

外磁场与带轴夹角对非晶FeSiB/Cu/FeSiB三明治薄带巨磁阻抗特性的影响

邵先亦 徐爱娇 王天乐

Effects of the angle between magnetic field and ribbon axis on the magneto-impedance properties of amorphous FeSiB/Cu/FeSiB sandwiched ribbon

Shao Xian-Yi Xu Ai-Jiao Wang Tian-Le

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 067501 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181806

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181806>

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

[三明治结构graphene-2Li-graphene的储氢性能](#)

Hydrogen storage capacity of expanded sandwich structure graphene-2Li-graphene

物理学报. 2019, 68(5): 053601-1 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181497>

[Co基金属纤维不对称巨磁阻抗效应](#)

Asymmetric giant magnetoimpedance of Co-rich melt-extraction microwires

物理学报. 2015, 72(16): 167501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.167501>

[过渡金属掺杂的扶手椅型氮化硼纳米带的磁电子学特性及力-磁耦合效应](#)

Magneto-electronic properties and mechano-magnetic coupling effects in transition metal-doped armchair boron nitride nanoribbons

物理学报. 2017, 74(23): 238501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.238501>

[基于AZO/VO2/AZO结构的电压诱导相变红外光调制器](#)

Infrared modulator based on AZO/VO2/AZO sandwiched structure due to electric field induced phase transition

物理学报. 2016, 73(24): 248102 <https://doi.org/10.7498/aps.65.248102>

[三角形石墨烯量子点阵列的磁电子学特性和磁输运性质](#)

Magneto-electronic and magnetic transport properties of triangular graphene quantum-dot arrays

物理学报. 2017, 74(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.138501>

外磁场与带轴夹角对非晶 FeSiB/Cu/FeSiB 三明治薄带巨磁阻抗特性的影响*

邵先亦^{1)†} 徐爱娇¹⁾ 王天乐²⁾

1) (台州学院电子与信息工程学院, 台州 318000)

2) (台州学院医药化工与材料工程学院, 台州 318000)

(2018 年 10 月 7 日收到; 2019 年 1 月 4 日收到修改稿)

采用层间胶合方法制备了淬态非晶 FeSiB/Cu/FeSiB 三明治薄带, 研究了同尺寸单层薄带和三明治薄带的巨磁阻抗 (giant magneto-impedance, GMI) 随外磁场与带轴夹角 β 的变化特性. 结果表明, FeSiB 单层薄带在 7.0 MHz 最佳响应频率下, GMI 仅约 30%, 外磁场与带轴夹角对单层薄带 GMI 几乎没有影响; 三明治薄带的 GMI 效应则十分显著, 在 0.6 MHz 最佳响应频率下, 纵、横向 GMI 比分别达到 272% 和 464%, GMI 随 β 的增大而增强; 所有 β 角的三明治薄带 GMI 曲线都出现各向异性峰, 各向异性峰随 β 的增大而展宽. 根据磁畴转动模型推导了薄带横向磁导率与各向异性场及 β 之间的函数关系式. 结果显示, 三明治薄带 GMI 随夹角 β 变化的特性与理论推算的横向磁导率变化有较好的一致性, 而单层薄带则不然. 该磁畴转动模型能定性解释三明治薄带 GMI 随外磁场方向变化特性.

关键词: 巨磁阻抗效应, FeSiB, 三明治薄带

PACS: 75.50.Bb, 75.50.Kj, 75.30.Gw

DOI: 10.7498/aps.68.20181806

1 引言

巨磁阻抗 (giant magneto-impedance, GMI) 效应由于在磁传感器领域有着广阔的应用前景而受到人们的广泛关注. 优异的软磁性能是获得显著 GMI 效应的前提, 磁畴结构是影响 GMI 特性的重要因素, 具有环向 (丝) 或横向 (薄膜、薄带) 磁畴结构, 有利于获得显著的 GMI 效应^[1,2]. 以 FeSiB 为代表的 Fe 基非晶薄带软磁性能优良、制备工艺简单, 在电力电子行业有着广泛应用, 但是 Fe 基非晶薄带在快淬过程中一般形成纵向磁畴结构, 难以获得显著的 GMI 效应^[3]. 经适当退火处理的 FeCuNbSiB 和 FeZrBCu 等 Fe 基纳米晶薄带, 软磁性能优异且具有横向磁畴结构, GMI 效应十

分显著^[4,5]. 但是退火处理会造成材料变脆, 不利于 GMI 器件的实际应用. 因此, 开展 Fe 基非晶薄带 GMI 增强研究, 有利于拓展其在磁传感领域的应用.

相比于单层薄膜和薄带材料, 三明治膜、复合多层膜及三明治薄带能够在更低的频率下获得更为显著的 GMI 效应^[6-8]. 三明治薄膜和复合多层膜通常以磁控溅射方法制备^[7,9,10], 工艺复杂、制作成本高. 而三明治薄带一般通过层间胶结就可实现, 不仅制备工艺简单, GMI 效应显著, 而且使用频率更低 (几十到几百 kHz)^[11-13], 这种低频特性能够降低 GMI 器件对外部驱动和检测电路的要求, 因此有利于 GMI 磁传感器的开发和应用. 近年来, 人们在 Co 基非晶^[11]、Fe 基纳米晶^[12]、FeNi 基非晶^[13] 三明治薄带都观察到了十分显著的

* 浙江省公益技术应用研究计划 (批准号: 2017C37096) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sxy8718@163.com

GMI 效应, 但是对于 FeSiB 三明治薄带的 GMI 效应缺少相关研究.

一般认为, 受控于横向磁导率的磁电感效应是三明治结构 GMI 的主要特征^[6], 各向异性^[14]及其与外磁场取向关系^[15–18]影响材料 GMI 特性. 基于 Maxwell 方程和 Landau-Lifshitz 方程^[19], 以及基于自由能最小原理的转动磁化模型^[20] 都能很好地解释三明治结构纵向 (外磁场平行于样品长方向) GMI 特性, 而关于外磁场方向变化对三明治结构 GMI 效应的影响尚未见相关研究和理论分析. 本文采用层间胶合方法制备了淬态非晶 FeSiB/Cu/FeSiB 三明治薄带, 研究了同尺寸单层薄带和三明治薄带 GMI 随外磁场与带轴夹角变化的特性, 根据磁畴转动模型, 推导了薄带横向磁导率与夹角 β 之间的函数关系式, 由此对 FeSiB 三明治薄带 GMI 随外磁场方向的变化特性进行了合理解释.

2 实验

FeSiB 薄带以单辊快淬法制备, 名义成分为 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$, 厚度约为 20 μm . 制样所用的 FeSiB 薄带从快淬宽带上切割而成, 长方向沿带轴方向, 长、宽分别为 28 mm 和 3.5 mm. FeSiB/Cu/FeSiB 三明治薄带由外部 FeSiB 磁性层和中间压延 Cu 箔导电层构成, Cu 箔长、宽、厚分别为 30 mm, 1 mm 和 18 μm . 两淬态 FeSiB 薄带贴辊面相对叠合将 Cu 箔夹于中间, 各层按轴向对称, 层间以氰基聚丙烯酸酯绝缘胶粘接, 胶层厚度约 10 μm . 磁阻抗测试装置示意图如图 1(a) 所示, 外加直流磁场由一对 Helmholtz 线圈提供, 磁场的变化范围为 $-23\text{--}23\text{ kA/m}$, 为减少地磁场的影响, 设置线圈的轴向与地磁场垂直. 样品磁阻抗用 Agilent 4294A

阻抗分析仪测量, 分析仪与样品之间通过 1 m 长标准夹具以四端法相连, 测量前进行了引线补偿; 驱动电流沿带轴流过样品, 电流幅值保持 10 mA, 电流频率 40 Hz—20 MHz. 通过一置于磁场中的 360° 角度盘带动样品转动来改变外磁场与样品轴向夹角, 转动过程中保持薄带平面与磁场平行. 图 1(b) 给出了三明治薄带的三维结构示意图, x, y, z 坐标分别表示样品长度 (即带轴方向)、宽度和厚度方向, 图中 \mathbf{H}_{ext} 表示外磁场方向, 外磁场与带轴夹角以 β 表示, $\beta = 0^\circ$ 为外磁场与样品带轴平行, 即通常所说的纵向 GMI (LMI), 从 0° 开始转动样品, 每隔 15° 测量磁阻抗, 直到外磁场与带轴垂直 $\beta = 90^\circ$, 即横向 GMI (TMI). 薄带磁性能用综合物性测量系统 (PPMS) 测量. 磁畴结构用磁力显微镜 (MFM) 表征, 磁力成像时探针抬高 300 nm. 所有测量均在室温下进行.

3 畴转磁化模型

根据图 1 的磁阻抗测量方法, 薄带中各物理量关系示意图如图 2 所示, 驱动电流 i 沿带轴 x 方向, 产生的横向驱动场 \mathbf{H}_t 沿薄带横向 y 方向. \mathbf{H}_k 表示非晶薄带面内应力各向异性等效场, 与带轴夹角为 θ_k ; 磁化矢量 \mathbf{M}_s 与 \mathbf{H}_k 的夹角为 θ ; 外磁场 \mathbf{H}_{ext} 平行于薄带表面, 与带轴夹角为 β .

根据图 2, 得到非晶薄带自由能表达式为

$$E = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2\theta - M_s H_{\text{ext}} \cos(\beta - \theta_k - \theta) - M_s H_t \sin(\theta_k + \theta). \quad (1)$$

由自由能最小条件 $\partial E/\partial\theta = 0$, 得小信号近似下平衡方程:

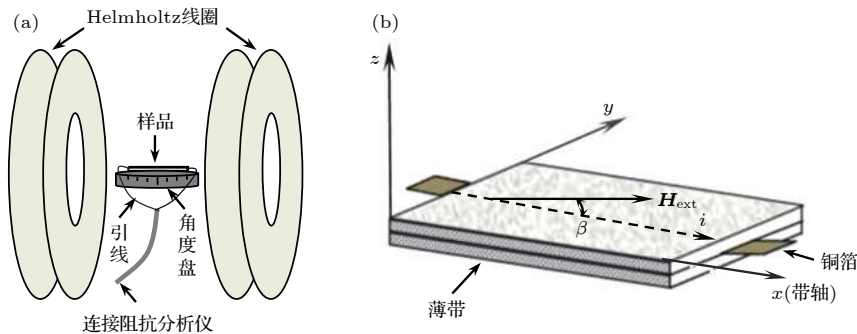


图 1 (a) 磁阻抗测试装置示意图; (b) 三明治薄带结构示意图

Fig. 1. (a) Schematic view of magneto-impedance measurement device; (b) structural sketch of sandwich ribbon.

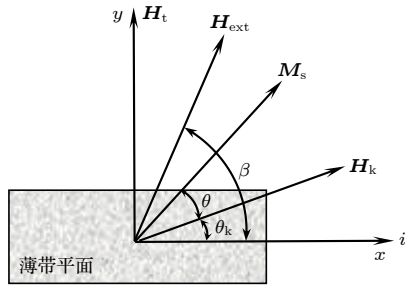


图2 薄带面内各向异性场、磁化强度、外磁场、交流驱动场关系示意图

Fig. 2. Sketch map of the relationship among in-plane anisotropy field, magnetization, external magnetic field, AC driven field in ribbon.

$$\frac{1}{2}H_k \sin 2\theta - H_{\text{ext}} \sin(\beta - \theta_k - \theta) = 0, \quad (2)$$

其中应力各向异性等效场 $H_k = 3\lambda_s\sigma/M_s$. 在小信号近似 ($H_t \ll H_{\text{ext}}$) 条件下, 可得薄带横向畴转磁化率^[21]:

$$\begin{aligned} \chi_t &= \frac{\partial M_t}{\partial H_t} = -\frac{\partial^2 E}{\partial H_t^2} \\ &= \frac{M_s \cos^2(\theta_k + \theta)}{H_k \cos 2\theta + H_{\text{ext}} \cos(\beta - \theta_k - \theta)}, \quad (3) \end{aligned}$$

式中 M_t 为磁化强度的横向分量, $M_t = -\partial E/\partial H_t$. 由 (3) 式可得当

$$H_k \cos 2\theta + H_{\text{ext}} \cos(\beta - \theta_k - \theta) = 0 \quad (4)$$

时磁化率将出现无穷大的奇点^[20], 在实际材料中, 由于磁化阻尼和局域各向异性色散^[22] 不会出现这种情况. 令横向磁导率峰值处磁场 $h = H_{\text{ext}}/H_k$, 联立方程 (2) 和 (4) 可得

$$\begin{aligned} \pm \cos(2\beta - 2\theta_k) \sqrt{\frac{4h^2 - 1}{3}} \\ + \sin(2\beta - 2\theta_k) \sqrt{\frac{4 - 4h^2}{3}} = \frac{5h^2 - 2}{3h^2}. \quad (5) \end{aligned}$$

由 (3) 式可得薄带畴转磁化横向磁导率表达式:

$$\mu_t = 1 + \chi_t = 1 + \frac{M_s \cos^2(\theta_k + \theta)}{H_k \cos 2\theta + H_{\text{ext}} \cos(\beta - \theta_k - \theta)}. \quad (6)$$

根据 (6) 式, 弱场下 $H_{\text{ext}} \rightarrow 0$, 磁化在易轴方向, $\theta \rightarrow 0$, 则近零场磁导率 (即起始磁导率) 可表示为

$$\mu_{t(0)} = 1 + M_s \cos^2 \theta_k / H_k. \quad (7)$$

饱和磁化时, 磁化强度趋向于外磁场方向, 因此 $\theta \approx \beta - \theta_k$. 则由 (6) 式饱和磁场下的磁导率可表示为

$$\begin{aligned} \mu_{t(m)} &\approx 1 + \frac{M_s \cos^2 \beta}{H_k \cos 2(\beta - \theta_k) + H_m} \\ &\approx 1 + \frac{M_s \cos^2 \beta}{H_m} \quad (H_m \gg H_k). \quad (8) \end{aligned}$$

定义磁导率比 $\Delta\mu/\mu_m = [\mu_{t(0)} - \mu_{t(m)}]/\mu_{t(m)}$, 其中 $\mu_{t(0)}$, $\mu_{t(m)}$ 分别表示外磁场为 0 和饱和磁场下的横向磁导率. 由 (7) 和 (8) 式可得

$$\Delta\mu/\mu_m = \frac{M_s \cos^2 \theta_k / H_k - M_s \cos^2 \beta / H_m}{1 + M_s \cos^2 \beta / H_m}. \quad (9)$$

4 实验结果

4.1 非晶 FeSiB 薄带的磁各向异性

图 3(a) 和图 3(b) 分别为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 和 $28 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 非晶 FeSiB 薄带自由面磁畴结构图像, 针尖扫描范围均为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$. 由图 3 可见, 薄带磁畴取向为倾向于带轴方向的 180° 条形磁畴. 图 3(a) 为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 样品, 其易轴与带轴的夹角约为 15° , 采用立体测量法^[23] 测得其平均畴宽约 $2.5 \mu\text{m}$; 图 3(b) 为 $28 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 样品, 易轴与带轴的夹角约为 12° , 平均畴宽约 $2.1 \mu\text{m}$, 相比 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 样品, 其易轴往轴向偏转了 3° 且畴宽变窄. 非晶薄带磁各向异性主要来自于应力各向异性和退磁场造成的形状各向异性, 对于 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 正方形薄带, 沿边长方向退磁因子相同, 各向异性取向分布由应力各向异性决定; 而对于 $28 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 长条形薄带样品, 由于存在较大横向退磁场, 为了降低退磁场能, 使得磁畴细分以及易轴向带轴方向偏转.

图 4 为非晶 FeSiB 薄带的磁滞回线, 所用样品尺寸为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$, 图中“L”, “T”分别

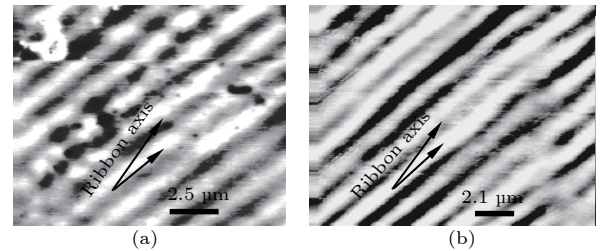


图3 非晶 FeSiB 薄带的磁畴结构 (a) $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 薄带; (b) $28 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 薄带

Fig. 3. Magnetic domain of amorphous ribbons: (a) Ribbon size is $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$; (b) ribbon size is $28 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$.

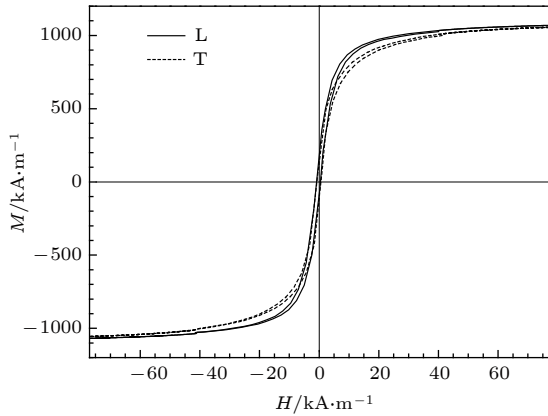


图 4 非晶 FeSiB 薄带磁滞回线 (L 和 T 分别表示所加磁场平行和垂直于带轴方向)
 Fig. 4. Hysteresis loop of amorphous FeSiB ribbon (“L” and “T” indicates the field direction parallel or perpendicular to the ribbon axis, respectively).

表示外磁场平行和垂直于带轴方向. 图 4 显示, 淬态 FeSiB 薄带具有良好的软磁性能, 矫顽力约为 $0.7 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, 平行和垂直方向的磁滞回线都向外场方向倾斜, 表明样品易轴偏离带轴方向, 这与图 3 磁畴结构检测结果一致.

4.2 单层薄带的 GMI 特性

图 5 给出的是长 28 mm、宽 3.5 mm 的单层薄带磁阻抗 (MI) 特性曲线. 其中图 5(a) 为不同 β 角时 MI 比随驱动电流频率的变化特性, MI 比定义为 $\Delta Z/Z_m = (Z_0 - Z_m)/Z_m$, 其中 Z_0 和 Z_m 分别表示外磁场为 0 和 23 kA/m 时样品的阻抗. 由图 5(a) 可见, 不同 β 角, 单层薄带 MI 比曲线几乎重叠, 7.0 MHz 为其 GMI 最佳响应频率, 在此频率下, MI 比大约都在 30%, 可见单层薄带 GMI 不太显著, 且对外磁场方向变化不敏感. 图 5(b) 为 $\beta = 0^\circ$ 时不同频率的 MI 比随驱动外磁场的变化特性, 其他 β 角由于曲线重叠且情况与此相似, 没再给出. 这里 MI 比定义为 $\Delta Z/Z = (Z_H - Z_m)/Z_m$, 其中 Z_H 和 Z_m 分别是样品在磁场为 H 和 23 kA/m 时的阻抗. 由图 5(b) 可见, 单层薄带在 0.6 MHz 和 3.0 MHz 频率时呈单峰形态, 5.0 MHz 开始出现微弱的双峰, 至 7.0 MHz 双峰变得明显, 双峰半宽约为 0.4 kA/m.

4.3 三明治薄带的 GMI 特性

图 6(a) 和图 6(b) 分别为不同 β 角三明治薄带的 MI 比随驱动电流频率和外磁场变化的特性曲

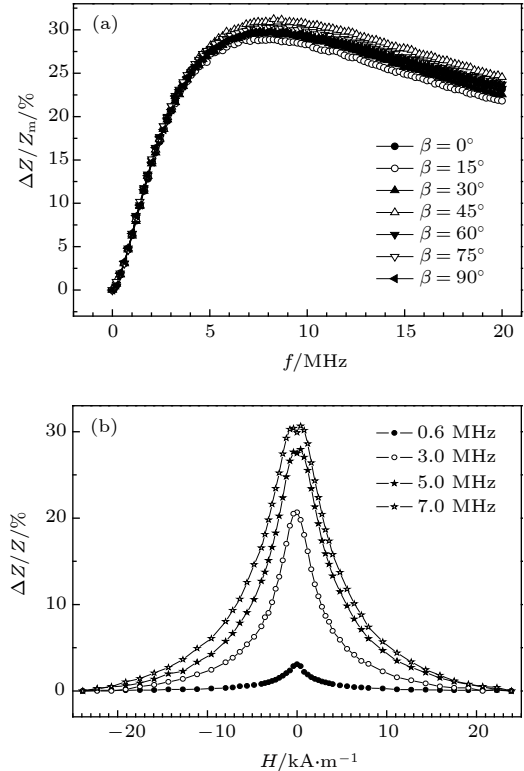


图 5 单层薄带磁阻抗特性 (a) 不同 β 角的 MI 比随频率的变化特性; (b) $\beta = 0^\circ$ 时, 不同频率的 MI 比随外磁场的变化特性

Fig. 5. The MI characteristics of single layer ribbon: (a) MI ratios of different β vary with frequency; (b) MI ratios of different frequencies change with field, at $\beta = 0^\circ$.

线, MI 比的定义与图 5 单层薄带的相同. 从图 6(a) 可以看出, 三明治薄带 GMI 的最佳响应频率为 0.6 MHz, 除低于 0.6 MHz 因曲线重叠不易分辨外, 同频率处的 MI 比都随夹角 β 的增大而增大. 0.6 MHz 频率处, $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 和 90° 的 MI 比分别为 272%, 278%, 302%, 328%, 355%, 410% 和 464%, 可见该三明治薄带 GMI 对外磁场方向敏感, 以此可用来确定外磁场的方向. 相比单层 FeSiB 薄带 7.0 MHz 下约 30% 的阻抗变化率, 三明治薄带 GMI 最佳频率显著降低, GMI 效应大大增强, 464% 的阻抗变化率与应力退火 Fe 基纳米晶三明治薄带相比拟^[11], 且避免了退火脆性问题, 淬态 FeSiB 三明治薄带的低频高 GMI 特性, 有利于其在磁传感器上的应用. 图 6(b) 显示, 除 90° 曲线出现平顶峰 (双峰不明显) 以外, 其他夹角的 MI 比曲线都出现了明显的双峰 (各向异性峰) 形态, 表明对于 FeSiB 三明治薄带, 在 0.6 MHz 频率下, 磁化过程已由磁矩转动来实现^[20]. $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 双峰和 90° 平顶峰的半宽分别约

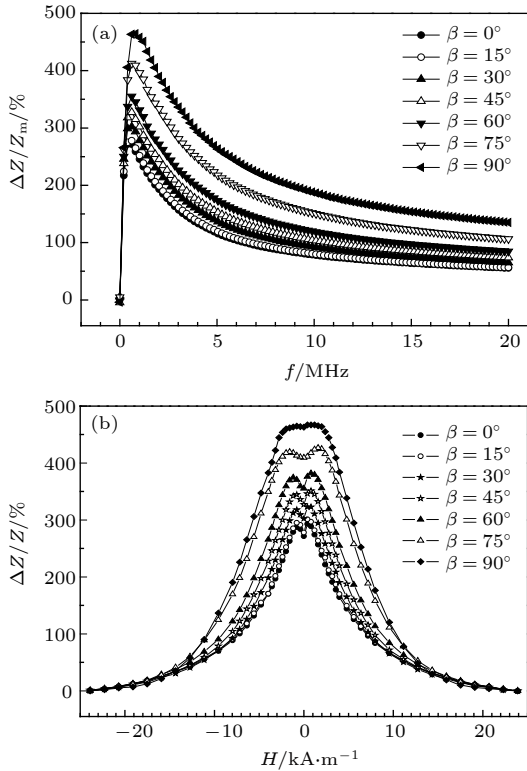


图6 不同 β 角下三明治薄带磁阻抗特性 (a) MI比随频率的变化特性; (b) 0.6 MHz 频率下 MI 比随外磁场的变化特性

Fig. 6. The MI characteristics of sandwiched ribbon at different angle β : (a) MI ratios vary with frequency; (b) field dependence of MI ratios at the frequency of 0.6 MHz.

为 0.6, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.6 和 2.0 kA/m, 峰宽变化趋势随 β 的增大而增大, 由于磁滞^[24]造成双峰不对称现象. 与单层薄带相比, 三明治薄带 GMI 出现各向异性峰的频率要低得多, FeSiB 薄带畴壁弛豫频率一般为几百 kHz^[25], 高于弛豫频率时, 磁化过程主要由畴转磁化来实现, 可见相比于单层薄带, 三明治薄带磁阻抗随外磁场变化能更好地反映材料畴转磁化现象.

5 讨论

由图 3 磁畴检测结果可得, 应力等效各向异性场 H_k 与带轴夹角 $\theta_k \approx 15^\circ$, 根据 (5) 式绘得磁化率峰值处 h 与 β 关系的连续曲线如图 7 所示. 由图 7 可见, 任意 β 角下 (即使在外磁场与易轴平行时), 均出现各向异性现象 (磁导率峰值处磁场不为 0), 说明对于具有近纵向各向异性 FeSiB 薄带, 各向异性峰出现与否与外磁场方向无关, 图 6(b) 实验结果与此相一致. 研究表明: 具有横向各向异性

Co 基薄带^[16,26], 在任意外磁场取向下, 磁阻抗均出现各向异性峰; 除易轴与薄膜 (薄带) 纵向平行外, 其他易轴取向下的 LMI 曲线均出现各向异性峰^[17,27]. 综上及图 6(b) 和图 7 结果, 意味着各向异性峰的出现与否和外磁场方向没有必然联系, 而是决定于横向驱动场与各向异性场的取向关系, 也就是说取决于是否存在横向各向异性或各向异性的横向分量. 当 $\beta = 15^\circ$ 和 105° , 即外磁场与易轴夹角分别为 0° 和 90° 时 h 最大, $h = 1$, 当 $\beta = 60^\circ$ (与易轴夹角 45°) 时 h 最小等于 0.5, 磁化率峰值处对应磁场随夹角的变化较敏感且呈抛物线状对称, 并未显示如图 6(b) 表现的 MI 各向异性峰随夹角的增大而一致增大的趋势, 其原因是畴转模型中没有考虑退磁场的影响. 研究表明, MI 各向异性峰展宽一般由两种原因引起, 一是由于存在横向退磁场^[16,26,28], 二是由于驱动电流频率升高引起的纹波效应^[29]. 图 6(b) 中, 驱动电流频率保持不变, 因此 MI 各向异性峰展宽是由 β 改变引起的. 由图 3 磁畴结构显示, 条状薄带存在较大的横向退磁场, 随着 β 的增大, 外磁场横向分量增大, M_s 逐渐转向横向, 横向退磁场随之增大, 因此三明治薄带 MI 曲线各向异性峰展宽. 由图 7 可见, 当 $\beta = 0^\circ$ 时, $H_{\text{ext}} \approx 0.61H_k$, 此时外磁场位于纵向, 可以忽略退磁场的影响, 对比图 6(b) $\beta = 0^\circ$ 时的峰值磁场 0.6 kA/m, 据此推算得薄带应力各向异性场 $H_k \approx 1$ kA/m.

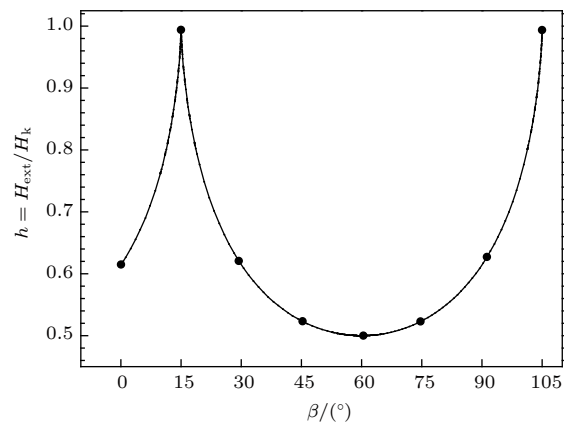


图7 $h = H_{\text{ext}}/H_k$ 随夹角 β 的变化关系

Fig. 7. $h = H_{\text{ext}}/H_k$ varies with the angle β .

由图 4 可知, 当外磁场达到 23 kA/m 时, 磁化已趋近饱和, 因此可近似地取 $H_m = 23$ kA/m, $M_s \approx 1000$ kA/m, $H_k \approx 1$ kA/m. 根据图 5(a)、图 6(a) 及 (9) 式, 绘得单层薄带和三明治薄带在各

自最佳响应频率下的 MI 比及理论磁导率比 $\Delta\mu/\mu_m$ 随 β 变化的折线图如图 8 所示. 由图 8(a) 可见, 单层薄带最大 MI 比随夹角 β 呈小幅振荡, 与图 8(c) 理论磁导率比随 β 变化趋势无一致性. 而图 8(b) 三明治薄带最大 MI 比和图 8(c) 理论磁导率比 $\Delta\mu/\mu_m$ 随 β 的变化则具有相似性, 即两者都随夹角 β 的增大而增大, 同在 $\beta = 60^\circ$ 出现增速拐点, $\Delta\mu/\mu_m$ 和 MI 比都随 β 迅速增大, 在 $\beta = 90^\circ$ 时都达到最大值. 这是因为驱动电流建立横向磁化场, 随着 β 的增大, 外磁场的横向分量逐渐增大, 势必阻止磁化的进行, 造成横向磁导率下降, 磁导率比增大;

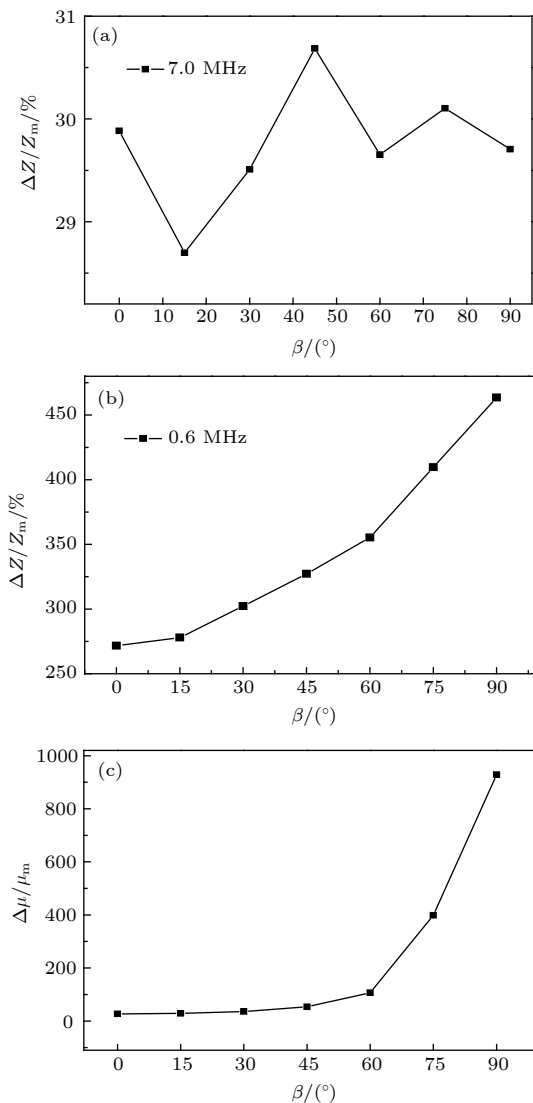


图 8 不同 β 角时最大 MI 比与理论磁导率比的比较 (a) 单层薄带样品; (b) 三明治薄带样品; (c) 理论磁导率比

Fig. 8. Comparison between maximum MI ratios and theoretical permeability ratios at different β : (a) Single layer ribbon; (b) sandwiched ribbon; (c) theoretical permeability ratios.

当 $\beta = 60^\circ$ 时, 外磁场横向分量已占主导, 导致横向磁导率迅速减小, 磁导率比显著增大, 因此出现增速拐点; 当 $\beta = 90^\circ$ 时, 外磁场已完全趋于横向, 磁导率比达到最大值, 同时 MI 比也达到最大. 从图 7 和图 8 分析结果以及对比图 6 实验结果, 可见 FeSiB 三明治薄带 GMI 效应及其各向异性随外磁场与带轴夹角变化特性是其横向磁导率变化的反映, 这与电磁理论分析结论^[6] 相吻合, 此畴转磁化模型能定性解释外磁场取向变化下的 FeSiB 三明治薄带的 GMI 特性.

6 结 论

相比单层薄带, 三明治结构能够显著提高淬态 FeSiB 薄带的 GMI 效应. 在 0.6 MHz 频率下, 纵横向最大 GMI 比分别达到 272% 和 464%, 淬态 FeSiB 三明治薄带的低频高 GMI 效应有利于其实际应用. 外磁场与带轴夹角对 FeSiB 单层薄带的 GMI 几乎没有影响, 但对三明治薄带 GMI 特性有显著影响, 在 $0^\circ-90^\circ$ 变化范围内, 三明治薄带的最大 GMI 比随夹角的增大而增大, 同时由于受横向退磁场的影响, 各向异性峰展宽. 理论与实验结果的分析表明, 三明治薄带 GMI 各向异性峰出现与否与外磁场取向无关, 由于横向磁导率比随夹角的增大而增大, GMI 效应也随之增强, 在畴转磁化占主导情况下, 畴转磁化模型能定性解释 FeSiB 三明治薄带 GMI 随外磁场与带轴夹角变化特性.

参考文献

- [1] Zhang S L, Chen W Y, Zhang Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 167501 (in Chinese) [张树玲, 陈炜晔, 张勇 2015 物理学报 **64** 167501]
- [2] Wang W J, Yuan H M, Li J, Ji C J, Dai Y Y, Xiao S Q 2013 *Sci. Chin: Phys. Mech. Astron.* **43** 852 (in Chinese) [王文静, 袁慧敏, 李娟, 姬长建, 代由勇, 萧淑琴 2013 中国科学: 物理学 天文学 **43** 852]
- [3] Phan M H, Peng H X 2008 *Prog. Mater. Sci.* **53** 323
- [4] He J, Guo H Q, Shen B G, He K Y, Zhang H W 2001 *Mater. Sci. Eng. A* **304-306** 988
- [5] Phan M H, Peng H X, Wisnom M R, Yu S C, Kim C G, Nghi N H 2006 *Sensor. Actuat. A: Phys.* **129** 62
- [6] Hika K, Panina L V, Mohri K 1996 *IEEE Trans. Magn.* **32** 4594
- [7] Xiao S Q, Liu Y H, Yan S S, Dai Y Y, Zhang L, Mei L M 2000 *Phys. Rev. B* **61** 5734
- [8] Le A T, Tung M T, Phan M H 2012 *J. Supercond. Nov. Magn.* **25** 1133

- [9] Zhou Y, Ding W, Chen J A, Yang C S, Gao X Y, Wang M J, Zhang Y M 2004 *J. Magn. Mater. Dev.* **35** 8 (in Chinese) [周勇, 丁文, 陈吉安, 杨春生, 高孝裕, 王明军, 张亚民 2004 *磁性材料及器件* **35** 8]
- [10] Zhong Z Y, Zhang H W, Jing Y L, Tang X L, Liu S 2008 *Sens. Actuators A: Phys.* **141** 29
- [11] Amalou F, Gijs M A M 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 1364
- [12] Alves F, Moutoussamy J, Coillot C, Abirached L, Kaviraj B 2008 *Sens. Actuators A: Phys.* **145–146** 241
- [13] Shao X Y, Chen W P, Zhong B Q, Xie J W 2018 *Rare Metal Mat. Eng.* **47** 1160 (in Chinese) [邵先亦, 陈卫平, 钟彬荃, 谢佳文 2018 *稀有金属材料与工程* **47** 1160]
- [14] Zhao C B, Zhang X L, Liu Q F, Wang J B 2016 *J. Phys. D* **49** 065006
- [15] Sommer R L, Chien C L 1996 *Phys. Rev. B* **53** R5982
- [16] Pirota K R, Kraus L, Knobel M, Pagliuso P G, Rettori C 1999 *Phys. Rev. B* **60** 6685
- [17] Yu J Q, Yu A B, Zhou Y, Cai B C, Zhao X L 2000 *Proceedings of the Fourth International Conference on Thin Film Physics and Applications* Shanghai, China, May 8–11, 2000 p514
- [18] Mardani R, Amirabadizadeh A 2014 *Mod. Phys. Lett. B* **28** 1450197
- [19] Wang A L, Liu J T, Zhou Y S, Jiang H W, Zheng W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 905 (in Chinese) [王艾玲, 刘江涛, 周云松, 姜宏伟, 郑鹤 2004 *物理学报* **53** 905]
- [20] Panina L V, Mohri K, Uchiyama T, Noda M 1995 *IEEE Trans. Magn.* **31** 1249
- [21] Reichl L E 1998 *A Modern Course in Statistical Physics* (2nd Ed.) (New York: Wiley-VCH) p376
- [22] Atkinson D, Squire P T 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 6569
- [23] Zhang J Q, Ye H Q, Zheng J L, Li T Y, Li W Z, Ma Y, Fang Y Z 2010 *J. Zhejiang Normal Univ. (Nat. Sci.)* **33** 150 (in Chinese) [张建强, 叶慧群, 郑建龙, 李通银, 李文忠, 马云, 方允樟 2010 *浙江师范大学学报(自然科学版)* **33** 150]
- [24] Makhnovskiy D P, Panina L V, Mapps D J 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 7224
- [25] Betancourt I 2011 *Materials* **4** 37
- [26] Kurl'yanskaya G V, Barandiarán J M, Vázquez M, García D, Dmitrieva N V 2000 *J. Magn. Mater.* **215–216** 740
- [27] Franco C S, Ribas G P, Bruno A C 2006 *Sens. Actuators A: Phys.* **132** 85
- [28] Sommer R L, Chien C L 1995 *J. Appl. Phys. Lett.* **67** 3346
- [29] Zhao C B, Pan L N, Ma X Q, Li J N, Liu Q F, Wang J B 2017 *J. Magn. Mater.* **444** 198

Effects of the angle between magnetic field and ribbon axis on the magneto-impedance properties of amorphous FeSiB/Cu/FeSiB sandwiched ribbon*

Shao Xian-Yi^{1)†} Xu Ai-Jiao¹⁾ Wang Tian-Le²⁾

1) (*College of Electronic and Information Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China*)

2) (*College of Pharmaceutical Chemistry and Material Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China*)

(Received 7 October 2018; revised manuscript received 4 January 2019)

Abstract

Amorphous FeSiB ribbons with nominal composition of $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ are prepared by single roll rapid quenching technique. In order to enhance the giant magneto-impedance (GMI) effect of FeSiB ribbons, interlaminar gluing method is used to produce FeSiB/Cu/FeSiB sandwiched structure in which the FeSiB ribbons act as external soft magnetic layers and the Cu foil acts as internal conductive layer. The variation characteristics of GMI with angle β between the external magnetic field and the ribbon axis for the single layer FeSiB ribbon and the sandwiched ribbon are studied by a rotating device placed in magnetic field which can drive the sample to rotate, to obtain a variable angle β from 0° to 90° with 15° degree angle interval. Magnetic domain structure detection shows that the amorphous FeSiB ribbons have near-axial magnetic anisotropy, and the angle between easy axis and ribbon axis is about 15° . In this work, in the case without considering the effects of shape anisotropy, the functional relationship among magnetic field at anisotropic peak of permeability, transverse permeability ratio and angle β is obtained according to the expression of the transverse permeability of ribbon derived from a domain rotation model. The results display that anisotropic peak appears in the transverse permeability for each of all testing values of angle β . Moreover, the transverse permeability ratio increases with β increasing. The magneto-impedance testing results indicate that the maximum GMI ratio of single layer ribbon is only about 30% at an optimum response frequency of 7.0 MHz, and angle β has almost no influence on the GMI. In contrast, the GMI of sandwiched ribbon presents a significant enhancement, the maximum value of the longitudinal GMI ratio and that of transverse GMI ratio reach 272% and 464%, respectively at an optimum response frequency of 0.6 MHz, the GMI of sandwiched ribbon is sensitive to the variation of angle β , and with increase of β the GMI increases accordingly. In addition, for all testing values of angle β , the GMI profiles of sandwiched ribbon show anisotropic peaks, due to the influence of transverse demagnetization field, and the anisotropic peak broadens with the increase of angle β . By comparing the theoretical and experimental results, it can be concluded that for the sandwiched ribbon, the characteristics of GMI changing with angle β agree better with the theoretical transverse permeability, which but is not for single layer ribbon. Besides, whether the anisotropic peak of GMI appears is independent of the orientation of the external magnetic field. As the transverse permeability ratio increases with the increase of angle β , the GMI effect of sandwiched ribbon is enhanced accordingly. The study results also demonstrate that the domain rotation model can be used to explicate the variation of GMI properties of sandwiched ribbon with the angle between magnetic field and ribbon axis qualitatively when the domain rotation magnetization is dominant.

Keywords: giant magneto-impedance effect, FeSiB, sandwiched ribbon

PACS: 75.50.Bb, 75.50.Kj, 75.30.Gw

DOI: 10.7498/aps.68.20181806

* Project supported by the Public Technology Application Research Plan of Zhejiang Province, China (Grant No. 2017C37096).

† Corresponding author. E-mail: sxy8718@163.com