

多铁性磁电器件研究进展

俞斌 胡忠强 程宇心 彭斌 周子尧 刘明

Recent progress of multiferroic magnetoelectric devices

Yu Bin Hu Zhong-Qiang Cheng Yu-Xin Peng Bin Zhou Zi-Yao Liu Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 157507 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180857

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180857>

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  $\text{BiMnO}_3$  电控磁性的理论研究

Theoretical study on magnetoelectric effect in multiferroic tetragonal  $\text{BiMnO}_3$

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  $\text{HoMnO}_3$  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  $\text{HoMnO}_3$  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

## 多铁性磁电器件研究进展\*

俞斌 胡忠强<sup>†</sup> 程宇心 彭斌 周子尧 刘明<sup>‡</sup>

(西安交通大学电子与信息工程学院, 电子陶瓷与器件教育部重点实验室与国际电介质研究中心, 西安 710049)

(2018年5月1日收到; 2018年5月29日收到修改稿)

多铁性材料可以实现力、电、磁等多物理场之间的相互耦合, 在小尺寸、快速响应和低功耗的磁电器件领域具有重要的应用前景. 在应用需求的推动下, 以具有磁电耦合效应的多铁性材料为基础的磁电器件在设计、微纳加工和性能优化等方面的研究取得了持续的进展. 本文简要介绍了基于磁电耦合效应的几种原型器件的最新进展, 包括可调谐电感、滤波器、磁电存储器、能量回收器、磁电传感器和磁电天线等, 分析总结了各种磁电器件的工作原理及其性能表现, 讨论了当前多铁性磁电器件研究所面临的问题和挑战, 并提出了改进磁电器件性能的研究方向.

**关键词:** 磁电耦合效应, 可调滤波器, 磁电传感器, 磁电存储器

**PACS:** 75.85.+t, 77.55.Nv, 85.70.-w, 84.30.Vn

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180857

## 1 引言

多铁性材料在多功能电子器件中具有巨大的应用潜力, 引起了人们的广泛关注<sup>[1-4]</sup>. 多铁性材料同时具备包括(反)铁电性、(反)铁磁性和(反)铁弹性等在内的两种或者两种以上的铁序, 并且不同铁序之间可以相互耦合, 从而实现不同序参量之间的相互调控, 如图1所示<sup>[5]</sup>. 其中, 人们最感兴趣的是铁电性和铁磁性之间的耦合<sup>[6,7]</sup>, 即通过磁电耦合效应实现磁场控制材料的电极化或电场诱导磁有序.

磁电耦合效应是指材料在外加磁场  $H$  的作用下产生电极化  $P$  响应, 或者在外加电场  $E$  下产生磁化  $M$  响应的性质:

$$P = \alpha H; \quad M = \alpha E / \mu_0. \quad (1)$$

(1) 式中  $\alpha$  是磁电耦合系数,  $\mu_0$  是真空磁导率. 其中电极化对外加磁场的响应定义为正磁电耦合效应, 具体表现为在材料上施加磁场来产生电压输出.

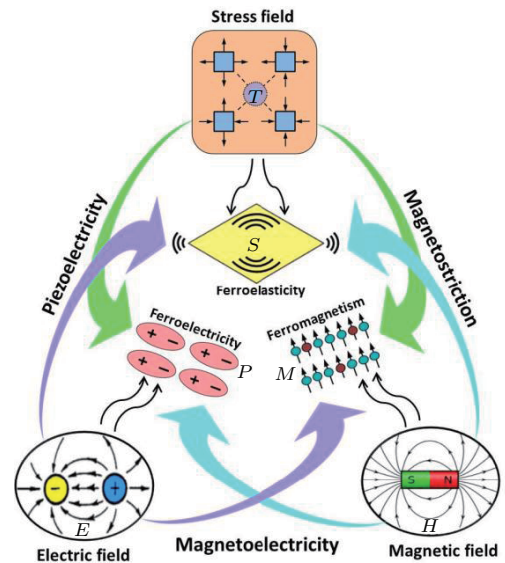


图1 铁性序参量之间的耦合及相互调控示意图, 其中,  $M$  是磁化,  $S$  是机械应变,  $P$  是铁电极化<sup>[5]</sup>

Fig. 1. Schematic illustration of magnetic-elastic-electric couplings in multiferroic materials, in which  $M$  is the magnetization,  $S$  is the mechanical strain, and  $P$  is the ferroelectric polarization<sup>[5]</sup>.

\* 国家自然科学基金(批准号: 51472199, 11534015)和111引智计划(批准号: B14040)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: zhongqianghu@xjtu.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: mingliu@xjtu.edu.cn

此外还存在逆磁电耦合效应, 即磁化对外加电场的响应, 这意味着电场可以改变材料磁性. 从材料成分来看, 多铁性磁电材料可分为两种类型: 单相<sup>[8-13]</sup>和复合材料<sup>[14-16]</sup>. 单相磁电材料在同一种材料内具有磁电耦合效应, 然而其室温磁电系数常常较弱, 很难满足实际应用的需求, 于是人们把更多的目光放在了复合材料上. 基于磁电复合材料的室温磁电耦合性能, 可望开发出可调微波器件、能量回收器、磁传感器、存储器等<sup>[17]</sup>器件, 如表 1 所列. 随着磁电复合材料的继续发展, 其在消费电子、工业、国防等领域的应用潜力得到了广泛认可, 人们的研究重点也从前期的理论预测、材料制备和性能研究等, 逐渐延伸到材料优化、器件设计与加工等方面<sup>[18,19]</sup>, 各种基于磁电耦合效应的新型磁电器件研究取得了一系列重要进展. 本文对包括可调电感、可调滤波器、磁电存储器、磁电能量回收器、磁电传感器、磁电天线等在内的多种新型磁电器件的发展过程进行回顾, 总结各种器件的工作原理及其特点, 讨论其面临的挑战和困难, 并对其未来发展做出展望.

表 1 不同磁电器件分类<sup>[17]</sup>  
Table 1. Different types of magnetic devices<sup>[17]</sup>.

磁电耦合形式	磁电器件
正磁电耦合	磁场传感器、电流传感器、变压器、回转器、能量回收器
逆磁电耦合	随机存储器、隧道结、可调电感器、可调滤波器、移相器、可调谐振器

## 2 磁电器件

### 2.1 可调谐电感

电感作为电子电路的三个基本组成部分之一, 被广泛用于电力传输、电压调节、微波和射频集成电路、通信等各种系统中. 大部分可调谐电感器由电磁铁/永磁体进行磁场调谐, 这些电磁铁/永磁体体积大、能量消耗大、噪音大、使用极不方便, 这严重限制了它们的应用价值. 近些年来, 人们致力于开发具有宽调谐性、高质量因数和低能耗的电场可调谐电感器. 2009年, Lou 等<sup>[20]</sup>报道了一种静电可调磁电感器, 由两层 Metglas 磁性带和一个沿厚度方向极化的锆钛酸铅 (PZT) 压电单晶片构成三明治结构的多铁性复合磁芯, 在其上绕制线圈

形成电感, 如图 2(a) 所示. 在 PZT 的极化方向上施加 0—12 kV/cm 的控制电场, 可以观察到电感值 ( $L$ ) 对电场变化显示出非常强的依赖性. 在不同频率下定义  $\Delta L/L_{\min}$  为电感的可调性, 对于 100 Hz, 100 kHz 和 5 MHz 的工作频率, 电感的最大变化分别约为 450%, 250% 和 50%, 如图 2(b) 所示, 而且随着电感的变化, 可调电感器的品质因数也随着外部电场的增加而显著提高. 高达 450% 的电感变化值是在当时报道的无源可调谐电感器中最大的电感调谐率, 且电感的功耗可以小到忽略不计. 这种电感和品质因数的可调性源于多铁性复合材料磁芯中的强磁电耦合效应, 是电场感应的磁导率变化而引起的. 值得注意的是, 高频下过大的涡流损耗严重限制了电感的工作频率、品质因数等性能.

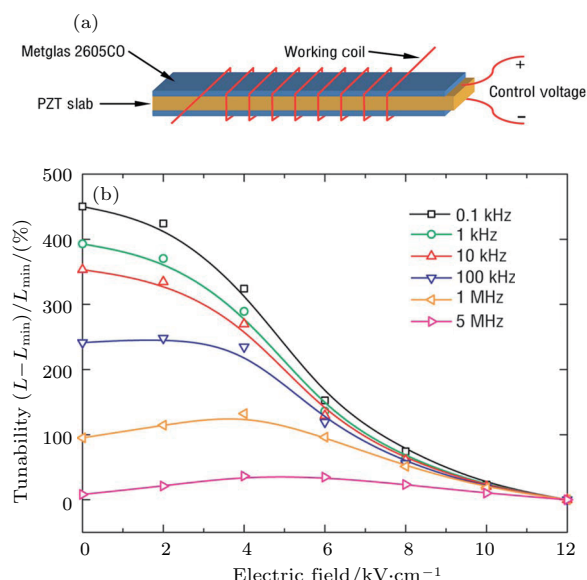


图 2 (a) 电场可调谐电感示意图; (b) 电感在不同频率和电场下的可调性<sup>[20]</sup>

Fig. 2. (a) Schematic diagram of an electric-field-tunable inductor; (b) inductance tunability of the magnetoelectric inductor at different frequencies and electric fields<sup>[20]</sup>.

基于此, Peng 等<sup>[21]</sup>在最近的工作中, 设计了用 Metglas/PMN-PT (铌镁酸铅) 多铁性复合材料构成的非易失性磁电可调电感器, 表现出较大的非易失性可调谐性, 在 10 kHz 和 1 MHz 下分别达到了 250% 和 120%. 其中 Metglas 磁性带和 PMN-PT 压电单晶片通过树脂直接粘贴耦合在一起, 没有解决应力传导效率低下的问题, 但是这项研究为实现高功率集成电子、射频系统的非易失性电可调器件提供了新途径. Gao 等<sup>[22]</sup>报道了一种含有 FeGaB/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 多层膜的集成磁电电感, 该器件采

用微纳加工技术制造, 然后转移到PMN-PT基板上, 电感在2—3.5 GHz的范围内表现出高达100%的可调谐性, 可望用于手机、电脑等多种无线信号之间的切换处理, 显示出良好的集成性和应用前景.

## 2.2 可调谐滤波器

可调滤波器是典型的微波信号处理器, 广泛应用于微波元件和雷达中, 以消除无用的微波信号和各类噪声<sup>[23–29]</sup>. 作为收发系统的基本组件之一, 对小尺寸、低插损的可调带通滤波器的需求一直在不断增长. 2008年, Fetisov和Srinivasan<sup>[30]</sup>首次报道了一种基于铁磁共振的钇铁石榴石-钽钛酸铅(YIG-PZT)双层电场可调谐微波带通滤波器, 该器件在电场为0—3 kV/cm时可获得125 MHz的频率调谐范围, 在6.5 GHz时插入损耗为5 dB. 该滤波器的中心频率只有2%的调谐范围, 但是这为可调微波器件的开发提供了全新的思路. Yang等<sup>[31]</sup>设计和制备了一种新型的钇铁石榴石/铌钨酸铅-钽钛酸铅(YIG/PZN-PT)异质结构可调带通滤波器, 具有磁场和电场双调谐性. 为了改善带通滤波器在静

微波中的高插损问题, 器件被设计成了T形微带结构, 在S波段具有0.98—1.64 dB的极低插入损耗, 如图3(a)所示. 带通滤波器通过较小的偏置磁场50—250 Oe (1 Oe = 79.5775 A/m)进行调谐时, 中心频率工作在190—840 MHz, 调谐率超过了50%; 使用电场进行调谐时, 获得了200 MHz的电场可调谐性, 约为工作频率的10%, 如图3(b)所示. 然而, YIG薄膜较低的磁致伸缩系数, 极大地限制了滤波器可调性能的发挥, 加之器件的制备方法, 品质因数也有待进一步提高. 但是, 该器件在小尺寸、低成本和低功耗的可调微波滤波器中还是显示出了巨大的应用前景. 最近, Lin等<sup>[32]</sup>报道了一个集成的磁场和电场双可调谐带通滤波器, 其磁电相是由旋转喷涂技术制备的NiZn铁氧体薄膜<sup>[33,34]</sup>, 并用微纳制造工艺在Si晶片上构建带通滤波器, 然后将器件转移到PMN-PT单晶衬底上进行电场调谐, 获得了1.5 GHz的磁场可调性和220 MHz的电场可调性. 然而, 由于耦合方式的原因, 该器件的插入损耗高达10 dB. 通过测试结果可以发现, 如果使用磁性薄膜直接生长在压电体表面, 可以得到更强的磁电耦合效应, 预计将获得更大的可调谐性.

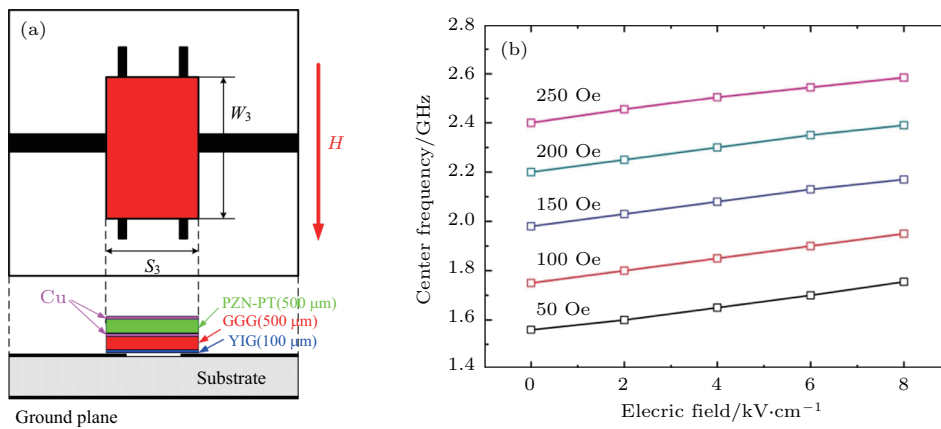


图3 (a) 一种可调带通滤波器的结构示意图; (b) 带通滤波器的中心频率随电场和磁场的变化<sup>[31]</sup>  
 Fig. 3. (a) Schematic of a magnetolectric band-pass filter; (b) center frequency of the band-pass filter as functions of electric field and magnetic field<sup>[31]</sup>.

微波可调带阻滤波器可用作现代通信系统子系统的重构, 占有非常重要的位置. 磁性材料和传输线的结合被广泛用于构成带阻滤波器<sup>[35–39]</sup>, 然而, 这些磁场调谐器件为达到正常工作状态通常需要较大的调谐功率, 限制了它们在便携式通信系统中的应用. Pettiford等<sup>[40]</sup>研究了YIG/PZT双层复合材料, 并制备了装载在传输线中磁电异质结构的带阻滤波器. YIG/PZT叠层被放置在微带

和地平面之间, 如图4(a)所示, 由于铁磁共振效应, YIG薄膜能够在谐振频率下吸收窄带功率. 沿微波传播方向或微带长度方向施加偏置磁场, 实现YIG/PZT叠层结构中铁磁共振频率的电压调谐, 从而形成电压可调的带阻滤波器, 其电场的可调谐范围约为40 MHz, 在5 GHz时具有约15 dB的峰值衰减, 如图4(b)所示. 最近, Yang等<sup>[41]</sup>报道了使用磁控溅射法制备的FeGaB/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>多层膜可调

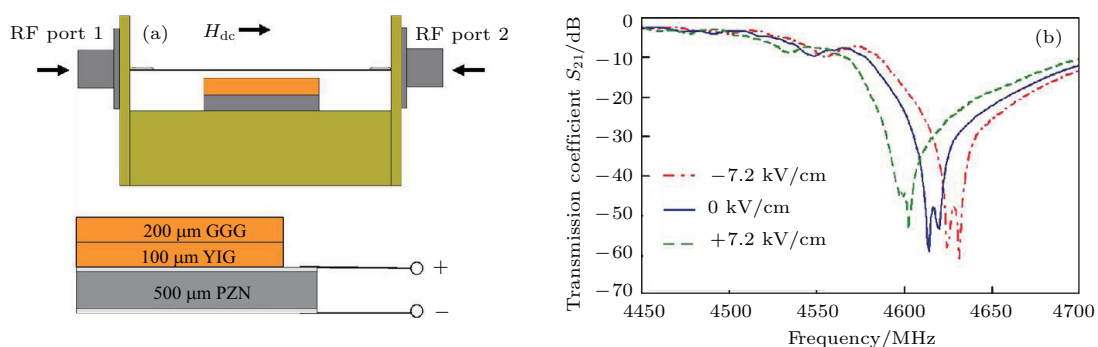


图4 (a) 原理示意图; (b) 带阻滤波器的正向传输系数  $S_{21}$ , 在  $\pm 7.2$  kV/cm 电场下可以实现约 40 MHz 的电调谐<sup>[40]</sup>

Fig. 4. (a) Schematic diagram of a tunable band-stop filter; (b) the forward transmission coefficient  $S_{21}$  of the band-stop filter, which achieves an electrical tuning of approximately 40 MHz at  $\pm 7.2$  kV/cm<sup>[40]</sup>.

带阻滤波器的原型. 与具有相同厚度的单层膜相比, 多层结构表现出较低的矫顽场和射频损耗. 滤波器的中心频率可以在较低的偏磁场下从 4.50 GHz 转换到 7.08 GHz, 这相当于超过了 55% 的可调谐性. 同时, 插入损耗最小仅为 0.5 dB, 对基于磁性金属薄膜的微波器件而言相当小, 可望成为低损耗射频应用的理想选择.

### 2.3 磁电存储器

现有的基于晶体管的随机存储器, 如静态随机存储器和动态随机存储器都是易失性的, 即当存储器未供电时其中的数据将丢失, 因此, 大量的功耗要用于保持空闲存储器单元中的数据. 随着芯片上晶体管数量的不断增加, 这种待机功耗也急剧增加, 极大地限制了存储芯片的进一步小型化和集成化<sup>[42]</sup>. 世界各国正投入巨资研发新型非易失性随机存储器技术, 主要包括铁电存储器、相变存储器、阻变存储器和自旋磁随机存储器等<sup>[43,44]</sup>. 其中, 磁随机存储器是最具产业化前景的下一代新型非易失性存储器之一. 该存储器采用磁性隧道结作为基本存储单元以及全新的自旋量子调控物理机理, 利用电子自旋调控磁矩取向来进行存储, 具有体积小、功耗低、访问速度快、非易失性、近无限次读/写操作和抗辐射能力强等优点, 特别适合空间科学技术和特殊领域的应用<sup>[45,46]</sup>. 此外, 它有可能作为中央处理单元的高速缓冲存储器, 或用于永久性数据存储. 现有的磁随机存储器技术中, 由非磁性层分隔开了两个磁性层, 其中一层的磁化可以被极化电流引起的自旋转移力矩 (STT) 翻转  $180^\circ$ <sup>[47,48]</sup>, 分别引起反平行和平行磁化相对应高电阻和低电阻

两种磁阻状态<sup>[49,50]</sup>. 然而, 写入电流产生的大量热损耗是限制磁随机存储器存储密度的主要障碍.

在多铁性磁电材料中, 磁化和极化的共存与耦合使得单个存储单元可以实现多种逻辑状态, 从而显著提高存储密度<sup>[51-55]</sup>. 同时, 结合铁电、磁随机存储器各自的优势, 可望制备新型电写磁读的非易失性随机存储器, 即磁电随机存储器 (MeRAM)<sup>[56]</sup>. 这种技术将提供更高的存储密度, 有效降低功耗, 并改善器件的热稳定性. 该存储器可以将基于各向异性磁阻 (AMR)、巨磁阻 (GMR) 或隧道磁阻 (TMR) 效应的层状磁阻元件集成在多铁性材料或压电/铁电层 (FE) 上<sup>[51,55,57-62]</sup>, 通过电场而不是电磁铁产生的磁场来控制磁阻, 其设计原理如图 5 所示<sup>[51]</sup>. Hu 等<sup>[51]</sup> 使用相场模拟, 实现了基于纳米结构的高性能磁阻随机存储器 (MRAM), 器件可实现高达 88 Gb/inch<sup>2</sup> 的超高存储密度, 功耗低至 0.16 fJ/bit, 在室温下的读写速度低于 10 ns, 且可以和互补金属氧化物半导体 (CMOS) 制造工艺完美兼容. 该器件为探索具有超低功耗、可室温操作和超高存储容量等优秀属性的存储器提供了一种新途径. 在实验方面, Bibes 课题组<sup>[55]</sup> 和 Ramesh 课题组<sup>[63]</sup> 分别报道了多种新型 MeRAM 材料和原型器件, 该类器件的原理相似, 即把多铁性材料层 (由铁电和反铁磁相组成) 中的磁电耦合和反铁磁层与铁磁层之间的界面交换偏置相结合, 通过电压控制改变磁化的开关状态, 实现磁化的确定性  $180^\circ$  的可逆翻转. 其中, 二进制信息通过底部铁磁层的磁化方向进行存储, 通过三层铁磁层的电阻读取, 并通过在多铁性材料层 (铁电-反铁磁层, FE-AFM) 上施加电压来写入.

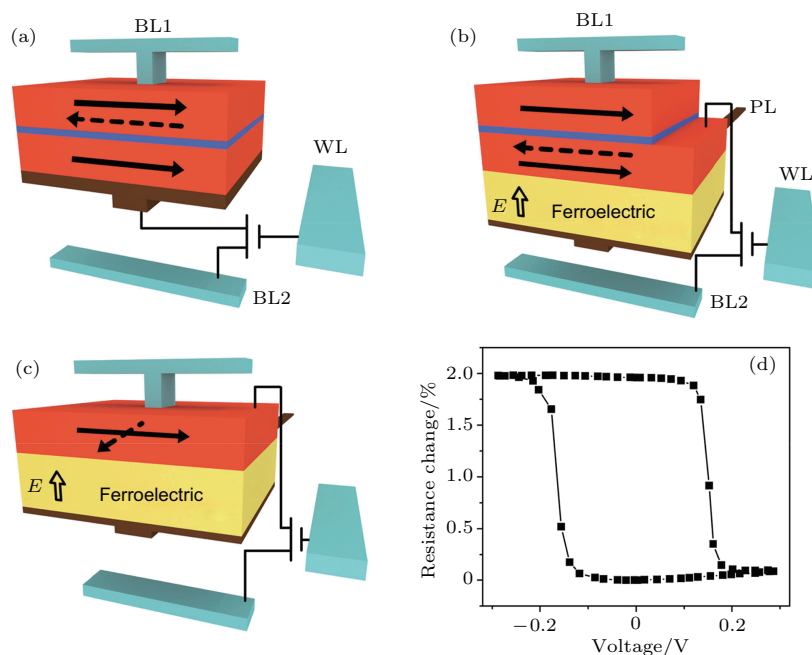


图5 几种电场调控磁阻器件的设计原理图 (a) STT-MRAM; (b) GMR 或 TMR 型 MeRAM; (c) AMR 型 MeRAM; (d) 基于 Ni-PMN-PT 异质结构的 AMR 型 MeRAM 中电阻率变化的滞回曲线 [51]  
 Fig. 5. Schematics of the bit cell design for: (a) STT-MRAM; (b) GMR or TMR-type MeRAM; (c) AMR-type MeRAM; (d) hysteric loop of resistance change versus voltage in an AMR-type MeRAM [51].

MeRAM 的难点在于实现电场控制的磁化  $180^\circ$  可逆翻转。一方面, 这种完全的磁化翻转将增强磁阻层的电阻变化率, 实现更高的信噪比; 另一方面, 这将显著提高 MeRAM 的可靠性, 因为磁化翻转发生在纳米磁结构的一个磁易轴的两个磁化方向之间, 在  $180^\circ$  磁化翻转的情况下, 即使压电层的应力完全松弛时, 磁化开关状态也会保持稳定。Heron 等 [64] 在室温下通过电场控制多铁性/铁磁性 (BiFeO<sub>3</sub>/CoFe) 异质结构中的交换偏置, 实现了非易失性的  $180^\circ$  磁化可逆翻转。文献 [65, 66] 在反铁磁/铁磁/铁电 (FeMn/NiFe/FeGaB/PZN-PT) 异质结中通过电场控制交换偏置和矫顽场, 证明了两种类型的动态磁化开关, 实现了  $180^\circ$  磁化翻转, 采用磁脉冲解决了异质结中  $180^\circ$  磁化翻转附近引起的电场的不可逆性, 并实现了磁化的连续翻转。文献 [67—69] 通过利用平面压电材料和多铁性异质结构的磁性形状各向异性来完成电场控制的  $180^\circ$  磁化翻转。

除了这些基于电场翻转磁矩改变电阻状态的 MeRAM, 最近, 中国科学院物理研究所的孙阳等 [70—75] 报道了基于电场调控磁电耦合系数的状态实现的新型非易失存储器, 具有结构简单、并行读取等优点。他们提出了一种新颖的转换随机存取存储器的存储模式, 直接将磁电电压系数作为信息

存储的物理量。具体实现方式是使用溶胶-凝胶技术在 Metglas 基底上制备聚偏氟乙烯铁电 P(VDF-TrFE) 薄膜以形成多铁性异质结构, 通过施加电场脉冲, 将异质结构的磁电电压系数在正值和负值的不同状态之间进行可重复翻转, 从而实现存储功能 [70]。这些工作证实了多铁性磁电复合材料在开发下一代低功耗、非易失性、高密度随机存储器技术方面的巨大潜力, 有望推动 MeRAM 的进一步发展。

## 2.4 能量回收器

日常生活中的风、光、振动、声音、射频微波、温度梯度等能量, 均可用于能量采集和回收。在某些特定应用场景中, 能量回收器不仅可以解决传统电池价格昂贵且更换操作繁琐的局限性, 还能提高设备的使用寿命。例如, 使用无线充电装置对心脏起搏器等体内医疗辅助设备无线充电等。在过去的十年中, 一些课题组 [76—88] 致力于利用磁电复合材料从微弱的磁场中回收电能的研究。将磁电复合材料置于交流磁场中时, 复合材料中的磁致伸缩层产生机械振动, 致使压电层形变, 从而在相连的负载两端产生电压。另一方面, 磁电复合材料中存在压电相, 施加到复合材料上的任何机械振动都会使

压电材料直接产生电压输出. 因此, 磁电能量回收器可同时收集来自外部磁场和振动的能量 [76].

通过选择高性能的压电和磁致伸缩材料并进行复合结构的优化, 可以使磁电能量回收器从低频磁场获得较高的电功率密度. 早期, Dong 等 [89] 使用 FeBSiC 合金带与 PZT 压电层设计了一种推拉式、悬臂梁结构的磁电能量回收器原型, 如图 6(a) 所示. 在频率为 21 kHz, 1 Oe 的交流磁场下, 负载 50 kΩ 可获得 420 μW/Oe 的输出功率, 输出功率密度估算为 2.1 mW/(Oe·cm<sup>3</sup>), 如图 6(b) 所示. 在 1 g 的振动加速度下以 40 Hz 的弯曲共振频率进行测量, 负载 3 MΩ 的输出功率密度为 400 μW/(g·cm<sup>3</sup>). 当器件同时收集磁能和机械能时, 在 2 Oe 的磁场和 50 mg 加速度的机械振动下输出电压可达 8 V<sub>P.P.</sub>. 然而, 单一的对磁场能量进行收集时, 这种高频率下的杂散磁场的来源并不多, 从而限制了器件的使用, 在组合响应时, 输出功率密度也降低不少. 但是, 器件在单一模式下的输出功率密度对比同时期其他类型的能量回收器处于较高水平, 而且作为一种同时从杂散磁能和机械能中采集能量的多模式能量收集系统, 为以后的磁电能量回收器件

设计奠定了基础. 随后, Dai 等 [90] 设计了另一种具有悬臂梁结构的磁电能量回收器, 使用 Terfenol-D/PZT/Terfenol-D 层状磁电复合材料结构, 器件主要将环境中机械振动的能量转换为电能, 在谐振频率为 51 Hz, 加速度为 1 g 的机械振动下, 测得输出功率为 2.11 mW. 在此基础上, Gao 等 [91] 报道了具有多重推拉结构的非对称双层 Metglas/PZT 磁电能量回收器原型, 在实际测量中大大提高了磁电耦合系数, 并且共振频率可以在 60—220 Hz 的范围内进行调谐, 负载 6 MΩ 电阻, 在 60 Hz 的频率下, 最大输出功率约为 16 μW/Oe, 对应的功率密度为 200 μW/cm<sup>3</sup>. Cho 等 [92] 在 30 Hz 的共振频率下, 将最大输出功率和功率密度分别提高到 52.5 mW 和 28.5 mW/cm<sup>3</sup>.

最近, Ryu 等 [93] 报道了一种用柔性压电 PMN-PT 纤维复合材料和 Ni 金属层及 Nd 永磁体构建的磁电能量回收器, 由于 Ni 的固有性质, 即使没有偏置磁场, 磁电复合层也具有较强的磁电耦合系数, 并可以在微弱磁场环境中产生线性应变响应. 实验中测得器件在 60 Hz, 160 μT 弱交流磁场

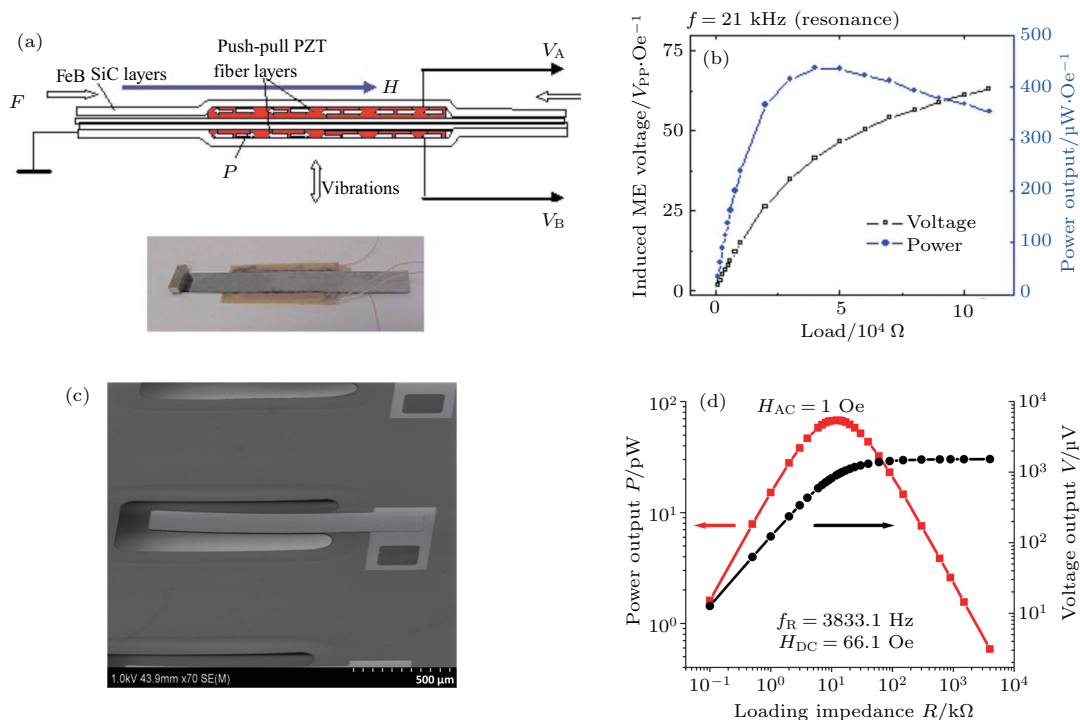


图 6 (a) 磁电复合层与能量回收器结构示意图及实物图; (b) 外界磁场引起的磁电电压与输出功率关系图 [89]; (c) 基于 PZT/FeGa 薄膜的磁电能量回收器的扫描电子显微镜照片; (d) 该微型能量回收器的电压与功率输出性能 [94]

Fig. 6. (a) Layered structure of the magnetoelastic composite and the energy harvester; (b) magnetoelastic voltage and power output of the energy harvester shown in (a) [89]; (c) scanning electron micrograph image of a thin film magnetoelastic energy harvester based on PZT/FeGa; (d) voltage and power output of the energy harvester shown in (c) [94].

下的输出功率密度可达  $46 \text{ mW}/(\text{cm}^3 \cdot \text{Oe}^2)$ , 如此高的输出功率密度使该器件在  $60 \text{ Hz}$ ,  $500 \mu\text{T}$  的磁场下, 可以在  $3 \text{ min}$  内为  $220 \mu\text{F}$  的电容器充满电. 利用电容器中存储的电能, 该器件成功点亮了  $35$  个商用高强度发光二极管, 开/关频率约为  $1 \text{ Hz}$ , 还可以在  $700 \mu\text{T}$  磁场条件下驱动无线传感器网络模块. 这种原型器件收集了真空泵电源线附件的寄生能量, 大大提高了器件的实际应用价值. 采用柔性压电材料具有更多灵活性, 在悬臂结构中实现了超低的共振频率, 同时提升了器件的耐久性和应用范围.

为了克服块体复合材料各相之间界面缺陷导致的力、电、磁能量转换效率低下、涡流损耗较高、品质因数较低等缺点, 研究人员对基于磁电复合薄膜材料的能量回收器也做了大量的工作. Onuta 等<sup>[94]</sup> 设计了 Si 悬臂梁薄膜型磁电能量回收器, 如图 6(c) 所示, 器件采用氧化硅/氮化硅/氧化物堆叠 ( $3.8 \mu\text{m}$  厚) 的硅悬臂梁结构. 将磁致伸缩层 FeGa 薄膜 ( $500 \text{ nm}$  厚) 溅射在以 Pt 缓冲的 PZT 压电层 ( $500 \text{ nm}$  厚) 上, 并且采用光刻工艺来制造悬臂梁结构, 将包含六个悬臂装置的芯片放置在一对亥姆霍兹线圈之间的真空室中, 并将其平行放置于磁场中. 在谐振频率  $3.8 \text{ kHz}$ ,  $1 \text{ Oe}$  的磁场下测得负载  $12.5 \text{ k}\Omega$  处的峰值功率密度为  $0.7 \text{ mW}/\text{cm}^3$ , 如图 6(d) 所示.

## 2.5 磁电传感器

高灵敏度磁场传感器在汽车、计算机、医疗、计量等领域应用广泛. 其中, 超导量子干涉仪作为最灵敏的磁场传感器之一, 在  $4 \text{ K}$  的超低温时, 最高灵敏度可以达到  $10^{-15} \text{ T}/\text{Hz}^{1/2}$ . 但是, 这种超高的灵敏度只有在屏蔽效果极佳的室内且需要极低的工作温度才能实现<sup>[95-97]</sup>. 另一类比较重要的磁场传感器是磁阻效应传感器<sup>[98]</sup>, 但是其室温灵敏度仅为  $4 \times 10^{-10} \text{ T}/\text{Hz}^{1/2}$ , 且热噪声和激励噪声限制了它们的使用. 基于多铁性磁电复合材料的磁场传感器, 因具有较高的室温灵敏度、较低的成本和较小的尺寸, 被认为是最有潜力的下一代磁场传感器之一<sup>[99]</sup>. 磁电复合材料对直流或交流磁场都很敏感, 所以能响应外界磁场变化并输出电压信号, 实现磁传感功能. Dong 等<sup>[100]</sup> 率先开发了由 PMN-PT 压电层和 Terfenol-D 磁致伸缩层构成的三层推拉式叠层结构磁电传感器, 通过压电层中

围绕中心线的对称极化来优化磁致伸缩层和压电层之间的相互作用, 使磁电电压系数显著增加, 谐振时达到  $20 \text{ V}/\text{Oe}$ , 并在室温和谐振条件下测得高达  $10^{-12} \text{ T}$  的低频磁场灵敏度. 在此基础上, Zhai 等<sup>[101]</sup> 将这种叠层结构进行改进, 使磁电传感器探测低频的频率范围拓宽到  $10^{-2}$ — $10^3 \text{ Hz}$ , 在室温下仍可保持  $10^{-12} \text{ T}$  的灵敏度, 并且显著提高了噪声抑制能力.

磁场传感器能否得到广泛应用不仅取决于对外加磁场的响应能力, 还取决于对外界噪声的响应<sup>[102]</sup>. 制备同时具有低等效磁噪声和高磁电电压系数的磁电复合材料及其磁电传感器具有一定的挑战性. Wang 等<sup>[103]</sup> 报道了使用 Metglas 和压电纤维构成的磁电传感器, 通过显著的磁电耦合效应和减少内部噪声源的方法实现了极低的等效磁噪声, 磁电电压系数在低频时可达  $52 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Oe})$ ,  $1 \text{ Hz}$  频率下的等效磁噪声为  $5.1 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ , 比相关报道的低频 ( $f < 10 \text{ Hz}$ ) 等效磁噪声  $20 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ <sup>[104,105]</sup>, 降低了近  $1/4$ , 且磁场灵敏度可达  $10^{-11} \text{ T}$ . 在同样以 Metglas 作为磁致伸缩层的体系中, Fang 等<sup>[106]</sup> 报道了具有面内串联结构的 Metglas 和 Mn 掺杂 PMN-PT 层状磁电复合材料, 在室温下  $30 \text{ Hz}$  时测得低至  $0.87 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$  的等效磁噪声, 进一步推动了磁电传感器的发展.

以上几种磁电传感器均基于块体材料, 为提高磁电耦合系数和对外界磁场的响应, 器件的最小面积约为几个平方厘米. 而基于微纳加工技术制造的集成磁电传感器也可以具有高灵敏度和高分辨率, 并兼具小型化、低成本的特点, 还提供了与其他电路元件集成构造传感器阵列的设计功能. Lage 等<sup>[107]</sup> 报道了在硅悬臂基底上用磁控溅射制造的磁电薄膜结构, 复合材料由 AlN 压电薄膜和 Ta/Cu/MnIr/FeCo 或 Ta/Cu/MnIr/FeCoSiB 多层膜作为磁致伸缩层组成. 由于在纳米尺度上的界面处结合非常紧密, 因此, 磁场诱导应变可以有效地转移到 AlN 薄膜上, 使磁电电压系数在谐振频率  $1197 \text{ Hz}$  处超过了  $100 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Oe})$ , 这已经接近了  $10^{-3} \text{ Hz}$  以下的理想频率范围. 尤其是通过利用反铁磁和铁磁之间的交换偏置场作为内建的直流偏置磁场, 可以在零外加偏压磁场下获得高达  $96.7 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Oe})$  的磁电电压系数, 这有利于使传感器实现较低的噪声水平和较高的分辨率.



将该传感器与低噪声电荷放大器相结合, 可获得 5.7 V/mT 的响应度, 66 pT/Hz<sup>1/2</sup> 的噪声水平和 10 pT/Hz<sup>1/2</sup> 的高灵敏度. 最近, Nan 等<sup>[108]</sup> 设计了一种基于 AlN/(FeGaB/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 微纳机电系统谐振器的自偏置磁电传感器, 如图 7 (a) 所示. 通过测量磁电传感器导纳的直流磁场依赖性, 实现了传感

器探测磁场的新机理. 在零偏置磁场、215 MHz 的共振频率下, 实现了非屏蔽环境中高达 300 pT 的直流磁场探测灵敏度. 这种超小型化、高灵敏度的自偏置纳机电系统磁电传感器与 CMOS 技术相结合, 可以构成一种新型、紧凑和超灵敏的磁强计.

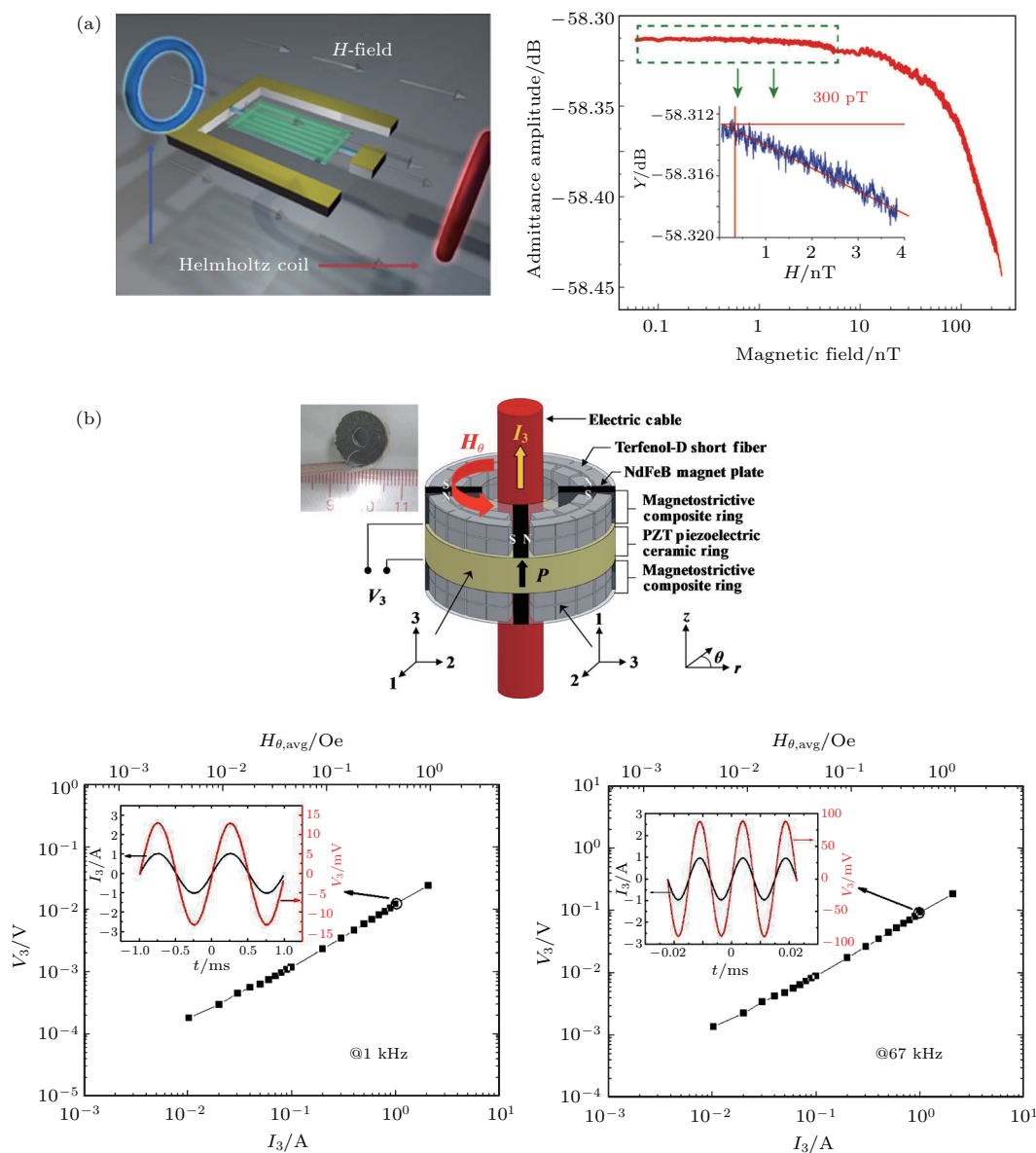


图 7 (a) 纳机电磁场传感器的示意图(直流磁场施加在传感器的长度方向)及其灵敏度和线性度<sup>[108]</sup>; (b) 环型电流传感器的示意图及从传感器输出的交流电压测试图<sup>[109]</sup>

Fig. 7. (a) Schematic and sensitivity of the nano-electromechanical system magnetic field sensor<sup>[108]</sup>; (b) schematic diagram of the performance of the ring-type electric current sensor<sup>[109]</sup>.

磁电传感器不仅可以探测低频磁场, 还可以用作电流传感器来直接检测电流. 传统的电流传感器是通过检测电流产生的磁场来工作, 一般用霍尔器件和磁阻器件来探测. 霍尔器件需要稳定性较高的恒流源进行供电, 其自身固有的弱霍尔

电压 (5—40  $\mu\text{V}/\text{Oe}$ ) 对信号提取部分提出了很高的要求. 磁阻器件需要与高精度的积分器连接, 并且在低频 (100 Hz) 下的测量通常会受到抑制. 相比之下, 基于磁电复合材料的电流传感器属于无源器件, 并且在低频下也具有较高的灵敏度. 理

论上, 传输交流或直流电流的导线将根据安培定律在其周围激发交流或直流磁场. 磁场的强度取决于导线中的电流、导线的电阻以及与导线的距离等, 因此, 环型磁电异质结成为了电流传感器的基本结构. Leung 等<sup>[109]</sup>报道了一个环形电流传感器, 如图 7(b) 所示, 该传感器基于环形磁电层状异质结而设计, 由两个周向磁化的 Terfenol-D/NdFeB 磁致伸缩复合材料环及夹在中间的轴向极化的 PZT 压电陶瓷环组成, 在实验中测得输出电压对电流具有良好的线性响应. 该电流传感器在 1 Hz—30 kHz 的频率范围内表现出 12.6 mV/A 的高灵敏度, 在 67 kHz 的共振频率下测得 92.2 mV/A 的灵敏度. Lu 等<sup>[110]</sup>在测量 50 Hz 的低频交变磁场时, 在 Metglas/PZT 构成的磁电电流传感器中观察到优异的线性响应度和高达 114.2 mV/A 的电流灵敏度. Zhang 等<sup>[111]</sup>通过将磁电复合材料环与压电变压器相结合的结构, 在 62 kHz 的机电谐振频率下实现了 157 mV/A 的超高灵敏度. 这些磁电电流传感器具有无功率、零偏置、宽带宽和高灵敏度等特性, 在实时监控有载流电缆或导体的工程系统中拥有巨大应用潜力.

## 2.6 磁电天线

随着无线通信技术的不断发展, 尤其是移动通信系统需求的持续加大, 设计和制造高频段、低成本、小体积的微波器件已成为通信系统发展的关键问题. 作为无线通信系统中非常重要的无源元件, 具有良好增益和带宽的微型天线在工业界和学术界都备受关注<sup>[112]</sup>, 为了制造适合于较长波长、较低频段的微型天线, 在早期的研究中提出了一些减小天线尺寸的设计方法<sup>[113,114]</sup>. 第一种方法是使用电容、电感负载或曲折线获得慢波共振, 其主要缺点是增加了欧姆损耗, 并使带宽变窄; 第二种方法是使用介电材料来减小结构尺寸, 但这很容易激发表面波和降低天线效率. 基于此, Petrov 等<sup>[115]</sup>使用镍锌铁氧体 (NZFO) 和钛酸锶铋 (BST) 构成的磁电复合材料, 制作了工作频率为 100 MHz 的小型化半波长谐振微带天线, 并分析了电场对阻抗匹配、带宽和效率的影响. 这种天线的直径为 22 cm, 厚度为 0.85 cm, 用矢量网络分析仪在共振时测量的驻波比接近 1.3, 表明与自由空间具有良好的阻抗匹配, 天线的衬底和周围介质之间的边界处没有反射, 并减少了衬底中吸收的能量. Bae 等<sup>[116,117]</sup>

采用 Co<sub>2</sub>Z 型六方铁氧体和铁氧体基板制作了螺旋天线, 测量天线 10 dB 处的谐振频率和带宽分别为 195 MHz 和 27 MHz, 以及 209 MHz 和 41 MHz. 同样在 Co/Ti 掺杂的衬底 (45 mm × 11 mm × 3.8 mm) 上制作的螺旋天线, 谐振频率从 201 MHz 增加到 231 MHz<sup>[118]</sup>.

可以看出, 传统上默认的天线应用中的磁性材料是铁氧体<sup>[119,120]</sup>, 然而, 这些铁氧体天线基板在 MHz 及 GHz 频段的损耗较大, 且基板中的铁氧体材料需要较大的偏置磁场, 极大地限制了其频段范围. 因此, 亟需采用新方法减小天线的尺寸、增强带宽、提高效率. 微带天线的小型化可以通过在高介电常数基板上印刷贴片天线来实现, 但是, 天线与接地层之间的强电容耦合严重影响其效率和带宽. 为了克服这个问题, 需要使用具有相对磁导率大于 1 的天线基板<sup>[120,121]</sup>, 而在 GHz 范围内寻找高磁导率和低损耗的自偏置磁性材料一直具有挑战性. 金属磁性膜具有高达 24 kG (1 G = 10<sup>-4</sup> T) 的高饱和磁化强度值和几个 GHz 的自偏压铁磁共振频率<sup>[122,123]</sup>, 还具有与铁氧体相当的铁磁谐振线宽, 可以实现高达几个 GHz 工作频率的自偏置磁贴片天线. Sun 等<sup>[124]</sup>报道了具有金属磁性膜的新型电可调谐磁贴片天线, 测试工作频率为 2.1 GHz, 磁性贴片天线与非磁性贴片天线相比带宽增加了 50%, 且方向性显著增强, 在施加 20 Oe 以下的低磁场下, 辐射强度可调最大值为 4.23 dB. Yang 等<sup>[125-129]</sup>引入金属磁性膜和自偏置铁氧体膜作为一种可以实现天线小型化、增强带宽和增加谐振频率可调性的手段, 设计了具有金属磁性膜和自偏置 NiCo 铁氧体膜的新型天线. 该磁性贴片天线在 2.1 GHz 的频率范围内具有 5—10 MHz (带有金属磁性膜) 和 7—23 MHz (带有自偏置铁氧体膜) 的谐振频率调谐范围. 还设计了 NiCo 铁氧体薄膜负载环形天线, 可以在 1.7 GHz 的频率下工作, 谐振频率调谐范围为 3—20 MHz. 这种工作于 GHz 频段的电可调谐自偏置磁性贴片天线是首次报道, 并使用磁控溅射等大规模、低成本的制造技术, 具有重要的实用价值. 使用贴片天线加载单层和多层自偏置铁氧体薄膜进行频率的调谐, 在天线的中心谐振频率 2.1 GHz 处测量, 发现中心频率可以在 12—40 MHz 的范围内进行调谐, 并且天线效率从非磁性天线的 41% 增加到最高 74%, 单向辐射方向性显著增强, 天线增益最高增加 1.1 dB.

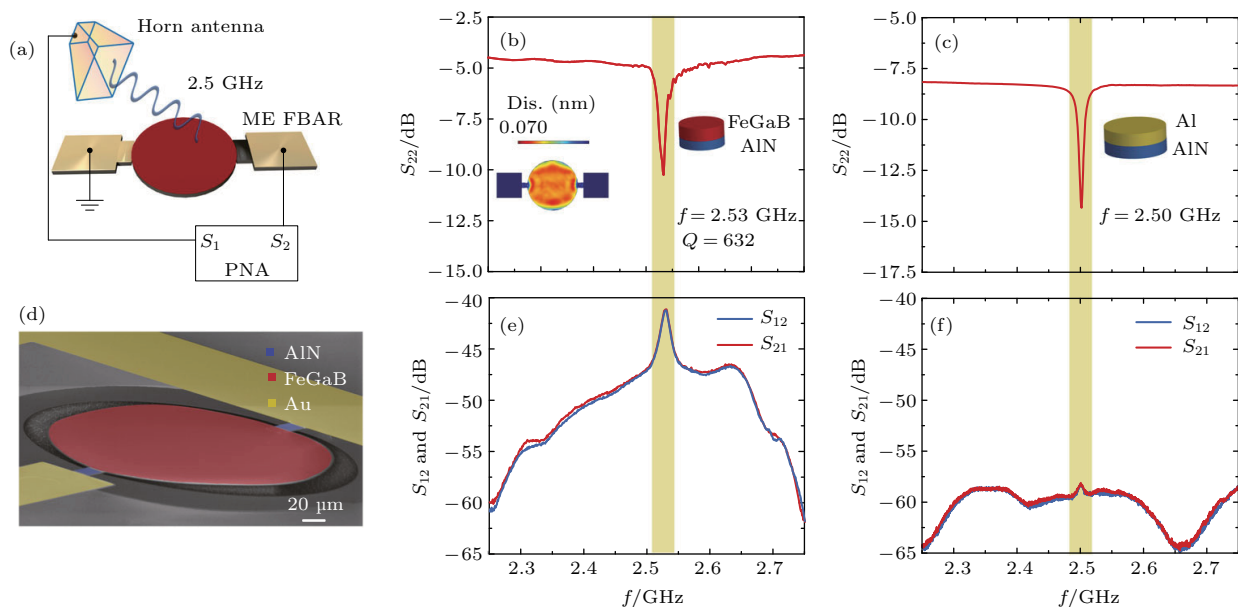

 图8 磁电天线结构示意图及性能测试图<sup>[130]</sup>

 Fig. 8. Structure and the performance of the magnetolectric antenna<sup>[130]</sup>.

以上这些小型化天线的尺寸一般在厘米量级,但是进一步将尺寸缩小到微、纳米级别、用于集成无线通讯系统仍然十分困难.最近, Nan等<sup>[130]</sup>提出了一种以声学共振频率接收和发射电磁波的新型天线理论,并制备了工作频率为甚高频(30—300 MHz)和超高频(0.3—3 GHz)的两种微型天线结构,如图8所示.这种天线以AlN/FeGaB磁电复合薄膜为基本材料,制备了纳米平板谐振器和薄膜体声波谐振器两种不同的谐振结构,并且均实现了电磁波发射和接收功能.在接收过程中,磁电天线的磁性层测量电磁波的磁场分量,磁场引起磁性层产生形变使压电层输出电压.相反,在发射过程中,压电层在交流电压输入下产生振荡机械形变,形变激励磁性层产生磁化振荡并辐射电磁波.因此,这些磁电天线在其声学谐振频率而不是电磁谐振频率下工作,由于声波波长比相同频率下的电磁波长短五个数量级,所以这些磁电天线具有与声波波长相当的尺寸,而只有相对应的电磁波长的千分之一,比现有的小型化天线降低了1—2个数量级,且性能保持良好.这类新型磁电天线在便携式无线通信系统中具有巨大的应用潜力.

### 3 总结与展望

近年来,多铁性材料与磁电耦合效应的器件应用研究越来越受重视.磁电器件的最大优势在于可

以使用电场取代磁场对磁性器件的性能进行连续、可逆调控,以取代体积大、重量大的电磁线圈、永磁铁等部件,实现结构紧凑、重量轻、响应快、噪音小、高效节能等优异性能.这些优势已经在一些原型器件中得到了证实,如可调谐射频/微波器件、存储器件、传感器等.但是,目前磁电器件研究及其实际应用仍面临巨大的挑战.

1) 材料组合: 为了实现更强的电控磁效应,选择具有更好性能的压电材料和磁致伸缩材料并进行适当组合十分重要.例如,广泛使用的微波磁性材料YIG具有极低的高频损耗,然而其自身饱和磁致伸缩系数仅为1—2 ppm,导致使用YIG的磁电复合材料只具有较弱的磁电耦合.相对而言,尖晶石家族的饱和磁致伸缩系数超过石榴石一个数量级,如果通过高质量外延和晶格调控等手段获得低损耗尖晶石材料,并与压电材料进行高质量结合,将可能制备出具有较高电场调谐率的滤波器、电感等微波信号处理器.

2) 器件仿真: 由于压电效应和磁致伸缩效应涉及不同的材料体系和物理机理,尚没有完善的针对磁电耦合效应的模拟仿真技术,目前采用的近似方法都存在一定的局限性,这对磁电器件特别是微波滤波器和天线的设计、建模都是一个重大的挑战.

3) 性能优化: 多种磁电器件的性能仍有待增强.例如,自偏置多层磁电纳米结构中实现了对于低频磁场检测灵敏度达到pT量级,如能进一步将

低频磁场灵敏度提高到 fT 量级, 将使其具有与超导量子仪磁传感器相等的灵敏度. 可能的途径包括增强正磁电耦合、降低噪音水平等技术. 此外, 单相材料的可靠性问题可能转移到基于复合材料的磁电器件上, 如疲劳、击穿、二次电子发射等. 因此, 磁电器件的可靠性有待在实际使用中接受评估.

4) 集成技术: 目前大多数的磁电器件通过将磁性相和铁电相材料用环氧树脂胶黏结在一起构成, 这样器件的尺寸较大且可能降低机械应力的传递效率. 而对于磁电薄膜材料, 其磁电耦合较弱, 衬底夹持效应仍然制约器件的性能. 开发磁电器件的集成技术, 可从以下几个方面入手: 一是开发新型高压电系数、高品质因子的压电薄膜和低损耗、高磁致伸缩系数的铁磁薄膜材料; 二是开发新的衬底刻蚀/溶解技术, 减小衬底夹持效应的影响; 三是采用新的电控磁原理, 如最近发展的利用离子液体/胶体实现电场调控磁性等<sup>[131,132]</sup> 技术.

## 参考文献

- [1] Nan C W 2015 *Sci. Sin. Tech.* **45** 339 (in Chinese) [南策文 2015 中国科学: 技术科学 **45** 339]
- [2] Dong S, Liu J M 2010 *Physics* **39** 714 (in Chinese) [董帅, 刘俊明 2010 物理 **39** 714]
- [3] Eerenstein W, Mathur N D, Scott J F 2006 *Nature* **442** 759
- [4] 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]
- [5] Palneedi H, Annapureddy V, Priya S, Ryu J 2016 *Actuators* **5** 9
- [6] Duan C G 2009 *Prog. Phys.* **29** 215 (in Chinese) [段纯刚 2009 物理学进展 **29** 215]
- [7] Bukhari S H, Ahmad J 2017 *Chin. Phys. B* **26** 018103
- [8] Prellier W, Singh M P, Murugavel P 2005 *J. Phys.: Condens. Matter* **17** R803
- [9] Cheong S W, Mostovoy M 2007 *Nat. Mater.* **6** 13
- [10] Khomskii D 2009 *Physics* **2** 20
- [11] Wang K F, Liu J M, Ren Z F 2009 *Adv. Phys.* **58** 321
- [12] Tokura Y, Seki S 2010 *Adv. Mater.* **22** 1554
- [13] Wang K F, Liu J M, Wang Y 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 1098 (in Chinese) [王克锋, 刘俊明, 王雨 2008 科学通报 **53** 1098]
- [14] Nan C W, Bichurin M I, Dong S X, Viehland D, Srinivasan G 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 031101
- [15] Srinivasan G, Annu, Rev 2010 *Mater. Res.* **40** 153
- [16] 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]
- [17] Sun N X, Srinivasan G 2012 *SPIN* **2** 1240004
- [18] Dong S X, Cheng J R, Li J F, Viehland D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4812
- [19] Zucca M, Bottauscio O, Beatrice C, Fiorillo F 2011 *IEEE Trans. Mag.* **47** 4421
- [20] Lou J, Reed D, Liu M, Sun N X 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 112508
- [21] Peng B, Zhang C, Yan Y, et al. 2017 *Phys. Rev. Appl.* **7** 044015
- [22] Gao Y, Zare S, Onabajo M, Li M, Zhou Z, Nan T, et al. 2014 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Tampa, USA, June 1–6, 2014* p1
- [23] Zhou H M, Li C, Zhu F J, et al. 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 083902
- [24] Martin F, Falcone F, Bonache J, et al. 2003 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **13** 511
- [25] Yun T Y, Chang K 2001 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **49** 549
- [26] Fetisov Y K, Srinivasan G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 143503
- [27] Murthy DVB, Srinivasan G 2012 *Front. Phys.* **7** 418
- [28] Liu M 2014 *Chin. Sci. Bull.* **59** 3591 (in Chinese) [刘明 2014 科学通报 **59** 3591]
- [29] Li X H, Zhou H S, Zhang Q S, Hu W W 2016 *Chin. Phys. B* **25** 117505
- [30] Fetisov Y K, Srinivasan G 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 033508
- [31] Yang G M, Lou J, Wu J, Liu M, Wen G, Jin Y, et al. 2011 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Baltimore, USA, June 5–10, 2011* p1
- [32] Lin H, Wu J, Yang X, Hu Z, Nan T, Emori S, et al. 2015 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Phoenix, USA, May 17–22, 2015* p1
- [33] Wang X J, Zhou Z Y, Behugn S, Liu M, Lin H, Yang X, et al. 2015 *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **26** 1890
- [34] Zhou Z, Obi O, Nan T X, Beguhn S, Lou J, Yang X, et al. 2014 *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **25** 1188
- [35] Song Y Y, Das J, Krivosik P, Mo N, Patton C E 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 182505
- [36] Veerakumar V, Camley R E 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 093906
- [37] Fal T J, Veerakumar V, Kuanr B, Khivintsev Y V, Celinski Z, Camley R E 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 063907
- [38] Tsai C S, Qiu G, Gao H, et al. 2005 *IEEE Trans. Mag.* **41** 3568
- [39] Song Y Y, Sun Y Y, Lu L, Bevivino J, Wu M Z 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 173502
- [40] Pettiford C, Dasgupta S, Lou J, et al. 2007 *IEEE Trans. Mag.* **43** 3343
- [41] Yang X, Liu M, Peng B, et al. 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 173503
- [42] Jeon H J, Kim Y B, Choi M 2010 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **59** 1127
- [43] Scott J F 2007 *Nat. Mater.* **6** 256
- [44] Wang F, Shen S P, Sun Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 087503
- [45] Åkerman J 2005 *Science* **308** 508
- [46] Zhu J G 2008 *Proc. IEEE* **96** 1786
- [47] Slonczewski J C 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **159** L1

- [48] Berger L 1996 *Phys. Rev. B* **54** 9353
- [49] Baibich M N, Broto J M, Fert A, van Dau F N, Petroff F, Etienne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
- [50] Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, Zinn W 1989 *Phys. Rev. B* **39** 4828(R)
- [51] Hu J M, Li Z, Chen L Q, Nan C W 2011 *Nat. Commun.* **2** 553
- [52] Gajek M, Bibes M, Fusil S, Bouzehouane K, Fontcuberta J, Barthélémy A, Fert A 2007 *Nat. Mater.* **6** 296
- [53] Béa H, Gajek M, Bibes M, Barthélémy A 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 434221
- [54] Catalan G, Scott J F 2009 *Adv. Mater.* **21** 2463
- [55] Bibes M, Barthélémy A 2008 *Nat. Mater.* **7** 425
- [56] Vopson M M 2015 *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* **40** 223
- [57] Binek C, Doudin B 2005 *J. Phys.: Condens. Matter* **17** 39
- [58] Pertsev N A, Kohlstedt H 2010 *Nanotechnology* **21** 475202
- [59] Garcia V, Fusil S, Bouzehouane K, Enouz-Vedrenne S, Mathur N D, Barthélémy A, Bibes M 2009 *Nature* **460** 81
- [60] Hambe M, Petraru A, Pertsev N A, Munroe P, Nagarajan V, Kohlstedt H 2010 *Adv. Funct. Mater.* **20** 2436
- [61] Liu M, Li S, Obi O, Lou J, Rand S, Sun N X 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 222509
- [62] Brandlmaier A, Geprags S, Woltersdorf G, Gross R 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 043913
- [63] Chu Y H, Martin L W, Holcomb M B, Gajek M, Han S J, He Q, Balke N, Yang C H, Lee D, Hu W, Zhan Q, Yang P L, Fraile-Rodríguez A, Scholl A, Wang S X, Ramesh R 2008 *Nat. Mater.* **7** 478
- [64] Heron J T, Trassin M, Ashraf K, Gajek M, He Q, Yang S Y, Nikonov D E, Chu Y H, Salahuddin S, Ramesh R 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 217202
- [65] Xue X, Zhou Z, Peng B, Zhu M, Zhang Y, Ren W, Ren T, Yang X, Nan T, Sun N X 2015 *Sci. Rep.* **5** 16480
- [66] Liu M, Lou J, Li S, Sun N X 2011 *Adv. Funct. Mater.* **21** 2593
- [67] Wang J J, Hu J M, Ma J, et al. 2016 *Sci. Rep.* **6** 21444
- [68] Wang J J, Hu J M, Yang T N, et al. 2014 *Sci. Rep.* **4** 4553
- [69] Peng R C, Wang J J, Hu J M, et al. 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 142901
- [70] Lu P, Shang D, Shen J, Chai Y, Yang C, Zhai K, Cong J, Shen S, Sun Y 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 252902
- [71] Zhai K, Shang D S, Chai Y S, Li G, Cai J W, Shen B G, Sun Y 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1705771
- [72] Shen J X, Shang D S, Chai Y S, Wang S G, Shen B G, Sun Y 2018 *Adv. Mater.* **30** 1706717
- [73] Shen J, Shang D, Chai Y, Wang Y, Cong J, Shen S, Sun Y 2016 *Phys. Rev. Appl.* **6** 064028
- [74] Shen J, Cong J, Chai Y, Shang D, Shen S, Zhai K, Tian Y, Sun Y 2016 *Phys. Rev. Appl.* **6** 021001
- [75] Shen J, Cong J, Shang D, Chai Y, Shen S, Zhai K, Sun Y 2016 *Sci. Rep.* **6** 34473
- [76] Li X, Guo M, Dong S 2011 *IEEE Trans. Ultras. Ferroelectr. Frequency Control* **58** 698
- [77] Kambale R C, Yoon W H, Park D S, Choi J J, Ahn C W, Kim J W, Hahn B D, Jeong D Y, Lee B C, Chung G S 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 204108
- [78] Patil D R, Zhou Y, Kang J E, Sharpes N, Jeong D Y, Kim Y D, Kim K H, Priya S, Ryu J 2014 *APL Mater.* **2** 046102
- [79] Ahn C W, Choi J J, Ryu J, et al. 2015 *Mater. Lett.* **141** 323
- [80] Zhou Y, Apo D J, Priya S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 192909
- [81] Liu G, Ci P, Dong S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 032908
- [82] Lasheras A, Gutiérrez J, Reis S, Sousa D, Silva M, Martins P, Lanceros-Mendez S, Barandiarán J M, Shishkin D A, Potapov A P 2015 *Smart Mater. Struct.* **24** 065024
- [83] Li P, Wen Y, Liu P, Li X, Jia C 2010 *Sens. Actuators A: Phys.* **157** 100
- [84] Han J, Hu J, Wang S X, He J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 093901
- [85] Bian L, Wen Y, Li P, Gao Q, Zheng M 2009 *Sens. Actuators A: Phys.* **150** 207
- [86] Gao J, Hasanyan D, Shen Y, Wang Y, Li J, Viehland D 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 104101
- [87] Dong S, Zhai J, Li J F, Viehland D, Priya S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 103511
- [88] Staruch M, Li J F, Wang Y, Viehland D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 152902
- [89] Dong S X, Zhai J Y, Li J, Viehland D, Priya S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 103511
- [90] Dai X Z, Wen Y M, Li P, Yang J, Zhang G Y 2009 *Sens. Actuators A: Phys.* **156** 350
- [91] Gao J, Hasanyan D, Shen Y, Wang Y, Li J, Viehland D 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 104101
- [92] Cho K H, Park H Y, Heo J S, Priya S 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 204108
- [93] Ryu J, Kang J E, Zhou Y, et al. 2015 *Energy Environ. Sci.* **8** 2402
- [94] Onuta T D, Wang Y, Long C J, Takeuchi I 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 203506
- [95] Vrba J 1996 *Squid Gradiometers in Real Environments* (New York: Squid Sensors Fundamentals Fabrication & Applications) p117
- [96] Gallop J 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** 1575
- [97] Bartelmeß H, Halverscheid M, Schiefenhover B, Heim E, Schilling M, Zimmermann R 2001 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 657
- [98] Baibich M N, Broto J M, Fert A, van Dau F N, Petroff F, Eitenne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **21** 2472
- [99] Israel C, Mathur N D, Scott J F 2008 *Nat. Mater.* **7** 93
- [100] Dong S X, Zhai J Y, Bai F M, Li J F, Viehland D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 062502
- [101] Zhai J, Xing Z, Dong S, et al. 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 062510
- [102] Clarke J, Koch R H 1988 *Science* **242** 217
- [103] Wang Y, Gray D, Berry D, Gao J, Li M, Li J, Viehland D 2011 *Adv. Mater.* **23** 4111

- [104] Gao J, Das J, Xing Z, Li J, Viehland D 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 084509
- [105] Li F, Zhao F, Zhang Q M, Datta S 2010 *Electron. Lett.* **46** 1132
- [106] Fang C, Jiao J, Ma J, Lin D, Xu H, Zhao X, Luo H 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 465002
- [107] Lage E, Kirchhof C, Hrkac V, Kienle L, Jahns R, Knochel R, Quandt E, Meyners D 2012 *Nat. Mater.* **11** 523
- [108] Nan T, Hui Y, Rinaldi M, et al. 2013 *Sci. Rep.* **3** 1985
- [109] Leung C M, Or S W, Zhang S, Ho S L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 09D918
- [110] Lu C, Li P, Wen Y, Yang A, Yang C, Wang D, He W, Zhang J 2014 *IEEE Trans. Magn.* **50** 2505304
- [111] Zhang S, Leung C M, Kuang W, Or S W, Ho S L 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 17C733
- [112] Wong K L 2003 *Planar Antennas for Wireless Communications* (Chicago:Lavoisier. fr) p18
- [113] Garg R 2001 *Microstrip Antenna Design Handbook* (New York: Artech House) pp5–25
- [114] Kim D 2012 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **54** 2871
- [115] Petrov R V, Tatarenko A S, Pandey S, Srinivasan G, Mantese J V, Azadegan R 2008 *Electron. Lett.* **44** 506
- [116] Bae S, Hong Y K, Lee J J, Jalli J, Abo G S, Lyle A, Seong W M, Kum J S 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 07A515
- [117] Bae S, Hong Y K, Lee J J, Abo G S, Jalli J, Park J H, Seong W M, Kum J S, Ahn W K, Park S H 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 2361
- [118] Lee J, Hong Y K, Lee W, Abo G S, Park J, Neveu N, Seong W M, Park S H, Ahn W K 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 07A520
- [119] Darnell Brown A, Volakis J L, Kempel L C, Botros Y Y 1999 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **47** 26
- [120] Mosallaei H, Sarabandi K 2004 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **52** 1558
- [121] Brown A D, Volakis J L, Kempel L C, Botros Y Y 1999 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **47** 26
- [122] Sun N X, Wang S X 2000 *IEEE Trans. Magn.* **36** 2506
- [123] Wang J S X, Sun N X, Yamaguchi M, Yabukami S 2000 *Nature* **407** 150
- [124] Sun N X, Wang J W, Daigle A, Pettiford C, Mosallaei H, Vittoria C 2007 *Electron. Lett.* **43** 434
- [125] Yang G M, Xing X, Daigle A, et al. 2008 *IEEE Trans. Antenn. Magn.* **44** 3091
- [126] Yang G M, Xing X, Daigle A, et al. 2009 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **57** 2190
- [127] Yang G M, Xing X, Daigle A, et al. 2010 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **58** 648
- [128] Yang G M, Xing X, Obi O, et al. 2010 *IET Microw. Antenn. Propag.* **4** 1172
- [129] Yang G, Daigle A, Sun N X, et al. 2008 *Piers Online* **4** 366
- [130] Nan T, Lin H, Gao Y, et al. 2017 *Nat. Commun.* **8** 296
- [131] Zhao S, Zhou Z, Peng B, et al. 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606478
- [132] Yang Q, Wang L, Zhou Z, et al. 2018 *Nat. Commun.* **9** 991

SPECIAL TOPIC — Multiferroicity: Physics, materials, and devices

## Recent progress of multiferroic magnetoelectric devices\*

Yu Bin Hu Zhong-Qiang<sup>†</sup> Cheng Yu-Xin Peng Bin Zhou Zi-Yao Liu Ming<sup>‡</sup>

(*Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education and International Center for Dielectric Research, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

( Received 1 May 2018; revised manuscript received 29 May 2018 )

### Abstract

Multiferroic composites possess the coupling effect among mechanical, electrical, and magnetic ordering, showing potential applications in compact, fast, and low-power magnetoelectric devices. Owing to the increasing application demand, the researches of device design, micro-/nano-fabrication, and performance test of magnetoelectric devices have made continuous progress. In this review, we briefly introduce several prototype devices based on magnetoelectric coupling, analyze the noteworthy application techniques, and summarize the working mechanisms and performances of devices including tunable inductors, RF/microwave filters, magnetoelectric memories, energy harvesters, magnetoelectric sensors, magnetoelectric antennas, etc. Besides, we discuss the issues and challenges in researches of multiferroic magnetoelectric devices, and present the perspectives for improving the device performance.

**Keywords:** magnetoelectric coupling effect, tunable filter, magnetoelectric sensor, magnetoelectric memory

**PACS:** 75.85.+t, 77.55.Nv, 85.70.-w, 84.30.Vn

**DOI:** [10.7498/aps.67.20180857](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180857)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51472199, 11534015) and the 111 Project (Grant No. B14040).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhongqianghu@xjtu.edu.cn](mailto:zhongqianghu@xjtu.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [mingliu@xjtu.edu.cn](mailto:mingliu@xjtu.edu.cn)