低等效磁噪声. 通常, 电压检测和电荷检测都可以用来采集和放大由磁电异质结检测到的弱磁场信号, 但是以低噪声电荷放大器为核心的电荷模式电路更适用于多推拉结构的Metglas/piezofiber层状磁电异质结. 图5(g)展示了电荷模式检测电路的原理图, 电路中存在各种噪

声源^[64]. 图5(h)展示了Metglas/piezofiber传感器和低噪声电荷放大器(JFET 2SK369)检测电路中各种噪声源在不同频率下的分布, 磁电异质结的介电损耗噪声和直流电阻噪声以及电荷放大器的电流噪声是总噪声的主要来源, 并且1 Hz频率下, 介质损耗噪声是直流电阻和电流噪声的两倍. 因此想要获取高灵敏度的磁场传感器, 需要从以下3个方面对磁电型磁传感器进行改进.

1) 制备技术改进^[16,21,22,26,65-72]. 层压板的磁电系数受到界面耦合性能的显著影响^[12,23], 因此优化界面结合层的机械性能和介电性能至关重要(即叉指电极和压电纤维之间的界面, 如图5(d)所示). Wang等^[65]提出了采用旋转涂胶的简易方法优化块体异质结材料的复合工艺, 在磁电异质结材料制备技术上取得突破, 很好地解决了块体磁电异质结材料界面力学与电学传导问题, 降低了粘结层引入的高介电损耗, 从而使块体磁电异质结材料的介电损耗降低了约一个数量级(见图5(d)和图5(e)). 同时使用苯乙烯型环氧树脂(1264, USA)代替其他商业化环氧树脂, 虽然叉指电极/压电纤维芯复合材料的电容和磁电电荷系数会略微降低, 但其介电损耗也会同时降低从而带来更低的等效磁噪声. 制备出的磁电异质结材料在准静态下磁电耦合系数高达52 V/(cm·Oe), 结合低频放大电路在1 Hz下的灵敏度为5 pT/√Hz.

2) 检测电路优化^[61,64]. 为了减少来自检测电路的电子噪声源, 基于各种运算放大器(如AD795, LTC6240, LMC6040, JFET 2SK369)^[61]设计了几种不同的检测方案. 研究表明, 连接到JFET 2SK369电路的Metglas/piezofiber磁电传感器的噪声相对于LMC6040电路降低了50%. 特别是频率高于1 Hz时, 光谱噪声密度显著降低. 这种性能优化主要得益于在检测电路方案的第一阶段使用较低噪声, 较高电压的运算放大器以及使用更大的反馈电阻器.

3) 使用高性能压电单晶. PMN-PT, PZN-PT等压电单晶具有极高的纵向压电系数(2000 pC/N)和低介电损耗(≥ 0.005)^[73], 为利用巨磁电效应和超低等效磁噪声结合以实现高磁场灵敏度提供了基础. 研究表明, 基于PMN-PT或PZN-PT单晶纤维的磁电复合材料的探测灵敏度是PZT基复合材料的3—4倍^[16,22].

虽然通过优化制备技术和检测电路可以实现很低的等效磁噪声, 然而进一步降低单个磁电传感器元件的等效磁噪声则愈加困难. 材料工作者设计了串联或并联的传感器阵列, 实现了更低的等效磁噪声和更高的探测灵敏度 [74,75]. 2012年, Li等 [74]

通过并联四个 Metglas/PMN-PT 传感器单元, 在准静态下实现了 6500 pC/Oe 的磁电电荷系数以及 3.6 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的等效磁噪声, 但是传感器阵列会导致器件体积增大, 因此后续的研究需要注重传感器阵列的尺寸优化.

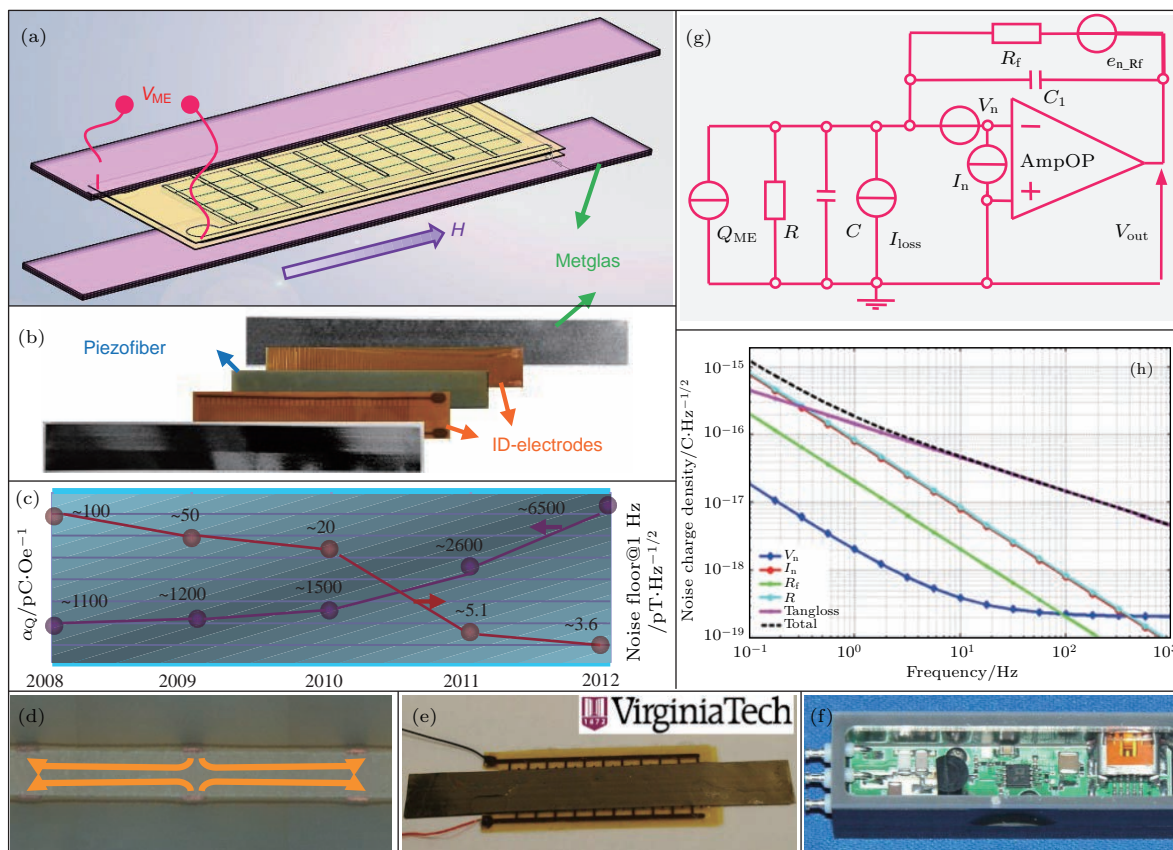


图5 (a) 多推拉结构的磁电复合材料的结构图和 (b) 层状磁电异质结的实物图; (c) 总结了 2008—2012 年多推拉结构磁电传感器在频率为 1 Hz 时的磁电电荷系数和磁噪声的变化趋势; (d) 在压电芯复合材料中的纵向极化推拉结构元件的光学显微图; 完整的传感器检测单元包括 (e) 多推拉结构的 Metglas/piezofiber 磁电复合材料和 (f) 低噪声电荷放大器组成; (g) 磁电传感器的基本检测电路和噪声模型; (h) 由 Metglas/PZT 纤维层压板和基于电荷放大器的 2SK369 组成的传感器单元的噪声分布 [60]

Fig. 5. (a) Schematic diagram of a multi-push-pull mode magneto-electric composite and (b) exploded view photo of constituent components; (c) a summary on the development of magneto-electric coefficient and noise floor at 1 Hz for the multi-push-pull mode magneto-electric sensors; (d) optical micrograph of a longitudinally poled push-pull element in the core composite; photographs of the complete sensor detection unit consisting of (e) a multi-push-pull mode Metglas/piezofiber magneto-electric composite and (f) a low noise charge amplifier; (g) basic detection circuit and noise model for a magneto-electric sensor and (h) an example of noise contributions of a sensor unit comprised of a Metglas/PZT-fiber laminate and 2SK369 based charge amplifier [60].

3.1.2 主动式探测交流磁传感器

磁场传感器应用往往在 mHz—Hz 频率范围内, 低频下本征 1/f 噪声大, 会严重降低传感器的探测灵敏度. 为解决这一问题, 材料科学家们采用多物理场耦合调制的思路, 将低频待测磁场调制到高频区甚至谐振态: 相对于传统的被动式探测, 额外主动对磁电异质结材料施加一个频率和幅度固定的交变激励磁场 $H_m \sin \omega_m t$ (如图 6 (d) 所示) 或

者激励电场 $E_m \sin \omega_m t$ (如图 6 (e) 所示), 利用谐振增益特性来提高薄膜磁电异质结材料的低频磁电响应, 同时结合高频区的低噪声特性来解决薄膜磁电异质结材料灵敏度不高的问题. 相对传统的被动式探测, 多物理场调制模式的优势是有可能降低环境振动噪声, 提高信噪比, 即提高探测灵敏度, 如图 6 (b) 所示.

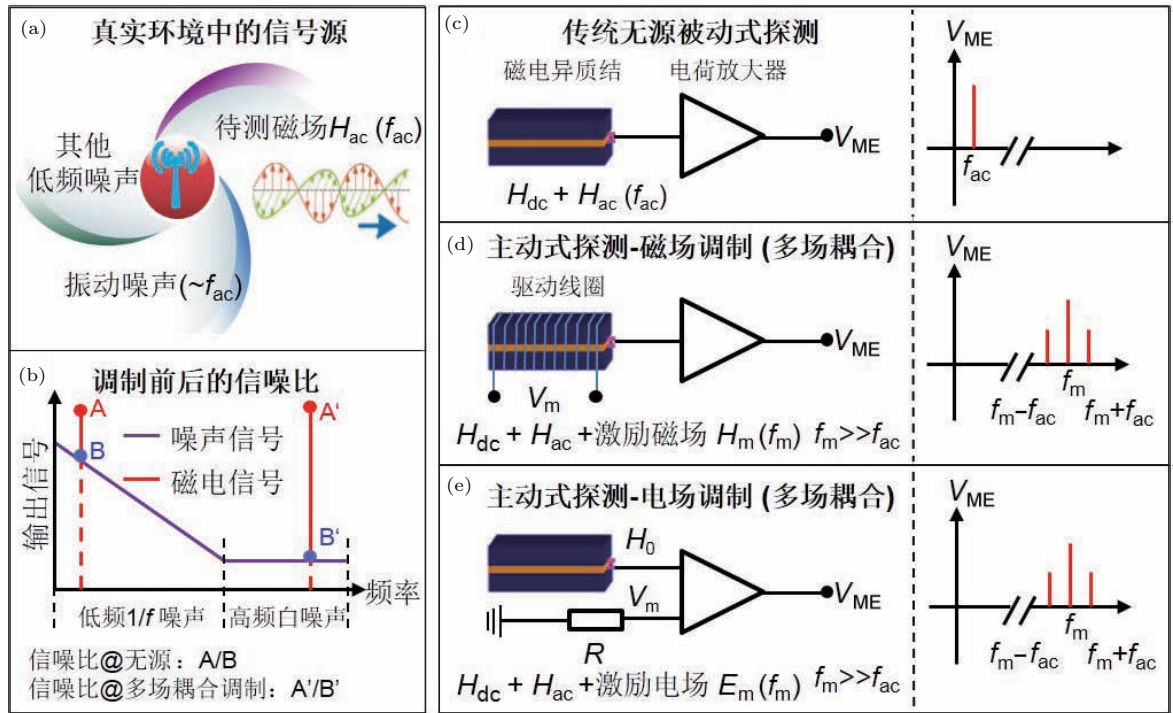


图6 (a) 实际环境中传感器可能接收到的信号源; (b) 多物理场调制提高探测灵敏度的物理依据; (c) 传统的被动式探测模式及磁电信号的示意图; (d), (e) 主动式探测模式及信号示意图: 通过外加 (d) 高频磁场和 (e) 高频电场与被测磁场耦合调控至高频段的低噪声区

Fig. 6. (a) Signal sources that the sensor may receive in the actual environment; (b) physical basis for increasing the detection sensitivity with multiphysics modulation; (c) schematic diagram of traditional passive detection pattern and magnetoelectric signals; (d) and (e) schematic diagram of active detection pattern and signal: the low-noise region is adjusted to a high frequency band by applying (d) a high-frequency magnetic field and (e) a high-frequency electric field coupled with the measured magnetic field.

目前, 国际上关于磁电异质结材料多物理场耦合调控研究还处于起步阶段, 利用高频磁场耦合调控来探测低频弱磁信号报道甚少^[76-78], 而利用高频电场调控更是鲜有报道^[79-81].

传统的被动式探测模式是基于磁电异质结的线性效应, 对准静态磁场直接探测(如图6(c)), 磁场激励调制模式的磁电耦合物理依据是磁致伸缩的非线性效应, 所施加的激励磁场 H_m 与待测低频磁场 H_{ac} 产生乘积项, 磁电异质结材料在高频下输出一个和频-差频分量信号(如图6(d)). 2011年, Zhuang等^[76]制备了基于多推拉结构 Metglas/PZT/Metglas 和 Metglas/PMN-PT/Metglas 磁电异质结材料的磁场传感器, 并且利用非线性调制技术分析磁传感器的信号传输能力以及噪声水平. 显然, 非线性调制能力的提高是这种调制方法的重要目标, 因为它可以提高抑制低频环境振动噪声的能力, 允许直流信号测量, 从而降低等效磁噪声. 2013年, Liu等^[78]通过磁场调制实现了 Metglas/PMN-PT 磁电异质

结中准静态磁场的检测, 该磁电型传感器在低频下展现了极好的性能——10 mHz, 100 mHz 和 1 Hz 的灵敏度分别为 200 pT, 150 pT 和 20 pT. 这种磁电传感器的优势是在检测低频磁场 ($f < 1$ Hz) 时, 可以通过变频避免一些内部 (1/f, 焦耳噪声) 和外部 (振动噪声) 的噪声, 从而提高其磁场敏感度.

电场激励调制模式的磁电耦合物理依据是磁致伸缩材料由于低频待测磁场产生的应力调控磁电异质结的谐振频率, 使 f_m 频率下的机械阻抗 (或者导纳) 发生周期性变化, 从而产生了激励电场 E_m 和待测低频磁场 H_{ac} 的乘积项, 磁电异质结材料在高频下输出一个和频-差频分量信号(如图6(e)). 2013年, Zhuang等^[81]通过电场调制的原理分析了磁场传感器的噪声来源, 获取了 1 Hz 下 $70 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度. 2015年, Salzer等^[79]对比了磁场调制和电场调制的输出信号和信噪比. 虽然两者的信噪比都得到了很大的提高, 但是磁场调制的探测极限低至电场调制的十分之一, 且二者都由于转换损耗带来了附加噪声. 考虑器件小型化和

低能消耗的趋势, Hayes等^[80]于2016年报道了一种基于薄膜磁电异质结的磁场传感器, 该磁电异质结通过电场可以实现10 Hz磁场下10 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的探测灵敏度.

3.1.3 直流磁传感器

以往关于磁电效应的报道主要集中在交流磁场检测上, 而用于磁异常检测的磁传感器对直流磁场检测要求非常高. 2006年, Dong等^[82]报道了一种L-T结构的Terfenol-D/PZT异质结材料, 并且结合一个环绕在异质结材料表面的携带交流电流(I_{ac})的螺旋线圈组成直流磁场传感器. 直流磁场信号检测的原理如下: 1) 通过附加线圈施加0.01—1 Oe的恒定弱交流磁场激励磁电异质结沿其长度方向振动; 2) 通过检测小的感应电压变化记录 H_{DC} 的微小变化. 先前的实验研究表明, 在0—300 Oe的范围内, 磁电异质结的磁电电压系数与外加偏置磁场之间呈线性关系. Terfenol-D/PZT磁场传感器在谐振态下可以实现低至0.1 mOe的直流磁场检测. 随后, Gao等^[69]又制备了基于Metglas/PZT异质结的直流磁场传感器, 其在1 Hz下

可以检测到6 nT的弱直流磁场.

虽然磁电耦合效应的直流磁场依赖性使得磁电异质结可用于直流磁场传感器, 但是在一定频率下驱动磁电传感器探测直流磁场, 需要施加额外的交流磁场, 而产生交流磁场的功率消耗过大以及较低的灵敏度使得磁电传感器探测直流磁场具有巨大挑战. 此外, 磁电传感器在低频下存在较大的 $1/f$ 噪声, 近年来也有大量的研究工作致力于通过降低磁电器件的机电谐振频率或降低低频下的等效磁噪声来提高10 Hz交流场的灵敏度. 然而, 进一步降低磁电传感器的机电谐振频率将导致传感器尺寸过大, 违背了器件小型化的应用要求.

2013年, Nan等^[83,84]报道了一种基于AlN/(FeGaB/Al₂O₃) × 10磁电纳米谐振器的自偏置磁电传感器, 如图7(a)所示. 图7(b)展示了纳机电系统(NEMS)磁电传感器的工作机理, 由于磁电纳米谐振器的导纳会随直流磁场变化并且峰值导纳和直流磁场呈线性关系, 因此该纳米谐振器可以用于直流磁场检测. NEMS磁电传感器实现了在无屏蔽环境下300 pT的磁场探测下限, 并且其在零偏

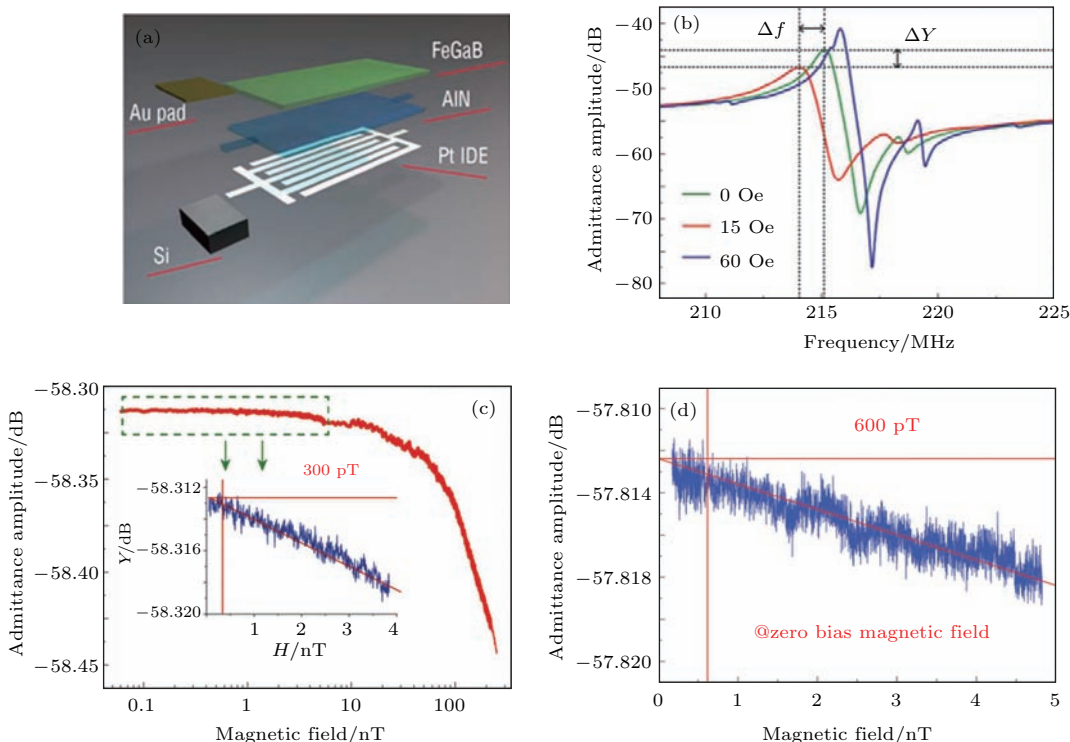


图7 (a) 磁电异质结的结构示意图; (b) 不同直流偏置磁场时, 磁电异质结的导纳随频率的变化; (c) 偏置磁场为5 Oe时, 磁场传感器的灵敏度和线性度, 表现为导纳随偏置磁场的变化; (d) 磁无屏蔽环境下, 磁场传感器在零偏置磁场下的灵敏度和线性度^[83]

Fig. 7. (a) Schematic of the layered structure of the NEMS magnetic field sensor; (b) admittance curve of the NEMS sensor at various bias DC magnetic fields; (c) the sensitivity and linearity of the magnetic field sensor, showing the admittance amplitude as a function of a minute varied DC bias magnetic field superimposed a fixed DC field of 5 Oe; (d) the sensitivity and linearity of the magnetic field sensor at zero bias magnetic field in a magnetically unshielded environment^[83].

置磁场条件下也具有 600 pT 的磁场探测下限, 如图 7(c) 和图 7(d) 所示. 该自偏置磁电传感器可用于检测直流和低频交流磁场. 并且这种新型超小型化自偏置 NEMS 磁电传感器在 215 MHz 频率下工作时具有超高灵敏度, 易于与 CMOS 工艺集成制备出一种新型小型化、超灵敏的射频 NEMS 磁强计.

众所周知, 磁通门传感器由于能够探测 0.5 nT—100 μ T 的直流磁场, 在市场上得到了广泛的应用, 但是由于磁芯材料周期性饱和的要求, 其功耗往往很高. 受到磁通门传感器结构和工作机理的启发, Chu 等 [63,85] 于 2017 年报道了一种新型的梭形无偏置磁电型磁通门传感器 (MEFGS).

图 8(a) 和图 8(b) 为传统磁通门传感器的结构, 类似于这种结构, MEFGS 被设计为具有激励

线圈和一对压电传感元件的梭形结构, 如图 8(c) 和图 8(d) 所示. 当恒流 I_{ac} 通过励磁线圈时, 在磁芯内可激发一个闭环高频磁场 H_{ac} 和磁通 Φ_0 , 由于磁致伸缩效应, 会导致梭形两半的对称拉长和收缩, 从而产生梭形结构的纵向振动模式, 输出的差分信号将为零. 然而, 一旦出现直流磁场, 梭形的一半磁场增加, 而另一半则减小, 这会导致两半结构不对称拉长和收缩, 从而导致梭形结构的初始纵向振动模式趋向于纵向弯曲模式, 如图 8(d) 中的虚线所示, 则磁通门输出的差分信号将是非零的. 当外加直流磁场为 1 nT 时, MEFGS 输出信号的相对变化与以往报道值相比提高了 4—5 倍, 该 MEFGS 在磁导航、磁医学诊断等磁异常检测方面具有很大的应用前景.

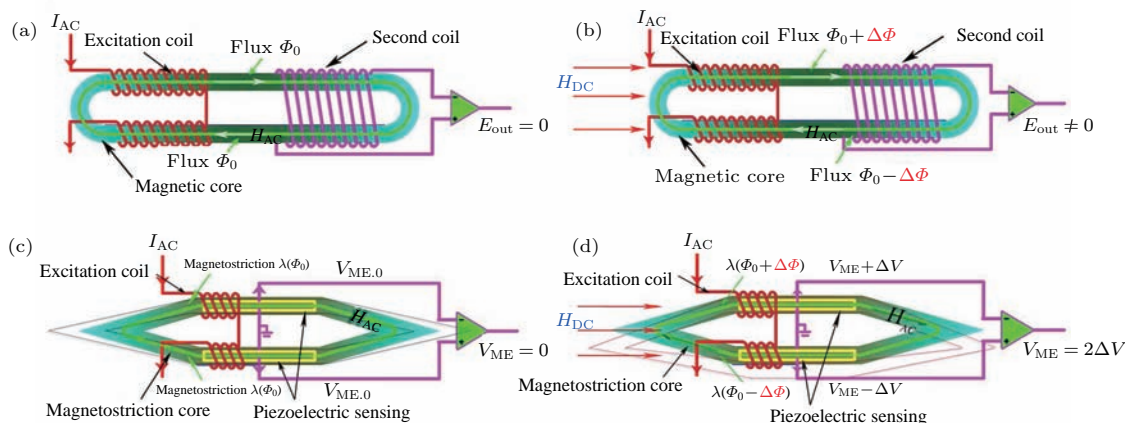


图 8 传统磁通门传感器和磁电型磁通门传感器的原理图 [85] (a) 和 (b) 为传统磁通门传感器的结构; (c) 和 (d) 为磁电型磁通门传感器的结构; (a) 和 (c) 为不存在直流磁场 (H_{DC}) 的情况; (b) 和 (d) 为存在直流磁场 (H_{DC}) 的情况
 Fig. 8. Schematic representation of the conventional flux gate sensor and the proposed magnetoelectric flux gate sensor [85]. The structure of (a), (b) a race-track flux gate sensor and (c), (d) the proposed magnetoelectric flux gate sensor; (a), (c) in the absence of DC magnetic field (H_{DC}); (b), (d) in the presence of DC magnetic field (H_{DC}).

3.2 能量收集器

近年来, 人们发现磁电异质结在能量收集方面有着巨大的应用前景. 能量收集器是一种可以收集环境中的风能、太阳能、振动能和磁能的器件. 我们日常生活中的电缆周围存在大量的杂散磁场, 其被认为是对人类身体有害的噪声, 而磁电型能量收集器则可以利用磁电效应实现磁能向电能的转换. 目前, 已经有很多专家学者利用磁电异质结设计出各种能量收集器.

Ryu 等 [86] 制备了 PMN-PZT 单晶纤维复合材料和 Ni 箔复合而成的磁电异质结, 该磁电异质结

可用于收集日常生活中电缆所产生的磁噪声. 当施加和日常环境中的磁噪声相近的 60 Hz、500 μ T 的激励磁场时, 该磁电能量收集可以产生高达 34 V 的开路电压, 使用电容器存储产生的电能可以为 35 个商用高强度的发光二极管供电, 如图 9(b) 所示.

随后 Ryu 课题组 [87] 又制备了 Fe-Ga 基磁电能量收集器, 是由具有良好结晶取向的 PMN-PZT 压电单晶纤维复合材料和具有很强织构的 Fe-Ga 合金复合而成, 如图 10(a) 所示. 在 60 Hz、700 μ T 的磁场下, 磁电能量收集器具有很高的直流功率密度, 为 3.32 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-3}$, 比先前报道的 Ni 基磁电能量收集器高约 430%, 如图 10(b) 所示, 大的能量输

出得益于单晶纤维复合材料具有很强的各向异性以及 Fe-Ga 合金的高织构性. 该磁电能量收集装置

于电缆附近时产生的电能可以为 174 个商用高强度的发光二极管供电.

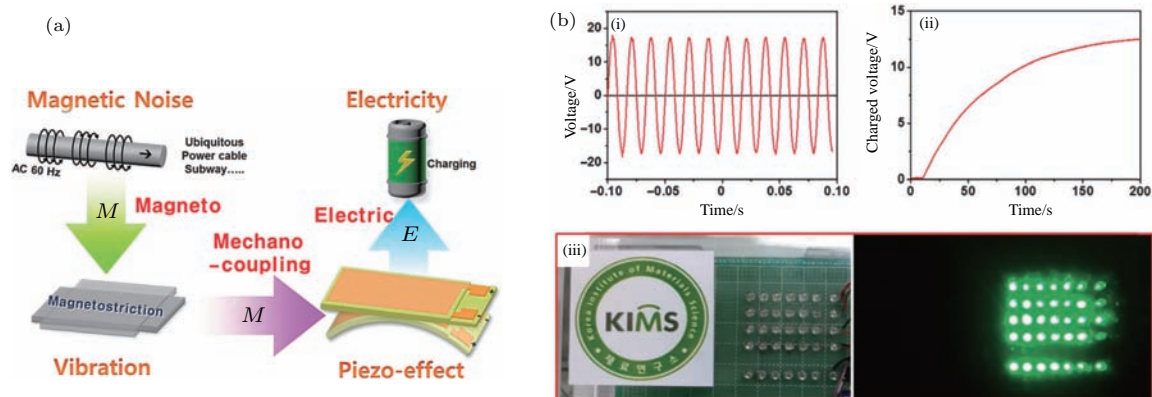


图 9 (a) 磁电能量收集器的工作原理图; (b) 磁电能量收集器的性能, (i) 施加 $f_{ac} = 60 \text{ Hz}$, $H_{ac} = 500 \mu\text{T}$ 的激励磁场, 磁电能量收集可获得 $34 V_{pp}$ 的开路电压; (ii) 磁电能量收集具有很高的功率, 可在整流 3 min 后完全充电 $220 \mu\text{F}$ 的电容器; (iii) 利用电容器中的充电电源, 它能够为 35 个商用高强度发光二极管供电 [86]

Fig. 9. (a) Sequential interactions of magneto-mechano-electric generation. (b) magneto-mechano-electric generator performance of the anisotropic $\langle 011 \rangle$ single crystal fiber composite with d_{32} ode under a small magnetic field of noise level: (i) under the condition of 60 Hz, and $H_{ac} \sim 500 \mu\text{T}$, the maximum generated voltage is $\sim 34 V_{pp}$ ($\sim 12.4 V_{rms}$); (ii) the power from the magneto-mechano-electric generator was high enough to fully charge a $220 \mu\text{F}$ electrolytic capacitor after rectifying for 3 min; (iii) using the charged power in the capacitor, it was able to turn on 35 commercial high intensity LEDs with a turn on/off frequency of $\sim 1 \text{ Hz}$ [86].

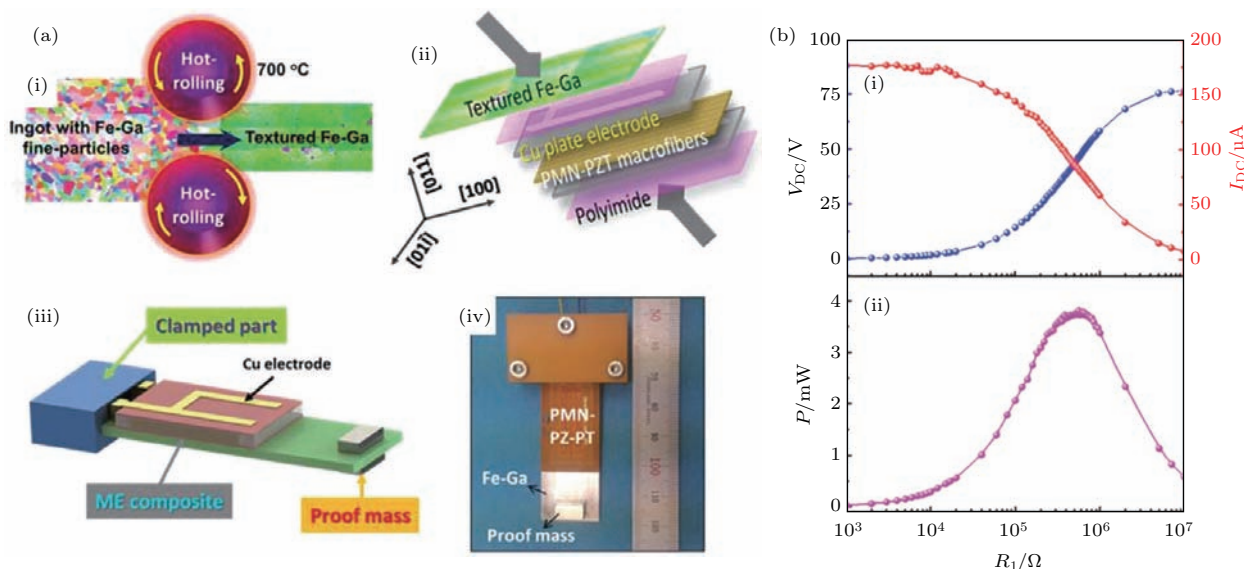


图 10 (a) (i) Fe-Ga 合金的制备, (ii) 织构 Fe-Ga 和 PMN-PZ-PT 单晶的键合, (iii), (iv) 基于磁电复合悬臂结构的磁机电发动机的结构示意图和实物图; (b) 整流后的输出直流电压和直流电流以及计算出的各种负载电阻下的功率 [87]

Fig. 10. Fabrication of textured Fe-Ga and design of the magneto-mechano-electric generator [87]: (a) (i) Rolling and subsequent annealing of polycrystalline Fe-Ga to obtain textured Fe-Ga, (ii) bonding of textured Fe-Ga and PMN-PZ-PT SCMF layers, (iii), (iv) schematic and photo of the magneto-mechano-electric generator designed with the magnetoelectric composite cantilever structure; (b) rectified output DC voltage and DC current and the calculated generated electric power at various load resistances.

3.3 磁电型天线

天线可以实现交流电流和电磁波辐射的相互转换, 在智能手机、平板电脑、射频识别系统、雷达

等电子器件中起着关键作用. 实现先进天线制备的关键挑战之一在于尺寸小型化, 紧凑型天线依赖于电磁波共振, 其尺寸通常大于电磁波波长的十分之一, 这种局限性使得实现小型化天线和天线阵列具

有很大的挑战性, 特别是在电磁波波长很大且在甚高频(30—300 MHz)和超高频(0.3—3 GHz)下工作的情况, 严重限制了移动平台上的无线通信系统和雷达的发展. 因此为进一步减小天线尺寸, 需要研发新的电磁波辐射和接收机制来制备天线.

磁电异质结中强应变介导的磁电耦合能够有效实现磁与电之间的能量传递. 磁电型天线中的体声波激发铁磁薄膜的磁化振荡, 从而导致电磁波的辐射; 反之这种天线感知电磁波的磁场产生压电电压输出. 如果磁电异质结材料能够在无线电频率(RF)下实现动态的强磁电耦合, 则可以实现一种新型的电磁波接收和发射机制^[88,89]. 2017年, Nan等^[90]报道了基于谐振磁电异质结中电磁波与体声波的强磁电耦合诱导的声发射和接收, 实现了一种可在甚高频和超高频工作的纳米磁电型天线. 这种磁电天线(尺寸小到千分之一波长)在性能没有衰退的情况下表现出比最先进的紧凑型天线1—2个数量级的小型化, 使其在便携式无线通信系统具有巨大应用前景.

3.4 磁电型存储器

在电路理论中, 从四个基本电路变量(电荷 q 、电流 I 、电压 v 和磁通 φ)之间的线性关系定义了三个著名的基本元件(电阻、电容和电感). 基于磁电效应的第四个基本元件称为换能器, 与线性元件相对应的还有四个非线性模元: 忆阻器、忆容器、忆感器和忆耦器, 这些元件为下一代电子设备提供了扩展电路功能的潜力.

磁电材料中的磁极化和铁电极化相互作用使得四态存储在单个器件中得以实现. 2016年, Sun等^[91]制备了基于Ni/PMN-PT/Ni的忆耦器并且利用忆耦器的功能实现了多态非易失性存储器, 如图11(a). 图11(b)展示了异质结的磁电系数与平面内直流磁场的函数关系. 测试磁电系数之前, 先预设饱和和极化 P_s 的方向向上或向下, 磁电系数的大小和正负取决于磁化与极化的相对方向: 当 P_s 的方向固定时, 可以通过反转磁化方向来实现对磁电系数符号/大小的调控; 当磁化方向保持不

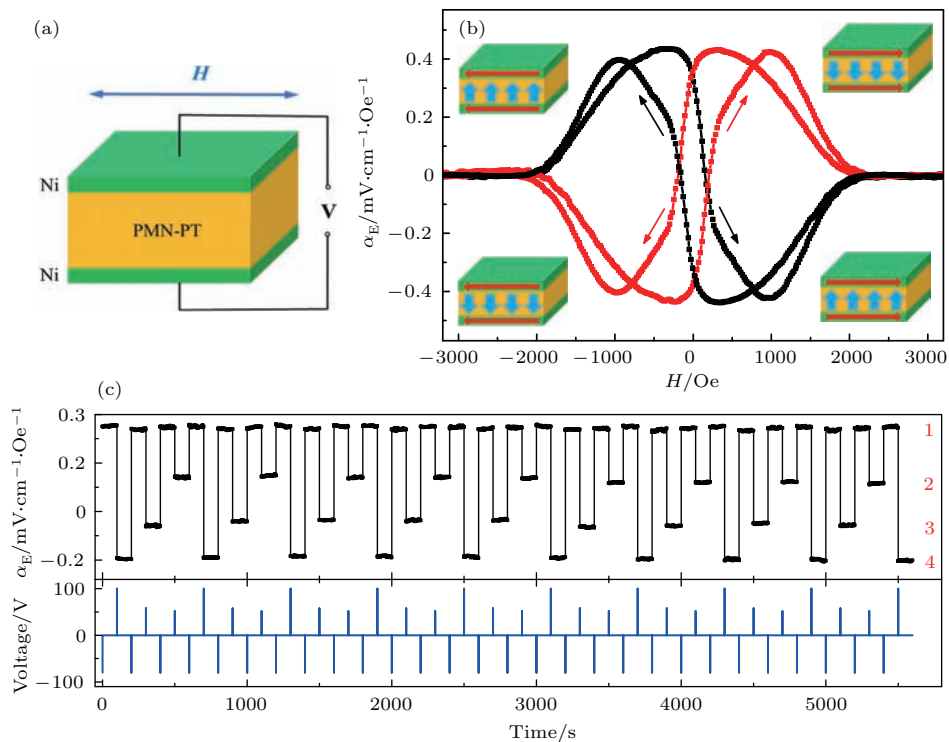


图11 基于Ni/PMN-PT/Ni忆耦器的多态非易失性存储器^[91] (a)存储器件的结构图和测试图; (b)磁电电压系数关于偏置磁场的变化曲线, 其PMN-PT层分别预置为 $+P_s$ 和 $-P_s$ 的状态; (c)在零偏置磁场时, 通过施加选择性电压脉冲(-80, 100, 58和52 V), 在每个电压脉冲(10 ms)后, 测量100 s的 α_E , 从而实现可重复多态转换

Fig. 11. Multilevel nonvolatile memory based on the Ni/PMN-PT/Ni memristor^[91]: (a) The structure of the device and the measurement configuration; (b) the magnetoelectric voltage coefficient α_E as a function of dc magnetic field with the PMN-PT layer prepoled to $+P_s$ and $-P_s$, respectively; (c) repeatable multilevel switch of α_E by applying selective voltage pulses (-80, 100, 58, and 52 V), in the zero-dc-bias magnetic field. After each voltage pulse (10 ms) α_E is measured for 100 s.

变时, 可以通过上下电极施加电场完全或部分反转极化来控制磁电系数的状态, 这就可以实现存储器的非易失性能. 使用电压脉冲(-80, 100, 58 和 52 V) 可以很好地控制磁电系数的状态, 多次循环中反复得到从正到负的四种明显分离的状态, 如图 11(c) 所示, 证明了基于 Ni/PMN-PT/Ni 的多态非易失性存储器的可行性.

4 挑战与展望

综上所述, 近 20 年来磁电异质结材料得到了蓬勃发展, 在基础研究和应用研究领域都取得诸多进展, 但是满足终端客户需求的商品化器件尚未问世, 如今磁电异质结材料的发展正处于基础研究的“恶梦时期”(如图 12 所示), 如何在现有的研究基

础上寻找新的研究思路和解决方案, 进一步推动磁电异质结材料的市场价值、实现磁电异质结的商品化生产已经刻不容缓. 目前, 限制磁电异质结材料应用前景的最主要技术难题包括:

1) 传统的块体磁电异质结材料阵列具有较高的磁电耦合效应, 但是往往体积巨大, 与半导体工艺难以兼容;

2) 将基于磁电异质结的器件推向实用化仍需大量工作, 需要优化器件的结构设计与系统集成, 提高器件的整体性能和信噪比等^[92].

近年来, 可穿戴设备和物联网的发展需求推动了柔性电子器件的发展^[36,93,94], 制备柔性磁电异质结是磁电异质结材料发展的一个趋势, 并且薄膜异质结材料有望与现代微电子工业结合, 发展小型化、阵列化集成器件^[55,56].

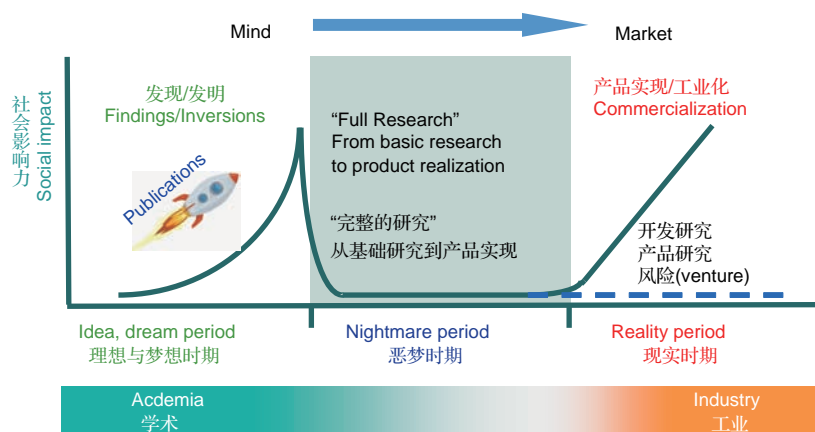


图 12 基础研究走向市场的必经之路

Fig. 12. The essential path for basic research to the market.

参考文献

- [1] Dong S, Liu J M 2010 *Physics* **39** 714 (in Chinese) [董帅, 刘俊明 2010 物理 **39** 714]
- [2] Li X G, Xu X Q, Qian T 2005 *J. Sichuan Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **42** 43 (in Chinese) [李晓光, 许雪芹, 钱天 2005 四川大学学报(自然科学版) **42** 43]
- [3] Dong S, Xiang H J 2014 *Physics* **43** 173 (in Chinese) [董帅, 向红军 2014 物理 **43** 173]
- [4] Yu P, Zhang J X 2013 *Prog. Phys.* **33** 369 (in Chinese) [于浦, 张金星 2013 物理学进展 **33** 369]
- [5] Nan C W, Bichurin M I, Dong S X, Viehland D, Srinivasan G 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 031101
- [6] Jin J Z, Lu S G, Chanthad C, Zhang Q M, Hague M A, Wang Q 2011 *Adv. Mater.* **23** 3853
- [7] van Run A M J G, Terrell D R, Scholing J H 1974 *J. Mater. Sci.* **9** 1710
- [8] Benveniste Y 1995 *Phys. Rev. B* **51** 16424
- [9] Nan C W 1994 *Phys. Rev. B* **50** 6082
- [10] Srinivasan G, Rasmussen E T, Gallegos J, Srinivasan R, Bokhan Y I, Laletin V M 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214408
- [11] 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]
- [12] Fiebig M 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** R123
- [13] Priya S, Islam R, Dong S X, Viehland D 2007 *J. Electroceram.* **19** 147
- [14] Ryu J, Carazo A V, Uchino K, Kim H E 2001 *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* **40** 4948
- [15] Ryu J, Priya S, Uchino K, Kim H E 2002 *J. Electroceram.* **8** 107
- [16] Wang Y J, Gray D, Berry D, Gao J Q, Li M H, Li J F, Viehland D 2011 *Adv. Mater.* **23** 4111
- [17] Zhang Y, Gao Y J, Hu C, Tan X Y, Qiu D, Zhang T T, Zhu Y D, Li M Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 167501 (in Chinese) [张源, 高雁军, 胡诚, 谭兴毅, 邱达, 张婷婷, 朱永丹, 李美亚 2016 物理学报 **65** 167501]

- [18] 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]
- [19] Bichurin M I, Petrov V M, Averkin S V, Liverts E 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 053905
- [20] Bichurin M I, Petrov V M, Averkin S V, Liverts E 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 053904
- [21] Li M H, Berry D, Das J, Gray D, Li J F, Viehland D 2011 *J. Am. Ceram. Soc.* **94** 3738
- [22] Gao J Q, Das J, Xing Z P, Li J F, Viehland D 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 084509
- [23] Liu G, Nan C W, Cai N, Lin Y H 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2660
- [24] Bichurin M I, Kornev I A, Petrov V M, Tatarenko A S, Kiliba Y V, Srinivasan G 2001 *Phys. Rev. B* **64** 094409
- [25] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **51** 794
- [26] Wang Y J, Hasanyan D, Li M H, Gao J Q, Li J F, Viehland D 2013 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **60** 1227
- [27] Dong S X, Li J F, Viehland D 2003 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **50** 1253
- [28] Wang Y J, Hasanyan D, Li J F, Viehland D, Luo H S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 202903
- [29] Hasanyan D, Gao J, Wang Y, Viswan R, Li M, Shen Y, Li J, Viehland D 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 013908
- [30] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 3382
- [31] Gao J Q, Shen Y, Wang Y J, Finkel P, Li J F, Viehland D 2011 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **58** 1545
- [32] Petrov V M, Srinivasan G, Bichurin M I, Galkina T A 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 063911
- [33] Wang Y J, Or S W, Chan H L W, Zhao X Y, Luo H S 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 124511
- [34] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5305
- [35] Jia Y M, Luo H S, Zhao X Y, Wang F F 2008 *Adv. Mater.* **20** 4776
- [36] Zhai J Y, Dong S X, Xing Z P, Li J F, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 083507
- [37] Wang Y J, Gray D, Berry D, Gao J Q, Li J F, Viehland D, Luo H S 2011 *Phys. Status Solidi R* **5** 232
- [38] Jiao J 2013 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [焦杰 2013 博士学位论文 (上海: 中国科学院大学)]
- [39] Chu Z, Shi H, Shi W, Liu G, Wu J, Yang J, Dong S 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606022
- [40] Dong S X, Zhai J, Bai F, Li J F, Viehland D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 062502
- [41] Bichurin M I, Petrov R V, Petrov V M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 092902
- [42] Liu G X, Zhang C L, Dong S X 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 074104
- [43] Palneedi H, Maurya D, Kim G Y, Priya S, Kang S J L, Kim K H, Choi S Y, Ryu J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 012904
- [44] Palneedi H, Maurya D, Geng L D, Song H C, Hwang G T, Peddigari M, Annapureddy V, Song K, Oh Y S, Yang S C, Wang Y U, Priya S, Ryu J 2018 *ACS Appl. Mater. Inte.* **10** 11018
- [45] Palneedi H, Maurya D, Kim G Y, Annapureddy V, Noh M S, Kang C Y, Kim J W, Choi J J, Choi S Y, Chung S Y, Kang S L, Priya S, Ryu J 2017 *Adv. Mater.* **29** 1605688
- [46] Ramesh R, Spaldin N A 2007 *Nat. Mater.* **6** 21
- [47] Ma J, Hu J M, Li Z, Nan C W 2011 *Adv. Mater.* **23** 1062
- [48] 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]
- [49] He H C, Lin Y H, Nan C W 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 1136 (in Chinese) [何泓材, 林元华, 南策文 2008 科学通报 **53** 1136]
- [50] Zheng R K, Li X G 2013 *Prog. Phys.* **33** 359 (in Chinese) [郑仁奎, 李晓光 2013 物理学进展 **33** 359]
- [51] He H C, Wang J, Zhou B P, Nan C W 2007 *Adv. Funct. Mater.* **17** 1333
- [52] He H C, Zhou J P, Wang J, Nan C W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 052904
- [53] Deng C Y, Zhang Y, Ma J, Lin Y H, Nan C W 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 074114
- [54] Zhou J P, He H C, Zhang Y, Deng C Y, Shi Z, Nan C W 2007 *Appl. Phys. A: Mater.* **89** 553
- [55] Marauska S, Jahns R, Greve H, Quandt E, Knöchel R, Wagner B 2012 *J. Micromech. Microeng.* **22** 065024
- [56] Marauska S, Jahns R, Kirchhof C, Claus M, Quandt E, Knoechel R, Wagner B 2013 *Sensor. Actuat. A: Phys.* **189** 321
- [57] Jahns R, Zabel S, Marauska S, Gojdka B, Wagner B, Knöchel R, Adelung R, Faupel F 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 052414
- [58] Greve H, Woltermann E, Jahns R, Marauska S, Wagner B, Knoechel R, Wuttig M, Quandt E 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 152503
- [59] Lage E, Kirchhof C, Hrkac V, Kienle L, Jahns R, Knoechel R, Quandt E, Meyners D 2012 *Nat. Mater.* **11** 523
- [60] Wang Y J, Li J F, Viehland D 2014 *Mater. Today* **17** 269
- [61] Wang Y J, Gao J Q, Li M H, Shen Y, Hasanyan D, Li J F, Viehland D 2014 *Philos. Trans. A: Math. Phys. Eng. Sci.* **372** 20120455
- [62] Palneedi H, Annapureddy V, Priya S, Ryu J 2016 *Actuators* **5** 9
- [63] Chu Z, PourhosseiniAsl M, Dong S 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 243001
- [64] Gao J Q, Wang Y J, Li M H, Shen Y, Li J F, Viehland D 2012 *Mater. Lett.* **85** 84
- [65] Wang Y J, Gray D, Berry D, Li M H, Gao J Q, Li J F, Viehland D 2012 *J. Alloy. Compd.* **513** 242
- [66] Wang Y J, Gray D, Gao J Q, Berry D, Li M H, Li J F, Viehland D, Luo H S 2012 *J. Alloy. Compd.* **519** 1

- [67] Das J, Gao J, Xing Z, Li J F, Viehland D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 092501
- [68] Wang Y J, Gray D, Berry D, Li J F, Viehland D 2012 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **59** 859
- [69] Gao J Q, Gray D, Shen Y, Li J F, Viehland D 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 153502
- [70] Wang Y J, Li M H, Hasanyan D, Gao J Q, Li J F, Viehland D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 092905
- [71] Yang Y D, Gao J Q, Wang Z G, Li M H, Li J F, Das J, Viehland D 2011 *Mater. Res. Bull.* **46** 266
- [72] Li M H, Wang Z G, Wang Y J, Li J F, Viehland D 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 082404
- [73] Luo H S, Jiao J, Li X B, Zhao X Y, Xu Q, Yue Q W 2014 *Mod. Phys.* **26** 36 (in Chinese) [罗豪甦, 焦杰, 李晓兵, 赵祥永, 许晴, 岳晴雯 2014 现代物理知识 **26** 36]
- [74] Li M H, Gao J Q, Wang Y J, Gray D, Li J F, Viehland D 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 104504
- [75] Xing Z P, Zhai J Y, Gao J Q, Li J F, Viehland D 2009 *IEEE Electr. Device Lett.* **30** 445
- [76] Zhuang X, Sing M L C, Cordier C, Saez S, Dolabdjian C, Shen L, Li J F, Li M, Viehland D 2011 *IEEE Sens. J.* **11** 2266
- [77] Jahns R, Greve H, Woltermann E, Quandt E, Knöchel R 2012 *Sensor. Actuat. A: Phys.* **183** 16
- [78] Liu Y T, Jiao J, Ma J S, Ren B, Li L Y, Zhao X Y, Luo H S, Shi L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 212902
- [79] Salzer S, Höft M, Knöchel R, Hayes P, Yarar E, Piorra A, Quandt E 2015 *Proc. Eng.* **120** 940
- [80] Hayes P, Salzer S, Reermann J, Yarar E, Röbisch V, Piorra A, Meyners D, Höft M, Knöchel R, Schmidt G, Quandt E 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 182902
- [81] Zhuang X, Lam Chok Sing M, Dolabdjian C 2013 *IEEE Trans. Magn.* **49** 120
- [82] Dong S X, Zhai J Y, Li J F, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 082907
- [83] Nan T X, Hui Y, Rinaldi M, Sun N X 2013 *Sci. Rep.* **3** 1985
- [84] Li M H, Matyushov A, Dong C Z, Chen H H, Lin H, Nan T X, Qian Z Y, Rinaldi M, Lin Y H, Sun N X 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 143510
- [85] Chu Z, Shi H, PourhosseiniAsl M J, Wu J, Shi W, Gao X, Yuan X, Dong S 2017 *Sci. Rep.* **7** 8592
- [86] Ryu J, Kang J E, Zhou Y, Choi S Y, Yoon W H, Park D S, Choi J J, Hahn B D, Ahn C W, Kim J W, Kim Y D, Priya S, Lee S Y, Jeong S, Jeong D Y 2015 *Energ. Environ. Sci.* **8** 2402
- [87] Annapureddy V, Na S M, Hwang G T, Kang M G, Srimadras R, Palneedi H, Yoon W H, Hahn B D, Kim J W, Ahn C W, Park D S, Choi J J, Jeong D Y, Flatau A B, Peddigari M, Priya S, Kim K H, Ryu J 2018 *Energ. Environ. Sci.* **11** 818
- [88] Yao Z, Wang Y E, Keller S, Carman G P 2015 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **63** 3335
- [89] Domann J P, Carman G P 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 044905
- [90] Nan T, Lin H, Gao Y, Matyushov A, Yu G, Chen H, Sun N, Wei S, Wang Z, Li M, Wang X, Belkessam A, Guo R, Chen B, Zhou J, Qian Z, Hui Y, Rinaldi M, McConney M E, Howe B M, Hu Z, Jones J G, Brown G J, Sun N X 2017 *Nat. Commun.* **8** 296
- [91] Shen J X, Shang D S, Chai Y S, Wang Y, Cong J Z, Shen S P, Yan L Q, Wang W H, Sun Y 2016 *Phys. Rev. Appl.* **6** 064028
- [92] Nan C W 2015 *Sci. Sin. Technol.* **45** 339 (in Chinese) [南策文 2015 中国科学: 技术科学 **45** 339]
- [93] Palneedi H, Yeo H G, Hwang G T, Annapureddy V, Kim J W, Choi J J, Trolier McKinstry S, Ryu J 2017 *APL Mater.* **5** 096111
- [94] Zong Y, Zheng T, Martins P, Lanceros Mendez S, Yue Z, Higgins M J 2017 *Nat. Commun.* **8** 38

SPECIAL TOPIC — Multiferroicity: Physics, materials, and devices

Magnetoelectric heterostructure and device application*

Yang Na-Na Chen Xuan Wang Yao-Jin[†]

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 30 April 2018; revised manuscript received 1 June 2018)

Abstract

The magnetoelectric (ME) heterostructure is composed of ferromagnetic and ferroelectric materials. The heterostructural ME effect originates from piezoelectric effect in the ferroelectric component and magnetostrictive effect in the ferromagnetic component. The magnetoelectric heterostructure has higher magnetoelectric coupling coefficient and lower dielectric loss than the particulate composites, and thus leading to several promising applications such as in the magnetic field sensors, the energy harvesters, antenna and memory devices. In this paper, we review the recent research progress in ME heterostructure for device applications, and present a development course of ME heterostructure. Finally, we also summarize the challenges of developing the ME heterostructure and point out its perspectives.

Keywords: magnetoelectric effect, magnetoelectric heterostructure, magnetic sensor, magnetic device

PACS: 75.85.+t, 77.84.Lf, 85.80.Jm

DOI: 10.7498/aps.67.20180856

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51602156, 51790492), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20160824), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. 30916011104, 30916011208).

[†] Corresponding author. E-mail: yjwang@njust.edu.cn