

磁电电压可调电感器的理论设计与可调性优化

聂长文 吴瀚舟 王书豪 蔡园园 宋树 SokolovOleg BichurinM. I. 汪尧进

Theoretical model and tunability optimization of magnetoelectric voltage tunable inductor

Nie Chang-Wen Wu Han-Zhou Wang Shu-Hao Cai Yuan-Yuan Song Shu Sokolov Oleg Bichurin M. I. Wang Yao-Jin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 247501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210899

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210899>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁电电压可调电感器的理论设计与可调性优化*

聂长文¹⁾ 吴瀚舟¹⁾ 王书豪¹⁾ 蔡园园¹⁾ 宋树¹⁾
 Sokolov Oleg²⁾ Bichurin M. I.²⁾ 汪尧进^{1)†}

1) (南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094)

2) (俄罗斯诺夫哥罗德州立大学工程物理系, 诺夫哥罗德 173003)

(2021年5月11日收到; 2021年8月28日收到修改稿)

磁电电压可调电感器 (ME-VTI) 是基于磁电效应实现电场对电感的调控. 与其他可调电感器相比, 具有能耗低、体积小、可调性大且连续等特点. 而以往对 ME-VTI 的研究主要针对结构和磁致伸缩材料, 致使电感器制备工艺复杂或可调性提高不大. 本文通过构建理论模型, 着眼于压电材料场致应变对电感可调性的影响. 采用磁电复合材料 Metglas/PMN-PT 单晶/Metglas 作为磁芯制备 ME-VTI. 在 1 kHz 时可调性高达 680%, 相当于选用 Metglas/PZT/Metglas 磁芯的 2.4 倍. 前者品质因子达到 15.6, 相对于后者提高了 2.8 倍. 本文提出的基于 PMN-PT 单晶的 ME-VTI 为器件集成化、小型化的发展提供了新的思路, 在电力电子领域有重要的应用前景.

关键词: 可调电感器, 磁电效应, 场致应变, 压电单晶

PACS: 75.85.+t, 77.65.Ly, 85.80.Jm

DOI: 10.7498/aps.70.20210899

1 引言

电感器作为最基本的电路元件, 有着调压、滤波、振荡等作用^[1], 在通信和电子等重要领域不可或缺. 一直以来, 器件的多功能化、集成化、小型化是科技发展的迫切需求. 如图 1(a) 所示, 可调电感器有望取代电路中繁多的电感器和电容器, 从而减少电路元件的数量, 促进器件小型化的发展. 例如, 传统的负载点转换器为了实现高效率、高功率密度和低噪声, 需要高性能的电感和大量的输出电容. 而基于可调电感器的负载点转换器, 稳态时电感大, 负载瞬态时电感小, 从而增加了电流的转化率和大大减少电容器的数量. 目前对电感调控的方法主要有离散型、金属屏蔽型、磁芯调节型和线圈耦合型等, 但是面临着制造复杂、体积较大、功耗高、

可调性小等各类问题^[2-4].

近年来, 磁电电压可调电感器成为研究的热点, 由磁致伸缩材料和压电材料组成的磁电复合材料作为磁芯, 通过电场调控磁导率, 进而达到调控电感的目的^[5-7]. 利用这种方法可以减低能耗, 缩减体积, 且具有较大的可调性^[8,9]. Lou 等^[10]利用复合多铁性材料 Metglas (FeSiB 合金箔)/PZT (锆钛酸铅)/Metglas 作为磁芯, 通过电场可以实现低频下电感量 450% 的调节. Liu 等^[11]利用复合多铁性材料 PZT/MnZn 铁氧体/PZT 作为环形铁芯, 通过电场调控, 可以实现电感量 56.6% 的调节. 而 Yan 等^[1]利用复合多铁性材料 PZT/NiZnCu-Co Fe₂O₄ 铁氧体/PZT 作为环形铁芯, 实现电场对电感的调控. Geng 等^[12-15]和 Ma 等^[16]采用相场模拟和第一性原理对电感的可调性给出合理的解释.

* 国家自然科学基金 (批准号: 520721178, 51911530120, 51790492, 11874032)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 30920041119) 和俄罗斯基础研究基金会 (批准号: 19-07-00391) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yjwang@njjust.edu.cn

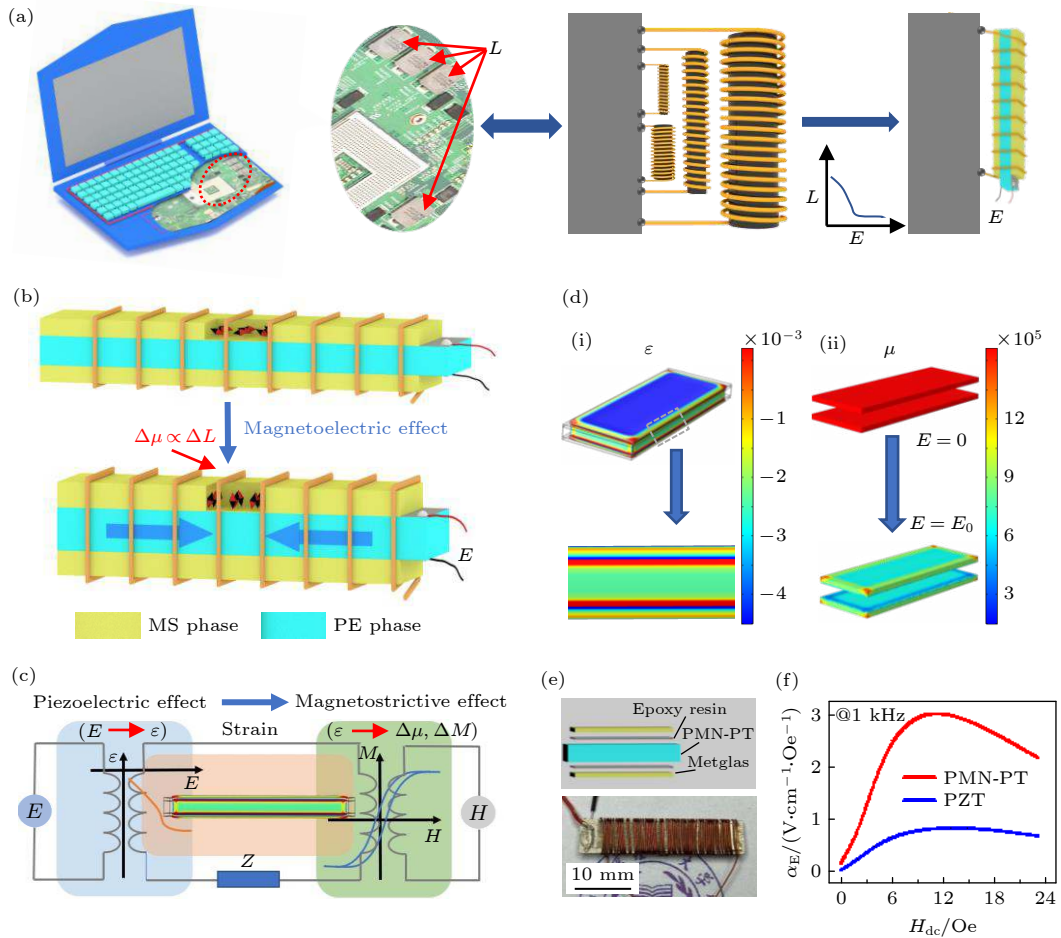


图1 磁电电压可调电感器 (a) 应用示意图; (b) 结构示意图; (c) 逆磁电效应原理图; (d) (i) 和 (ii) 分别为电场作用时应变和磁导率的变化图; (e) 实物图; (f) PMN-PT 基和 PZT 基磁电系数随偏置磁场的变化

Fig. 1. Magneto-electric voltage tunable inductor (ME-VTI): (a) Potential application and (b) structure of ME-VTI; (c) principle of inverse magneto-electric effect; (d) the variation of (i) strain and (ii) permeability under electric field; (e) photo for a ME-VTI; (f) the ME voltage coefficient of the Metglas/PMN-PT/Metglas and Metglas/PZT/Metglas.

然而, 以往的研究报道主要从优化磁芯结构和改良磁致伸缩材料两个方面入手提高可调性, 其磁芯压电相主要选用 PZT 陶瓷, 这造成电感制备工艺复杂 (如环形结构和烧结工艺等) 和可调性提高不大等问题. 本文采用性能优异的 [110] 切型 PMN-PT 单晶 (铌镁酸铅-钛酸铅) 作为磁芯的压电相, 制备了结构简单且可调性大的条形磁电电压可调电感器 (ME-VTI). PMN-PT 单晶具有超高的压电响应 ($d_{31} > 1400 \text{ pC/N}$) 和机电耦合系数 ($k_{31} > 90\%$), 并且具有比传统 PZT 陶瓷高出 10 倍以上的场致应变^[17-19].

除此之外, 准静态下 PMN-PT 基磁电复合材料的磁电系数 α_E 大于 PZT 基的. 如图 1(f) 所示, 在 1 kHz 时, PMN-PT 基的 α_E 为 $3 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$ ($1 \text{ Oe} = 10^3/(4\pi) \text{ A/m}$), 相当于 PZT 基的 3 倍.

本文采用磁电复合材料 Metglas/PMN-PT 单

晶/Metglas 作磁芯, 设计了 1 个条形电压可调电感器, 具有高达 680% 的可调性. 为了提高电感可调性, 以往从减少初始磁各向异性 (包括磁晶各向异性和形状各向异性) 和提高初始磁导率的角度入手, 如优化结构、改善磁性材料等, 而本文从提高应力或应变诱导的各向异性的角度出发, 达到提高电感可调性的目的.

2 可调电感模型

2.1 ME-VTI 的工作原理

磁电效应分为正磁电效应和逆磁电效应, 前者施加磁场 H 导致电极化 P 的出现, 后者施加电场 E 导致磁化 M 的出现^[20]. 正磁电效应主要应用在磁场传感器、能量收集器、电流传感器和生物医学

组件, 而逆磁电效应主要用在存储器、可调器件、天线等^[21-26]. 磁电电压可调电感器的结构如图 1(b) 所示, 可调原理基于逆磁电效应, 即电场引起磁化状态的改变, 它是压电效应和磁致伸缩效应的乘积作用^[27], 其原理如图 1(c) 所示. 作为电感磁芯的压电相受到电场作用发生形变, 以应变为媒介传递到磁致伸缩相, 磁致伸缩相发生应变使得其内部磁畴发生运动, 最终导致磁导率的变化, 电感随之改变. 压电相受到电场作用时, 磁电复合材料的应变分布如图 1(d)-(i) 所示, 磁致伸缩相发生明显的应变. 压电相施加电场前后磁致伸缩相磁导率的变化, 结果如图 1(d)-(ii) 所示, 磁导率因受到应力或应变而发生改变, 因此电感可调本质上是磁导率的可调.

2.2 ME-VTI 的理论模型

均匀的弹性电介质状态可以用一些参变量来表征, 考虑以应力 T 和电场 E 为独立变量 (压电体在工作过程中不可避免地要发热, 难以维持等温条件, 但热交换通常可忽略, 即满足绝热条件), 特征函数吉布斯自由能及其微分形式为

$$\begin{aligned} G &= U - T_i S_i - E_m D_m, \\ dG &= -S_i dT_i - D_m dE_m. \\ i &= 1-6, m = 1-3. \end{aligned} \quad (1)$$

应变 S 和电位移 D 是关于应力 T 和电场 E 的函数, 在零应力和零电场附近, 利用 (1) 式泰勒展开保留一次项:

$$\begin{aligned} S_i &= -\frac{\partial^2 G}{\partial T_i \partial T_j} T_j - \frac{\partial^2 G}{\partial T_i \partial E_m} E_m, \\ D_m &= -\frac{\partial^2 G}{\partial E_m \partial E_n} E_n - \frac{\partial^2 G}{\partial E_m \partial T_i} T_i. \end{aligned} \quad (2)$$

此外,

$$S_i = \frac{\partial S_i}{\partial T_j} T_j + \frac{\partial S_i}{\partial E_m} E_m, \quad D_m = \frac{\partial D_m}{\partial T_i} T_i + \frac{\partial D_m}{\partial E_n} E_n. \quad (3)$$

对比 (2) 式和 (3) 式, 引入:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 G}{\partial T_i \partial E_m} &= -\frac{\partial^2 G}{\partial E_m \partial T_i} = \frac{\partial S_i}{\partial E_m} = \frac{\partial D_m}{\partial T_i} = d_{mi}, \\ -\frac{\partial^2 G}{\partial T_i \partial T_j} &= \frac{\partial S_i}{\partial T_j} = s_{ij}^E, \quad -\frac{\partial^2 G}{\partial E_m \partial E_n} = \frac{\partial D_m}{\partial E_n} = \varepsilon_{mn}^T. \end{aligned} \quad (4)$$

因此,

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m, \quad D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mn}^T E_n, \quad (5)$$

其中 s_{ij}^E 为弹性柔顺常数, ε_{mn}^T 为电容率, d_{mi} 为压电常数. (5) 式是以应力 T 和电场 E 为独立变量的

弹性电介质线性状态方程, 由 (4) 式可以看出, 对特征函数的二次泰勒展开可以在线性范围内表示电介质. 而本文利用压电材料沿长度方向应变, 压电材料应变 ${}^p S_1$ 及应力张量的纵向分量 ${}^p T_1$ 为

$$\begin{aligned} {}^p S_1 &= {}^p s_{11}^E {}^p T_1 + d_{31} E, \\ {}^p T_1 &= \frac{1}{{}^p s_{11}^E} {}^p S_1 - \frac{d_{31}}{{}^p s_{11}^E} E. \end{aligned} \quad (6)$$

2-2 型的磁电复合材料, 基于逆磁电效应而言, 磁致伸缩相的变形受压电相的变形所致, 故磁致伸缩相的应变 ${}^m S_1$ 及应力张量的纵向分量 ${}^m T_1$ 分别为

$$\begin{aligned} {}^m S_1 &= k {}^p S_1, \\ {}^m T_1 &= {}^m Y {}^m S_1 = k {}^m Y {}^p S_1, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 k 为应变传递因子 (界面耦合因子), 与胶水的选择和厚度, 材料的选择等因素有关; ${}^m Y$ 为磁致伸缩相的杨氏模量.

磁致伸缩相和压电相的体积分数 ${}^m \nu$ 和 ${}^p \nu$ 分别为

$${}^m \nu = {}^m t / t, \quad {}^p \nu = {}^p t / t, \quad (8)$$

其中 ${}^m t$, ${}^p t$ 和 t 分别为磁致伸缩相的厚度、压电相的厚度和两相的总厚度.

结合 (6)–(8) 式能够得到, ME 复合材料总应力张量的纵向分量 T_1 为

$$\begin{aligned} T_1 &= {}^m \nu {}^m T_1 + {}^p \nu {}^p T_1 = Y {}^p S_1 - \frac{{}^p \nu d_{31}}{{}^p s_{11}^E} E, \\ Y &= \frac{{}^p \nu}{{}^p s_{11}^E} + k {}^m \nu {}^m Y, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 Y 为磁致伸缩相束缚下压电材料的杨氏模量. 对于自由状态 ME 复合材料的边界条件 $T_1 = 0$, 故由 (7) 式和 (9) 式可知, 压电相应变 ${}^p S_1$ 和磁致伸缩相的应力 ${}^m T_1$ 分别为

$${}^p S_1 = \frac{{}^p \nu d_{31}}{Y {}^p s_{11}^E} E, \quad {}^m T_1 = \frac{k {}^m Y {}^p \nu d_{31}}{Y {}^p s_{11}^E} E. \quad (10)$$

磁致伸缩相的相对磁导率 μ_r 定义为

$$\mu_r = 1 + \frac{\mu_0 M_s^2}{2 |n K_0 + K_\sigma|}, \quad K_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s {}^m T_1, \quad (11)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, M_s 为饱和磁化强度, K_0 为初始磁各向异性 (包括磁晶各向异性和形状各向异性), K_σ 为应力诱导磁各向异性 (应力各向异性), n 为符号因子取 ± 1 (与 K_0 的符号有关), λ_s 为饱和磁致伸缩系数. 考虑到电感线圈匝数、面积、气隙间距等多因素的影响, 为了方便研究磁导率对电感的影响, 因此定义电感 L 为

$$L = \mu_r G, \quad G = L_0 / \mu_{r0}, \quad (12)$$

其中参数 G 为比例因子, 与线圈匝数, 面积等因素有关, 其物理意义为磁导率为 1 时的电感值; L_0 和 μ_{r0} 是零电场时的电感和磁导率.

结合 (10)–(12) 式得到电感 L 为

$$L = \frac{L_0}{\mu_{r0}} \left(1 + \frac{\mu_0 M_s^2}{|2nK_0 + 3CE|} \right),$$

$$C = \frac{k\lambda_s^m Y^p \nu d_{31}}{Y^p s_{11}^E}, \quad (13)$$

其中 C 为常数, 由压电材料和磁性材料的参数、压电材料体积比、应变传递因子决定. 而对应的磁电电压电感器可调性 γ 可近似为

$$\gamma = \frac{L_0 - L_E}{L_E} = \frac{3k\lambda_s^m Y^p \nu d_{31}}{2nK_0 Y^p s_{11}^E} E. \quad (14)$$

基于理论模型, 本文采用场致应变较大的压电材料 PMN-PT 单晶和初始磁各向异性较小的磁致伸缩材料 Metglas, 最终实现电感可调性的增加.

3 实验

3.1 实验材料

实验所用 Metglas 购自 Vacuumscheltze GmbH & Co. KG, Germany; PMN-PT 单晶由上海硅酸盐研究所提供, 通过改进的 Bridgman 技术从熔体中生长; PZT 陶瓷购自中国宏声声学电子器材有限公司; 黏合剂采用美国采购的 west system 双组分环氧树脂 105&206 型.

3.2 ME-VTI 的制备

ME-VTI 的制作主要分两步, 具体为:

1) 磁芯的制备. 选用 PMN-PT 单晶和 PZT 陶瓷的尺寸为 $28 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$, Metglas 的尺寸为 $24 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.025 \text{ mm}$. 按一定比例配制黏合剂, PMN-PT 和 PZT 上下表面各沾一层 Metglas. 将三明治结构的磁电复合材料常温固化 24 h, 固化后, PMN-PT 和 PZT 上下表面各引一根导线.

2) 线圈的制备. 选用铜线直径 $\varphi = 0.2 \text{ mm}$. 根据上述磁芯尺寸, 围绕磁芯紧密缠绕约 50 圈线圈.

3.3 表征方法

通过中国爱伏特电子科技有限公司 AFT-

0951 型动态应变仪测量压电材料的场致应变, 使用美国 Agilent 公司 4294A 型阻抗分析仪进行可调电感器电感的测试, 使用美国 Keithley 仪器公司 2410 型电源为材料提供可调电场.

4 实验结果分析

4.1 压电材料场致应变对比

图 2(a)-(i) 对比几种 PZT 陶瓷和 PMN-PT 单晶的场致应变, PMN-PT 的场致应变远大于 PZT. 对于 PMN-PT 单晶的场致应变可以划分为 3 个阶段. 阶段 I: 当电场 $E < 10 \text{ kV/cm}$ 时, PMN-PT 单晶应变随着电场增加而线性增加; 阶段 II: 当电场 E 增加至 $10\text{--}12 \text{ kV/cm}$ 时, 应变突增至

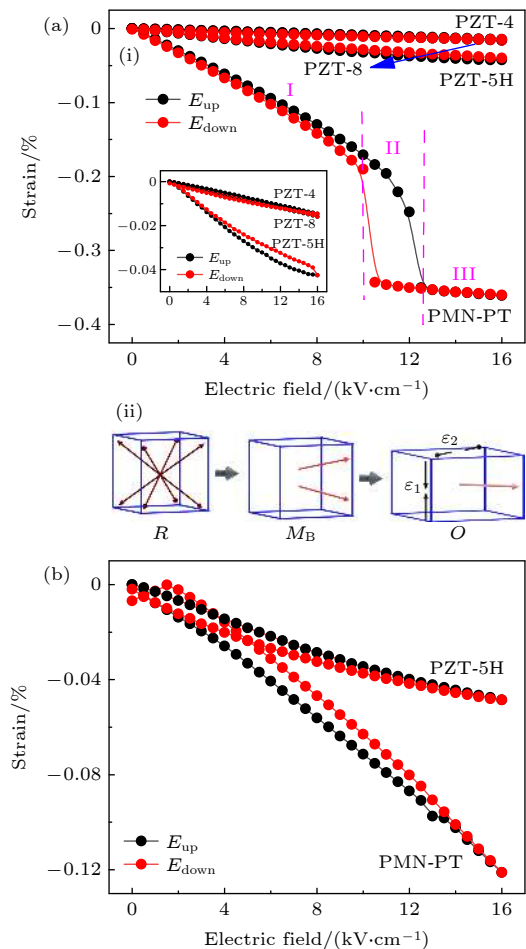


图 2 (a) (i) 和 (ii) 分别为 PZT 及 PMN-PT 的场致应变图和 PMN-PT 的相变示意图; (b) Metglas 束缚时 PZT 和 PMN-PT 的场致应变图

Fig. 2. (a) (i) Electric-field induced strain of PZT and PMN-PT and (ii) the phase transition of PMN-PT; (b) the electric-field induced strain of PZT and PMN-PT based ME composites.

0.36%; 阶段 III: 当电场 $E > 12$ kV/cm, 单晶应变又随着电场增加而线性增加, 且 $\Delta\epsilon/\Delta E$ 小于阶段 I. PMN-PT 单晶场致应变之所以有 3 个阶段, 原因如图 2(a)-(ii) 所示. 阶段 I: 初始态 PMN-PT 单晶为三方相 (R), 有 8 个等价的随机分布的自发极化方向 $\langle 111 \rangle$, 沿 $[110]$ 方向加电场, 铁电畴发生翻转, 最终形成“2R”工程畴结构 [28], 此阶段应变主要源于电畴翻转; 阶段 II: 当 $[110]$ 方向电场进一步增大, 原本的三方相晶格在电场作用下发生 $R-M_B-O$ 相变 [29], 此时应变主要源于场致相变; 阶段 III: 在大电场下, PMN-PT 单晶为正交相, 且正交相自发极化方向沿 $\langle 110 \rangle$ 方向, 与外电场方向平行, 因此形成了“1O”的单畴结构 [28], 此时应变主要来源于本征压电晶格畸变. 考虑到压电相上下表面附着磁相

后场致应变可能会被束缚, 因此针对研究所需 PZT 和 PMN-PT 进行磁电复合后场致应变分析. 如图 2(b) 所示, PZT 的场致应变曲线复合前后几乎没有改变, 而 PMN-PT 单晶的场致应变复合后呈线性趋势增加, 整体变为复合前的 1/3, 且仍大于 PZT 复合的场致应变.

4.2 可调性分析

图 3(a)–(c) 展示了不同电场下 PZT 基和 PMN-PT 基 ME-VTI 的电感频谱图. 较高频率下, PZT 基的电感比 PMN-PT 基的衰减得更快, 二者在高频下降的原因是涡流损耗. 高频下磁芯为了抵挡外部交流磁场, 内部会产生涡流, 而 Metglas 具有较小的电阻率, 导致较大电流, 因此有较大的涡

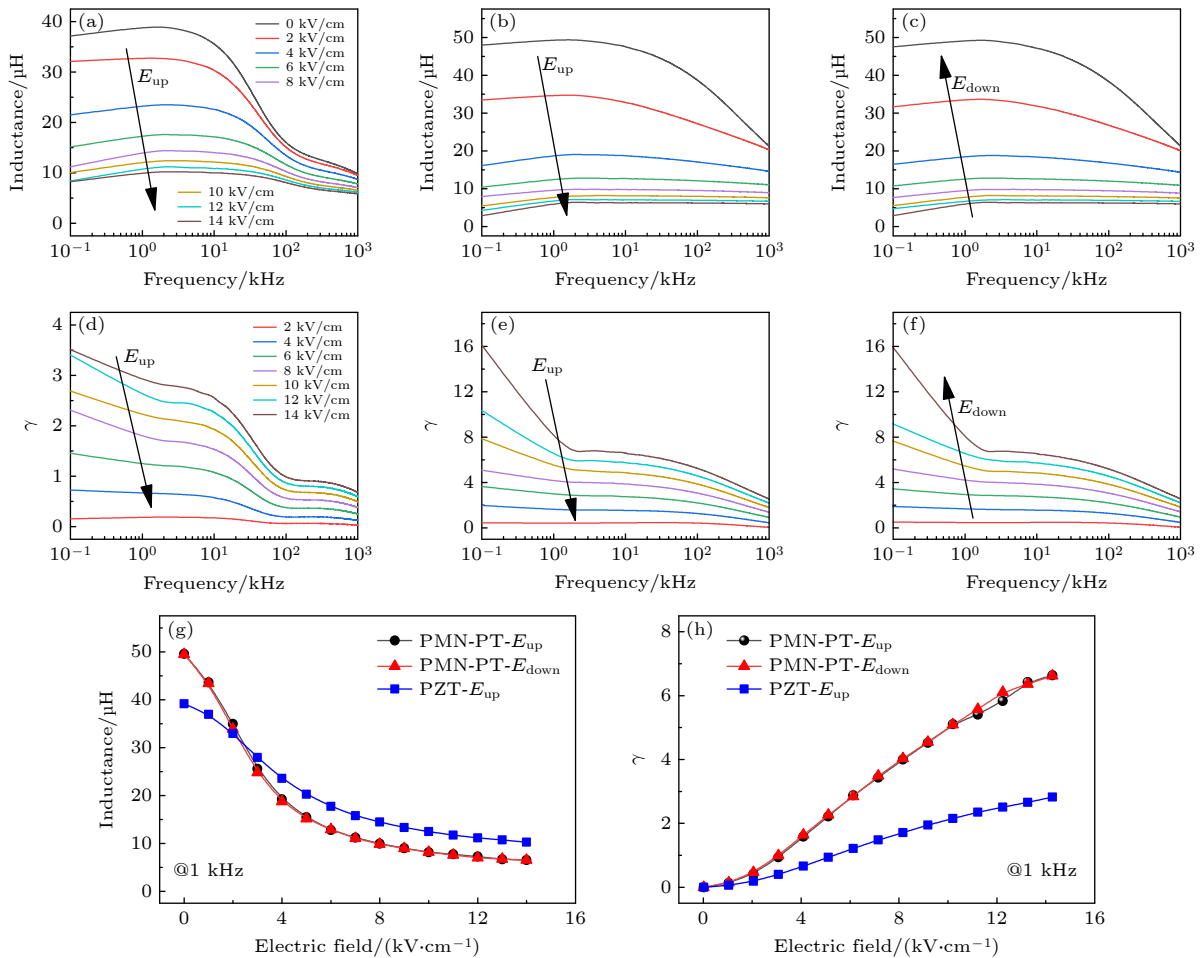


图 3 (a)–(c) 和 (d)–(f) 分别为磁电电压可调电感器 PZT 基 (E -field up)、PMN-PT 基 (E -field up)、PMN-PT 基 (E -field down) 的电感频谱图和可调性频谱图; (g) 1 kHz 时直流电场对 PZT 基和 PMN-PT 基电感的影响; (h) 1 kHz 时 PZT 基和 PMN-PT 基的电感可调性

Fig. 3. (a)–(c) Inductance and (d)–(f) tunable spectra of PZT based (E -field up), PMN-PT based (E -field up) and PMN-PT based (E -field down) ME-VTI, respectively; (g) inductance of PZT based and PMN-PT based ME-VTI as a function of the applied dc voltage at 1 kHz; (h) tunability γ of PZT based and PMN-PT based ME-VTI at 1 kHz.

流损耗. 图 3(d)–(f) 展示不同电场下 PZT 基和 PMN-PT 基 ME-VTI 的可调性频谱图. 较低频率时, PMN-PT 基电感相比于 PZT 基, 随电场的增加电感下降得更快. 较高频率时, PMN-PT 基电感可调性稳定性较好. 如图 3(g) 和图 3(h) 所示, 在频率为 1 kHz 时, PMN-PT 基电感可调性达到 680%, 相当于 PZT 基电感的 3 倍. 原因是 PMN-PT 单晶的应变远大于 PZT, 对磁性材料磁畴的翻转影响更大. 可调性起初增加缓慢, 因为电场导致的应力或应变较小, 磁畴只在面内转动; 电场超过临界电场, 电场导致的应变增大, 磁畴面外转动占主导因素.

4.3 品质因子分析

图 4(a)–(c) 代表不同电场下 PZT 基和 PMN-PT 基 ME-VTI 的品质因子频谱图. 品质因子体现电感储能的优劣. PMN-PT 基电感品质因子明显高于 PZT 基, 并随电场增加峰值右移且增加. 两个体系的品质因子在频率较高时, 随着电场的增加品质因子均增加, 原因是磁导率的降低导致趋肤深度增加, 电阻降低, 因此涡流损耗减少. 而 PMN-PT 基电感品质因子的峰值之所以会右移, 与应力导致磁致伸缩材料磁导率的降低有关, 因此也可以利用电场实现对铁磁共振频率的调控.

5 理论及有限元模拟分析

5.1 理论分析

根据实验数据及以往的研究报道^[30], Metglas 的饱和磁致伸缩系数为 27×10^{-6} , 杨氏模量为 110 GPa, 初始磁各向异性约为 700 J/m^3 . PZT 和 PMN-PT 的弹性柔顺常数分别为 $16.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ 和 $112 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, 压电常数 d_{31} 分别为 $-274 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ 和 $-1883 \times 10^{-12} \text{ C/N}$. 实验中采用的压电材料和磁致伸缩材料体积比分别为 0.9231 和 0.0769. 根据初始磁各向异性的符号及实验数据电感随电场减小, 可知符号因子 n 为 -1 . 由图 2 分析, PZT 基和 PMN-PT 基的应变传递因子 k 分别取 1 和 0.7. 结合前述推导的 (13) 式, 如图 5 所示, 通过拟合 PZT 基和 PMN-PT 基电场对电感的调控, 可以看出理论与实验数据趋势较为一致, 其中微弱的偏离与磁畴和材料微观结构的不均匀性、胶水造成的应力松弛等因素有关.

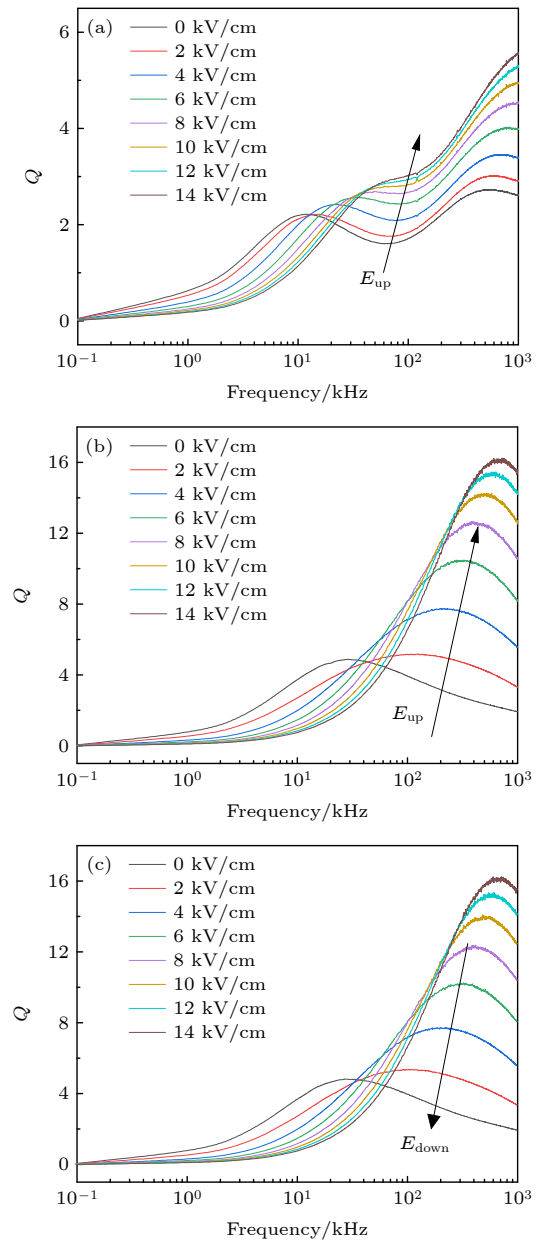


图 4 (a)–(c) 磁电电压可调电感器 PZT 基 (E -field up)、PMN-PT 基 (E -field up)、PMN-PT 基 (E -field down) 的品质因子频谱图

Fig. 4. (a)–(c) Quality factor spectra of PZT based (E -field up), PMN-PT based (E -field up), and PMN-PT based (E -field down) ME-VTI.

5.2 有限元模拟分析

图 6(a) 展示了不同频率下 PMN-PT 基 ME-VTI 的可调性, 各频率下随电场的增加可调性均增加. 图 6(c) 和图 6(d) 对磁性材料的应力和磁导率进行有限元分析, 可以看出应力导致磁导率降低, 而磁导率又直接影响电感的变化, 模拟结果与图 6(b) 中的实验结果一致.

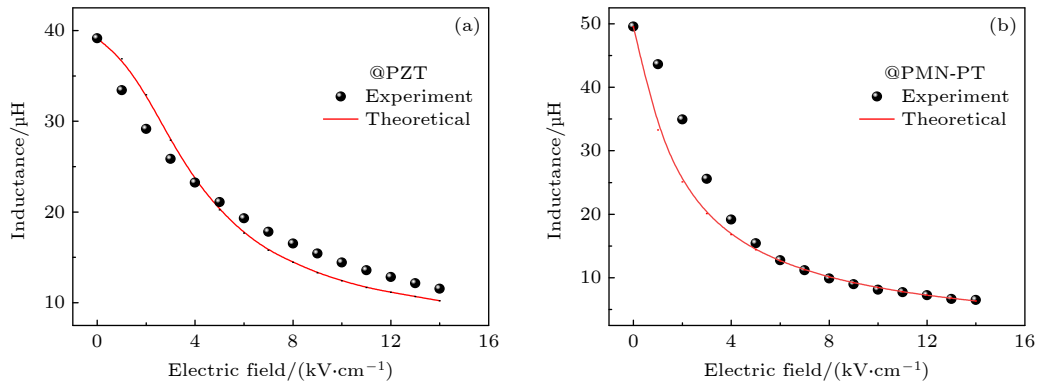


图 5 (a) PZT 基和 (b) PMN-PT 基电场对电感的调控, 黑色的点代表实验数据, 红色的线代表理论曲线。
Fig. 5. Variation of (a) PZT based and (b) PMN-PT based inductance under electric field, respectively. The black dots represent the experimental data, and the red line represents the theoretical curve.

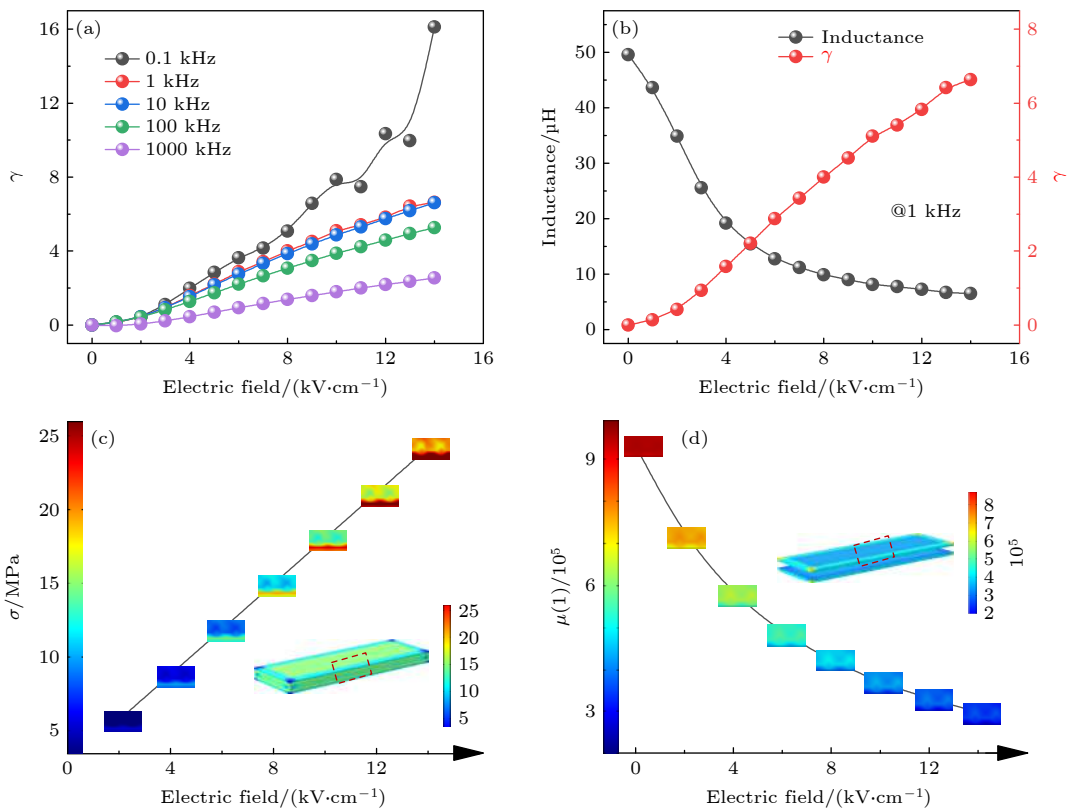


图 6 (a) 各频率下 PMN-PT 基电压可调电感器电场对可调性的影响; (b) 1 kHz 下 PMN-PT 基电压可调电感器电场对电感和可调性的影响; (c), (d) 分别为电场对应力和磁导率影响的模拟图
Fig. 6. Influence of electric field of PMN-PT based ME-VTI on (a) tunability at various frequencies; (b) influence of electric field of PMN-PT based ME-VTI on inductance and tunability at 1 kHz; simulation of electric field dependent (c) stress and (d) permeability, respectively.

6 结 论

本文通过构建理论模型, 着眼于压电材料场致应变对电感可调性的影响, 分别采用同尺寸 Metglas/PMN-PT/Metglas 磁电复合材料和 Metglas/PZT/Metglas 磁电复合材料作为磁芯制备了 ME-

VTI. 由于 PMN-PT 基的场致应变大于 PZT 基, 所制得的电感器 1 kHz 时可调性达到 680%, 为 PZT 基电感的 2.4 倍. 前者的品质因子达到 15.6, 相对于后者提高 2.8 倍. 基于 PMN-PT 单晶的 ME-VTI 和其他类型的可调电感器相比, 具有功耗低, 体积小, 可调性大等优势, 未来在集成化、小型化、多功能化的电子领域有着重要的应用前景.

参考文献

- [1] Yan Y K, Geng L W D, Tan Y H, Ma J H, Zhang L J, Sanghadasa M, Ngo K, Ghosh A W, Wang Y U, Priya S 2018 *Nat. Commun.* **9** 4998
- [2] Peng B, Zhang C, Yan Y, Liu M 2017 *Phys. Rev. Appl.* **7** 044015
- [3] Zhang J, Chen D, Filippov D A, Li K, Zhang Q, Jiang L, Zhu W, Cao L, Srinivasan G 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 113502
- [4] Zhang J, Chen D, Filippov D A, Zhang Q, Li K, Hang X, Ge B, Cao L, Srinivasan G 2019 *IEEE Trans. Magn.* **55** 7
- [5] Liu G, Zhang Y, Ci P, Dong S 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 064107
- [6] Yang N N, Chen X, Wang Y J 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 157508 (in Chinese) [杨娜娜, 陈轩, 汪尧进 2018 *物理学报* **67** 157508]
- [7] Yu B, Hu Z Q, Cheng Y X, Peng B, Zhou Z Y, Liu M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 157507 (in Chinese) [俞斌, 胡忠强, 程宇心, 彭斌, 周子尧, 刘明 2018 *物理学报* **67** 157507]
- [8] Lin H, Lou J, Gao Y, Hasegawa R, Liu M, Howe B, Jones J, Brown G, Sun N X 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 1
- [9] Yan Y, Geng L, Zhang L, Tu C, Sri Ramdas R M, Liu H, Li X, Sanghadasa M, Ngo K D T, Wang Y U, Priya S 2020 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **12** 44981
- [10] Lou J, Reed D, Liu M, Sun N X 2016 *Appl. Phys. Lett.* **94** 112508 2016 *Appl. Phys. Lett.* **94** 112508
- [11] Liu G, Cui X, Dong S 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 094106
- [12] Geng L, Yan Y, Priya S, Wang Y U 2020 *ACS Applied Mater. Interfaces* **12** 44981
- [13] Geng L W D, Yan Y K, Priya S, Wang Y U 2017 *Acta Mater.* **140** 97
- [14] Geng L D, Yan Y, Priya S, Wang Y U 2019 *Acta Mater.* **166** 493
- [15] Geng L D, Yan Y, Priya S, Wang Y U 2020 *Phys. Rev. B* **101** 054422
- [16] Ma F D, Jin Y M, Wang Y U, Kampe S L, Dong S 2014 *Acta Mater.* **70** 45
- [17] Wang Y, Wang Z, Ge W, Luo C, Li J, Viehland D, Chen J, Luo H 2014 *Phys. Rev. B* **90** 134107
- [18] Wang Y, Wen X, Jia Y, Huang M, Wang F, Zhang X, Bai Y, Yuan G, Wang Y 2020 *Nat. Commun.* **11** 1328
- [19] Li F, Zhang S J, Xu Z 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 217703 (in Chinese) [李飞, 张树君, 徐卓 2020 *物理学报* **69** 217703]
- [20] Chu Z, Shi H, Shi W, Liu G, Wu J, Yang J, Dong S 2017 *Adv Mater.* **29** 1606022
- [21] Wang Y J, Gray D, Berry D, Gao J Q, Li M H, Li J F, Viehland D 2011 *Adv. Mater.* **23** 4111
- [22] Liu G, Ci P, Dong S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 032908
- [23] Chu Z, PourhosseiniAsl M, Dong S 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 243001
- [24] Wang Y, Li J, Viehland D 2014 *Mater. Today* **17** 269
- [25] Chu Z, Dong C, Tu C, He Y, Liang X, Wang J, Wei Y, Chen H, Gao X, Lu C, Zhu Z, Lin Y, Dong S, McCord J, Sun N X 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 044001
- [26] Wang H, Xu M, Zheng R K 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 017301 (in Chinese) [王慧, 徐萌, 郑仁奎 2020 *物理学报* **69** 017301]
- [27] Li M, Wang Y, Hasanyan D, Li J, Viehland D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 132904
- [28] Wang Y, Wang D, Yuan G, Ma H, Xu F, Li J, Viehland D, Gehring P M 2016 *Phys. Rev. B* **94** 174103
- [29] Wang D, Yuan G, Luo H, Li J, Viehland D, Wang Y 2017 *J. Am. Ceram. Soc.* **100** 4938
- [30] Yan Y K, Geng L W D, Zhang L J, Gao X Y, Gollapudi S, Song H C, Dong S X, Sanghadasa M, Ngo K, Wang Y U, Priya S 2017 *Sci. Rep.* **7** 16008

Theoretical model and tunability optimization of magnetoelectric voltage tunable inductor*

Nie Chang-Wen¹⁾ Wu Han-Zhou¹⁾ Wang Shu-Hao¹⁾ Cai Yuan-Yuan¹⁾
 Song Shu¹⁾ Sokolov Oleg²⁾ Bichurin M. I.²⁾ Wang Yao-Jin^{1)†}

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

2) (*Department of Engineering Physics, Novgorod State University, Novgorod 173003, Russia*)

(Received 11 May 2021; revised manuscript received 28 August 2021)

Abstract

Magnetoelectric voltage tunable inductor (ME-VTI) realizes the modulation of electric field to inductance based on magnetoelectric effect. Compared with other adjustable inductors, it has the advantages of low energy consumption, small volume, large tunability and continuity. However, previous reports on ME-VTI mainly focused on structure and magnetostrictive materials, resulting in the complexity of inductor structure and slight improvement of tunability. This study focuses on the influence of field-induced strain in piezoelectric materials on inductance tunability by constructing a theoretical model. The magnetoelectric laminate of Metglas/ PMN-PT single crystal /Metglas is employed as a magnetic core to design ME-VTI. The tunability is as high as 680% at 1 kHz, which is over 2.4 times larger than that of the Metglas/PZT/Metglas magnetic core. The quality factor of the PMN-PT based ME laminate reaches 15.6, which is 2.8 times higher than that of the PZT-based one. The proposed PMN-PT based ME-VTI provides an alternative approach for developing the integrated and miniaturized devices, and has an important prospect of application in the field of power electronics.

Keywords: tunable inductor, magnetoelectric effect, field-induced strain, piezoelectric single crystal

PACS: 75.85.+t, 77.65.Ly, 85.80.Jm

DOI: [10.7498/aps.70.20210899](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210899)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 520721178, 51911530120, 51790492, 11874032), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 30920041119), and the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 19-07-00391).

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