

对于不同电流退火铁基非晶带材AGMI效应研究

李金贵, 张子悦, 刘一兵, 毕才金, 陈博阳, 范晓珍*, 方允樟*

浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

收稿日期: 2026年2月28日; 录用日期: 2026年3月24日; 发布日期: 2026年4月7日

摘要

本文研究了FeCuNbSiB非晶带材在不同退火电流下的磁阻抗效应。样品被分别施加不同的退火电流, 在线性响应范围 $-325.57\sim 11.63$ A/m内观察到约0.9982%的线性拟合度, 灵敏度达到 $0.81\%/(A/m)$, 从而在零磁场与AGMI效应之间实现了宽线性度和高灵敏度的特点。旨在提供一种基于GMI效应的新型电流传感器用磁敏材料。根据XRD模式, 样品中较高退火电流退火的 B_6Fe_{23} 硬磁相是AGMI效应的原因。

关键词

电流退火, 巨磁阻抗效应, 不对称巨磁阻抗效应

Effect of Current Annealing on the AGMI Properties in Iron-Based Amorphous Ribbons

Jingui Li, Ziyue Zhang, Yibing Liu, Caijin Bi, Boyang Chen, Xiaozhen Fan*, Yunzhang Fang*

College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: February 28, 2026; accepted: March 24, 2026; published: April 7, 2026

Abstract

This study investigates the magnetic impedance effect of FeCuNbSiB amorphous ribbon under varying annealing currents. Samples subjected to different annealing currents exhibited approximately 0.9982% linearity within the linear response range of -325.57 to 11.63 A/m, with a sensitivity of $0.81\%/(A/m)$. These results demonstrate a wide linear range and high sensitivity between zero

*共同通讯作者。

magnetic field and the AGMI effect, providing a novel magneto sensitive material for current sensors based on the GMI effect. XRD analysis indicates that the B_6Fe_{23} hard magnetic phase formed at higher annealing currents is responsible for the AGMI effect.

Keywords

Current Annealing, Giant Magneto Impedance Effect, Asymmetric Giant Magneto Impedance Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1992年,日本名古屋大学教授 Mhori [1]首次 在 钴 基 非 晶 材 料 中 发 现 了 巨 磁 阻 抗 效 应(GMI)。基 于 GMI 效 应 的 传 感 器 因 其 高 灵 敏 度、快 速 响 应、小 型 化 和 低 功 耗 等 特 性,已 成 为 新 型 传 感 器 研 究 的 重 要 领 域[2]-[4]。然 而,GMI 效 应 的 阻 抗 曲 线 不 仅 在 零 磁 场 附 近 呈 现 非 线 性[5],而 且 随 着 外 加 直 流 磁 场 的 变 化,零 磁 场 位 置 呈 现 对 称 性。因 此,基 于 GMI 效 应 工 作 的 传 感 器 几 乎 对 零 磁 场 不 敏 感[6] [7]。1995年,Kitoh [8]等 人 首 次 发 现 GMI 曲 线 偏 离 零 场 对 称 性,形 成 不 对 称 零 磁 场 现 象,称 为 不 对 称 巨 磁 阻 抗 效 应(AGMI)。AGMI 效 应 存 在 三 种 形 式[9]:电 流 偏 置、交 换 耦 合 和 螺 旋 各 向 异 性。上 述 现 象 均 伴 随 较 大 能 量 消 耗 和 不 稳 定 问 题。尽 管 Kim [10]解 决 了 该 问 题,但 零 磁 场 附 近 的 阻 抗 比 仍 较 低。目 前,GMI 效 应 主 要 集 中 在 横 向 驱 动 中。本 文 研 究 了 不 同 退 火 电 流 下 单 个 非 晶 带 材 的 纵 向 驱 动 效 应,获 得 了 AGMI 效 应 在 零 磁 场 附 近 宽 线 性 范 围 和 高 灵 敏 度 的 特 性。

在 电 流 传 感 器 研 究 方 面,国 外 研 究 人 员 提 出 了 多 种 GMI 电 流 检 测 结 构[6] [7]。例 如 通 过 将 GMI 敏 感 元 件 置 于 载 流 导 体 产 生 的 磁 场 中,实 现 电 流 检 测。部 分 实 验 研 究 表 明,基 于 GMI 效 应 的 电 流 传 感 器 能 够 实 现 微 安 级 甚 至 更 低 电 流 的 检 测[11] [12],同 时 保 持 较 高 线 性 度。

2. 实验方法

实 验 装 置 如 图 1 所 示,使 用 $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ 带 材 样 品(长 度 2 厘 米,宽 度 1.1 毫 米,厚 度 $40 \mu m$)。带 材 一 端 固 定 于 夹 具,另 一 端 夹 持 在 可 沿 滑 导 轨 移 动 的 夹 具 上,如 图 所 示 进 行 不 同 电 流 进 行 退 火 处 理,退 火 时 间 为 10 min 从 而 分 别 实 现 高 零 场 高 灵 敏 度 和 宽 线 性 AGMI 效 应。

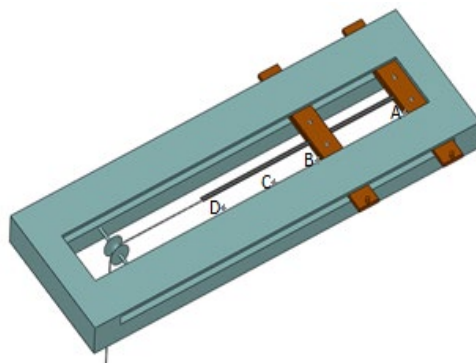


Figure 1. Schematic diagram of current annealing device

图 1. 当前退火装置示意图

纵向驱动模式(如图 2 所示)用于测量阻抗曲线,驱动电流并非直接流经磁性材料,而是流经样品和由等效阻抗构成的线圈[10],这可避免复杂的样品熔融过程及对耐高温磁性材料的要求。该模式亦称为纵向驱动巨磁阻抗效应(简称 LDGMI 效应) [13],其阻抗值比传统横向驱动 GMI 效应高出两个数量级[14][15]。本研究采用 HP4294A 阻抗仪以纵向驱动的方式测量薄带的巨磁阻抗,驱动频率设置为 310 KHz,驱动电流为 10 mA。

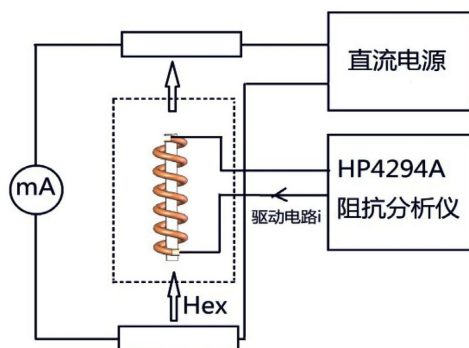


Figure 2. Schematic diagram of longitudinal drive GMI measurement
图 2. 纵向驱动 GMI 测量示意图

3. 结果与讨论

图 3 展示了不同退火电流下样品的 GMI 曲线。对于所选 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 薄带材料,铸态样品与 $22.73 \text{ A/mm}^2 \sim 29.55 \text{ A/mm}^2$ 电流退火样品的 GMI 曲线均以零磁场为对称轴,展现出优异的软磁性能,其中 27.27 A/mm^2 电流退火样品的阻抗值最高。当电流退火至 34.09 A/mm^2 时, GMI 曲线开始呈现不对称现象,因此我们认为 27.27 A/mm^2 电流退火样品的阻抗值达到峰值,阻抗值高达 1267.36% 。在 36.36 A/mm^2 电流下, GMI 曲线虽未对称于零磁场,但灵敏度较低。不过其优势在于 AGMI 曲线不再呈现零磁场对称性且线性度良好,这有助于提升横向磁场线性响应区间。电流 1 对应 27.27 A/mm^2 (小电流)退火样品,电流 2 对应 36.36 A/mm^2 (大电流)退火样品。

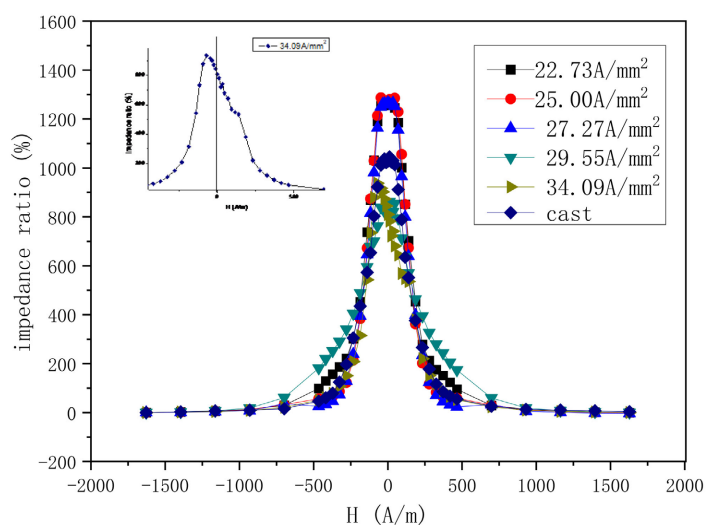


Figure 3. The GMI curves of annealing with different currents
图 3. 不同电流退火的 GMI 曲线

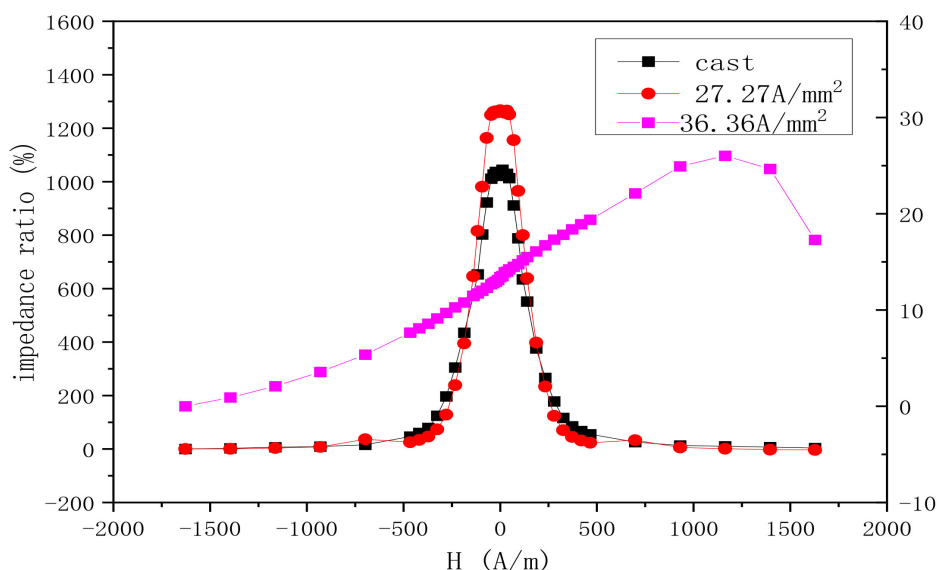


Figure 4. The GMI curve of as-cast, 27.27 A/mm², 36.36 A/mm² current anneal

图 4. 为铸态、27.27 A/mm²、36.36 A/mm² 电流退火的 GMI 曲线

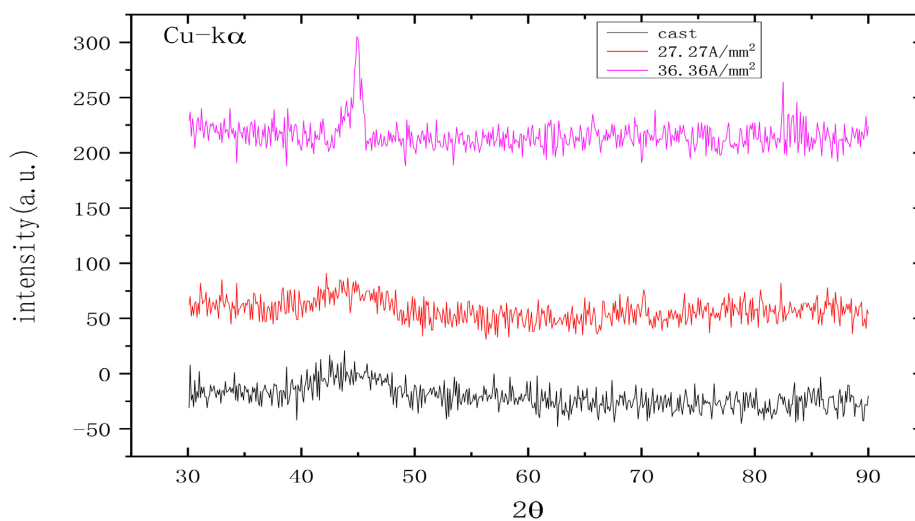


Figure 5. XRD spectra of different current annealing

图 5. 不同电流退火的 XRD 谱

对铸态及当前退火的 27.27 A/mm²、36.36 A/mm² 样品进行了 X 射线衍射分析(型号 Y-2000), 并获得了以下 XRD 图谱。

不同电流退火样品的 X 射线粉末衍射(XRD)图谱如图 5 所示。如图 4 所示, 铸态样品的最大阻抗比 $((\Delta Z/Z)_{\max})$ 约为 1045%, 且 GMI 曲线在零磁场下对称。X 射线粉末衍射(XRD)图谱(见图 5)显示, 铸态样品在 45 度处出现典型的非晶态样品散射峰, 表明该样品仍为非晶态。27.27 A/mm² 电流退火样品的 XRD 图谱在 45 度处出现典型散射峰, 表明样品仍为非晶态。36.36 A/mm² 退火样品的 GMI 曲线变得不对称, 45 度附近的 XRD 峰变得尖锐。43.5 度处的峰代表硬 B₆Fe₂₃ 相, 这是硬磁相分离导致 AGMI 效应产生的原因。

4. 结论

在本研究中, 我们使用自制的电流退火装置, 研究了非晶带材在不同退火电流下的磁阻抗效应。我们获得了宽线性 AGMI 效应和高灵敏度。线性拟合度可达约 0.9982%, 灵敏度为 0.81%/(A/m), 线性响应范围: $-325.57\sim 11.63$ A/m, 与 Kim 相比, 零磁场附近的阻抗比提高了一个数量级。通过 XRD 分析电流退火样品, 发现硬磁相 B_6Fe_{23} 的相分离导致了 AGMI 效应的产生。然而, 仍需研究大电流退火截面是否占非晶带样品中整个能带的比例, 以及可能出现的特定 AGMI 效应。

参考文献

- [1] Mohri, K., Kohsawa, T., Kawashima, K., Yoshida, H. and Panina, L.V. (1992) Magneto-Inductive Effect (MI Effect) in Amorphous Wires. *IEEE Transactions on Magnetics*, **28**, 3150-3152. <https://doi.org/10.1109/20.179741>
- [2] Panina, L.V., Mohri, K., Uchiyama, T., Noda, M. and Bushida, K. (1995) Giant Magneto-Impedance in Co-Rich Amorphous Wires and Films. *IEEE Transactions on Magnetics*, **31**, 1249-1260. <https://doi.org/10.1109/20.364815>
- [3] Fan, T., Pan, L., Zhao, C., Liu, Q., Liu, X. and Wang, J. (2026) Investigation of Loss and Noise in Toroidal Core Current Sensors. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **640**, Article ID: 173788. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173788>
- [4] 杨灿, 李金贵, 何佳俊, 等. 应力退火调控环形磁芯对电流的响应特性[J]. 材料科学, 2024(4): 390-396.
- [5] Gómez-Polo, C., Vázquez, M. and Chen, D. (1993) Directionally Alternating Domain Wall Propagation in Bistable Amorphous Wires. *Applied Physics Letters*, **62**, 108-109. <https://doi.org/10.1063/1.108826>
- [6] Hrakova, D., Ripka, P. and Kmječ, T. (2023) Enhancing Performance of Fluxgate Sensors Using Annealed Nanocrystalline Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, **59**, 1-9. <https://doi.org/10.1109/tmag.2023.3296205>
- [7] Shi, J., Li, Z., Sui, Y., Wang, Y., Zhou, Z. and Liu, F. (2023) Low-Temperature-Drift Design of Fluxgate Sensors for Geomagnetic Observation Based on the Two-Stage Magnetic Field Adjustment Method. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 24393-24403. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3312253>
- [8] Kitoh, T., Mohri, K. and Uchiyama, T. (1995) Asymmetrical Magneto-Impedance Effect in Twisted Amorphous Wires for Sensitive Magnetic Sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, **31**, 3137-3139. <https://doi.org/10.1109/20.490306>
- [9] Zhang, Z.-Y., Shi, Y., Liu, Y.-L., et al. (2004) Asymmetrical Characteristics of Giant Magneton Impedance Effects. *Journal of Functional Materials*, **35**, 513-516.
- [10] Kim, C.G., Jang, K.J., Kim, H.C. and Yoon, S.S. (1999) Asymmetric Giant Magnetoimpedance in Field-Annealed Co-Based Amorphous Ribbon. *Journal of Applied Physics*, **85**, 5447-5449. <https://doi.org/10.1063/1.369971>
- [11] Sirat, A.P., Niakan, H. and Parkhideh, B. (2023) Utilizing a Micro-Fluxgate Magnetometer in Dual-Path Configuration for Fast Switch-Current Sensing. 2023 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Nashville, 29 October-2 November 2023, 1344-1351. <https://doi.org/10.1109/ecce53617.2023.10362031>
- [12] Chang, M., Xu, L., Xiong, X., Zhang, J. and Li, X. (2023) Research Progress on Detection Technology of Small Magnetic Targets on Moving Platforms. 2023 *7th International Conference on Robotics, Control and Automation (ICRCA)*, Tai-zhou, 5-7 January 2023, 31-36. <https://doi.org/10.1109/icrca57894.2023.10087597>
- [13] Zhu, W., Ma, G., Wang, C., Song, B. and Liu, S. (2023) Digitalized Design and Realization on Mine Intrinsic Safe Mode Geologic Compass. 2023 *IEEE 3rd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*, Chongqing, 26-28 May 2023, 878-882. <https://doi.org/10.1109/iciba56860.2023.10164969>
- [14] Mostufa, S., Rezaei, B., Yari, P., Xu, K., Gómez-Pastora, J., Sun, J., et al. (2023) Giant Magnetoresistance Based Biosensors for Cancer Screening and Detection. *ACS Applied Bio Materials*, **6**, 4042-4059. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00592>
- [15] Ger, T.-R., Wu, P.-S., Wang, W.-J., Chen, C., Abu, P.A.R. and Chen, S. (2023) Development of a Microfluidic Chip System with Giant Magnetoresistance Sensor for High-Sensitivity Detection of Magnetic Nanoparticles in Biomedical Applications. *Biosensors*, **13**, Article No. 807. <https://doi.org/10.3390/bios13080807>
- [16] Degen, C.L., Reinhard, F. and Cappellaro, P. (2017) Quantum Sensing. *Reviews of Modern Physics*, **89**, Article ID: 035002. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.89.035002>