Journal of Applied Acoustics

◇ 研究报告 ◇

新型表面波电流传感器优化设计*

(1 国家电网公司中国电力科学研究院 北京 100192)(2 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 本文对结合磁致伸缩效应的新型声表面波电流传感器进行优化设计。传感器采用 80 MHz 声表面波双 通道延迟线型差分振荡器,并在传感通道 SAW 器件表面声传播路径上溅射磁致伸缩薄膜,利用薄膜材料在电 流激发磁场作用产生的磁致伸缩效应引起声传播速度的变化,并以相应振荡器频率的变化来表征待测电流。 通过对不同磁致伸缩材料 (FeCo和 FeNi) 以及薄膜厚度的传感效应进行分析,用以为传感器的优化设计提供 思路,并通过实验进行验证,实验结果显示,相对于 FeCo而言,采用 FeNi 作为敏感材料的电流传感器具有良 好的重现性、线性度以及较高的灵敏度。

关键词 声表面波,电流传感器,磁致伸缩效应,铁钴,铁镍

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)05-0389-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.05.003

The optimum design of new SAW-based current sensor

TONG Jie¹ ZHANG Wei¹ WANG Xinglong¹ WANG Shiyue¹ JIA Yana^{2,3} WANG Wen²

(1 China Electric Power Research Institute of State Grid, Beijing 100192, China)

(2 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In this paper, a novel SAW current sensor based on the magnetostrictive effect was optimal designed. This SAW current sensor used 80 MHz SAW dual-channel delay liner differential oscillator, and magnetostrictive film was deposited on the SAW propagation path. The magnetic field of the desired current induces the film's magnetostrictive strain, changes the SAW phase velocity, then the corresponding differential oscillation frequency change was used to evaluate the applied current. The sensor effects of different magnetostrictive materials (FeCo and FeNi) and film thickness were analyzed to provide ideas on the optimization design of the sensor, and also were verified by experiments. The experimental results show that, comparing to the FeCo, the current sensor with FeNi as sensitive film has good repeatability, linearity and high sensitivity.

 ${\bf Key \ words} \quad {\rm Surface \ acoustic \ wave, \ Current \ sensor, \ Magnetomechanics \ effect, \ FeCo, \ FeNi}$

作者简介: 仝杰 (1983-), 男, 山西运城人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 能源互联网, 电力物联网, 电力无线通信技术等。

²⁰¹⁷⁻⁰¹⁻⁰⁴ 收稿; 2017-07-25 定稿

^{*}国家电网公司总部科技项目 (DG71-15-038), 国家自然科学基金资助项目 (11374254)

[†]通讯作者 E-mail: jiayana225@163.com

1 引言

具有高灵敏度、高分辨率、良好稳定性与可靠 性的高性能电流在线检测技术在智能电网线路检 测、电力冶金与轨道交通中供电安全预警与救援、 工业自动化中电源继电保护等领域有着迫切需求。 相对于现有如霍尔、光纤型电流传感技术,声表面波 (Surface acoustic wave, SAW) 电流传感器具有快 速响应、结构简单、抗干扰能力强、使用寿命长以及 体积小等特点,特别是可以实现无线无源的电流检 测手段,大大提高了系统安全性,在上述领域极具工 程应用前景和重大的学术价值^[1]。2000年, Reindl 等^[2-4] 首次实现了将SAW 技术与磁阻效应相结合 的新型无线无源 SAW 电流传感器,并已实验获得 了在-800~800 A的大电流检测范围内5%的检测 精度,但是从目前的实验报道来看,这种声表面波与 磁阻效应结合的电流检测技术在灵敏度与温度稳 定性等方面还遇到一些瓶颈问题。首先,基于磁阻 效应的磁敏材料在大电流检测中磁场敏感度不够 高, 传感器采用 SAW 器件时域幅度响应作为传感 量,导致电流检测的灵敏度及精度不高。此外,缺乏 环境温度变化的补偿方法、物理功能结构的优化设 计以及传感机理模型的系统性认知,导致目前SAW 技术离实用化距离其远。因此,为实现高灵敏度、良 好线性度和稳定性的SAW 电流传感技术,研究重 点在于高磁敏特性的敏感薄膜材料的选取。

近年来,磁致伸缩薄膜材料作为一种新型的功 能膜材料,具有器件微型化、磁致伸缩系数大、位移 量大、能量转换效率高、响应速度快以及非接触式 驱动等优良性能^[5-6],因此应用于许多微传感器和 执行器的设计,特别是用于高精度磁场的测量,为 MEMS 系统的开发设计提供了很多技术支持。磁致 伸缩金属与合金的代表性材料包括 FeCo和 FeNi 合 金。FeCo合金具有较为理想的单晶磁致伸缩常数, 不含稀土元素,成本较低,良好的韧性,并可以承受 拉应力和剪应力,因而更适用于压应力或拉应力条 件且能承受震动的应用场合^[5]。FeNi合金的性能优 势在于磁导率高,在弱、中磁场下尤其明显。除此 之外,由于加入了贵重金属镍,所以FeNi合金拥有 极小的矫顽力和窄而陡的磁滞回线,加工性能非常 好,相比较其他的合金而言它拥有更优异的防锈性 能[6]。

先前所研制的采用磁致伸缩 FeCo 薄膜的声表 面波电流传感器虽具有较高的灵敏度,能够较好 地对电流进行测量,但是线性度比较差,且电流增 大和减小时传感器响应的重现性差,这是磁致伸缩 FeCo薄膜较强的磁滞现象所造成的。本文针对该 电流传感器线性度和重现性差的问题,采用具有较 弱磁滞现象的磁致伸缩 FeNi 薄膜作为敏感膜材料 对电流传感器进行优化。其基本结构如图1所示。 磁致伸缩薄膜在电流激发磁场作用下产生磁致伸 缩效应和 ΔE 效应,作用于传感通道器件压电晶体 内传播的SAW,导致SAW传播速度的变化,并以 相应的振荡器输出频率来表征待测电流。利用标 准光刻工艺在128°YX-LiNbO3压电晶体上研制双 通道80 MHz 延迟线。为改善传感器件温度稳定性 并保护敏感材料镀膜过程中对金属叉指电极的影 响,在LiNbO3表面溅射与其温度系数相反的SiO2 薄膜[7]。利用射频磁控溅射技术在传感通道器件表 面 SAW 传播路径上沉积磁致伸缩薄膜。利用由赫 姆霍兹线圈等搭建的实验平台,实验对比了不同磁 致伸缩敏感材料及不同膜厚的传感器响应特性,实 验表明 FeNi 作为敏感膜的电流传感器表现出较高 的检测灵敏度和比 FeCo 更好的线性度和重现性特 点,当FeNi厚度为500 nm时,电流传感器的灵敏度 可达到4.3 kHz/A。



图 1 所研制的 SAW 电流传感器的结构模型 Fig. 1 Structure of the developed SAW current sensor

2 敏感材料的磁致伸缩特性

磁致伸缩 FeNi 合金薄膜材料具有窄而陡的磁 滞回线,在弱磁场中具有大磁导率和小矫顽力,且 加工性能好,可制成各种形状复杂、结构精密的元 件^[8]。与 FeNi 合金相比,FeCo 合金薄膜材料的磁滞 回线宽而平缓,加工性能相对较差,成本较高,高频 时损耗大等特点。磁滞现象的强弱造成 FeCo、FeNi 磁致伸缩曲线的差异。 本文通过激光位移法对FeCo与FeNi磁致伸 缩薄膜的磁致伸缩曲线进行测量,如图2所示, 图2(a)为激光位移法的测试系统,图2(b)为测得的 FeCo/FeNi薄膜磁致伸缩曲线,横轴为外部磁场强 度,范围为[-500 Oe, 500 Oe],纵轴为磁致伸缩系 数,单位为ppm。电磁体提供直流磁场,FeCo/FeNi 样品放置于电磁铁两极头中间,一端接触极头,样 品的另一端紧挨一弹性体以吸收伸长量。激光器发 出双频激光测量样品两端面之间的绝对距离,使用 高斯计测量样品所处的磁场强度。外接电源使电磁 铁产生一个从0开始到设定最大磁场强度稳定变化 的直流磁场,同时同步测量样品的伸长量、磁场强 度,磁致伸缩系数即为样品的伸长量与样品本身的 长度比值。红线代表外部磁场强度增大和减小时 FeCo薄膜的磁致伸缩系数变化,蓝线则表征FeNi 薄膜的磁致伸缩系数随外部磁场强度的变化情况。 由图2可知,上述两种合金薄膜的磁致伸缩曲线在 外部磁场增大和减小时的变化并不一致,磁场减小 时的磁致伸缩系数略小于磁场增大时的磁致伸缩 系数,这是由于磁致伸缩薄膜内部的剩磁效应所造 成的^[9]。但是,相对而言,由于FeNi薄膜更弱的磁 滞效应,导致FeNi薄膜的磁致伸缩曲线在磁场增大 和减小时具有比FeCo薄膜更好的一致性,也就意 味着采用FeNi合金薄膜的电流传感器将有可能获 得更好的重现性。





3 声表面波电流传感器研制

结合磁致伸缩薄膜的SAW电流传感器结构如 图1所示,由双通道差分式SAW延迟线型振荡器与 沉积于传感通道传感器件表面的磁致伸缩薄膜构 成。SAW器件采用具有较高压电系数的128°YX-LiNbO₃作为压电基片以改善SAW器件的损耗与 信噪比性能^[7],采用单向单相换能器(SPUDTs)结 构以获得较低的SAW器件损耗^[10];另外,为改善器 件温度特性并实现在敏感薄膜制备过程中对金属 叉指电极的保护,在压电晶体表面沉积与压电晶体 温度系数记性相反的SiO₂薄膜。

传感器具体研制方法包括:利用标准的半导体平面工艺在128°YX-LiNbO3压电基片上制备

双通道延迟线图形,分别由 30 对 SPUDTs 和 15 对 SPUDTs 组成的输入和输出换能器组成,铝电极膜 厚为 300 nm。随后,在压电晶体表面利用 PECVD 方法沉积 500 nm 的 SiO₂ 薄膜。之后利用射频磁控 溅射技术,在其中传感通道的延迟线器件声传播路 径表面沉积磁致伸缩 FeCo/FeNi薄膜来响应电流 激发磁场,另外一路延迟线不镀膜,作为参考以补 偿测试环境温度变化对传感响应的影响。FeCo与 FeNi 的制备方法具体为:采用 JGP-560C型双室多 功能磁控溅射设备及套刻工艺在压电晶体表面制 备 FeCo/FeNi薄膜。晶体表面依次在丙酮、去离子 水、无水乙醇中用超声波清洗,每次 15 min,以去 除表面的油污。再经电吹风热风吹干表面残余液体 后,置入预沉积室。溅射过程中,将圆片置于水冷盘 上,采用电磁靶进行镀膜,靶材为 FeCo/FeNi 合金 熔炼靶, 沉积温度为室温。本底真空优于10⁻⁴ Pa。 溅射气体为氩气, 其压强为1 Pa。靶材功率密度 为 400 V(DC) × 80 mA/p (35 mm)²。通过控制溅 射时间, 可获得不同厚度的合金薄膜。图3 为制备有 FeNi 薄膜的 80 MHz SAW 传感器件图。之后, 利用 网络分析仪对制备有 300 nm FeCo 和 300 nm FeNi 的传感器件频率响应进行了测试, 如图4 所示, 结果 显示, 器件频率均在78 MHz 左右, 损耗约7 dB。



图 3 制备有 FeNi 合金薄膜的 80 MHz 传感器件图 Fig. 3 Picture of the developed 80 MHz sensor chip with FeNi film



图 4 制备有 300 nm FeCo 薄膜和 300 nm FeNi 的 80 MHz 传感器件测试频响图

Fig. 4 Measured S_{21} of 80 MHz FeCo-coated SAW device and FeNi-coated SAW device (FeCo/FeNi thickness 300 mm)

在传感器件制备之后,将所研制的双通道延迟 线分别接入由相移器、放大器以及混频器等所构成 的振荡回路中,构成双通道SAW振荡器。差分振荡 器频率信号由基于FPGA的频率信号采集模块采 集并由电脑绘制记录成图。传感器系统如图5所示。 在外部电流激发磁场作用下,磁致伸缩FeCo/FeNi 薄膜产生磁致伸缩应变和ΔE效应,导致薄膜的厚 度和杨氏模量发生变化,进而使得SAW传播速度 发生线性变化,通过测量差分振荡器的频率输出,即 可对待测电流参量进行检测。



图 5 SAW 电流传感器系统图 Fig. 5 SAW oscillator circuits

4 实验与结果分析

4.1 实验平台

如图6所示,实验系统由研制的SAW电流传感 系统、直流电流源、赫姆霍兹线圈、记录数据输出的 PC以及用来校准的高斯计构成。因为赫姆霍兹线



图 6 SAW 电流传感器实验平台 Fig. 6 Experiment setup for characterizing the SAW current sensor

圈的中轴线上的磁场强度和均匀性最强,所以SAW 电流传感器放置于赫姆霍兹线圈中间的载物台上, 确保其处于线圈的中轴线上。被测电流通过赫姆霍 兹线圈产生磁场,由于磁致伸缩效应作用传感器所 产生的响应信号通过FPGA模块被实时采集,然后 在电脑上通过软件输出,通过观察混频信号的输出 变化,可以得到被测电流强度的变化情况。

4.2 实验结果分析

直流电流通过赫姆霍兹线圈,在其中轴线上产 生平行于 x 方向即沿 SAW 传播方向的磁场,且电 流在 0~10 A 范围内单调增大和减小,变化间隔为 1 A。

图 7(a) 给出了 当磁致伸缩薄膜 FeCo/FeNi的 厚度为 300 nm 时传感器响应随被测电流强度的变 化。由图 7(a) 可知, 当电流增大时, 传感信号呈近似 线性递减; 当电流减小时, 传感信号呈近似线性递



图7 制备有不同膜厚 FeCo/FeNi 薄膜的 SAW 电流传感器实验响应

Fig. 7 Measured sensor responses coated different thickness of FeCo/FeNi film

增。但是当电流增大和电流减小时的传感响应的 重现性并不完全一致,这是由磁致伸缩敏感薄膜 FeCo/FeNi的剩磁现象所造成的。但是这两种磁致 伸缩合金材料在重现性上表现不一,采用FeNi合金 薄膜时,电流增大和电流减小时传感响应具有比采 用FeCo薄膜更好的重现性,但灵敏度要略低。这是 因为在一定磁场范围内,FeNi磁致伸缩薄膜的磁滞 现象比FeCo要弱(如图2所示)。

磁致伸缩薄膜的厚度对传感器响应有着明显 的影响,如图7(b)所示。当磁致伸缩薄膜FeCo/FeNi 的厚度增加到500 nm时,传感响应有着显著的提 升。而在重现性方面与图7(a)基本一致,即FeNi表 现出更好的重现性。本文采用迟滞误差对传感器的 重现性进行定量描述。由于传感器机械部分的摩擦 和间隙以及磁性材料的磁滞等,传感器同一输入量 对应的正、反行程的输出不一致,这一现象就是迟 滞。定义迟滞误差为

$$\varepsilon_H = \frac{(\Delta y)_{\max}}{2y_{FS}} \times 100\%, \tag{1}$$

其中, $(\Delta y)_{\text{max}} = \max(y_{ui} - y_{di})$ 即第*i*个测量点 的正、反行程的偏差; y_{FS} 为传感器的满量程输出 量。具体测试指标总结如表1所示,从中可知,采 用较厚的FeNi合金薄膜将可能获得更好的线性特 性 (2.035%)、重现性 (2.33%) 与较高的检测灵敏度 (4.3 kHz/A)。

表1 采用不同膜厚的 FeCo/FeNi 合金薄膜的 传感器测试性能

Table 1Sensor performances coated dif-ferent thickness of FeCo/FeNi film

敏感膜	300 nm FeCo	500 nm FeCo	300 nm FeNi	500 nm FeNi
灵敏度 (kHz/A)	4.2	4.7	3.9	4.3
线性度 (%)	2.217	2.391	1.988	2.035
迟滞误差 (%)	8.103	8.285	2.74	2.33

5 结论

本文对基于磁致伸缩效应的新型声表面波电 流传感器进行优化设计。通过实验分析了采用不同 磁致伸缩薄膜FeCo和FeNi材料的电流传感响应特 征以及不同FeCo和FeNi膜厚对传感响应的影响。 实验结果表明,相对于FeCo薄膜而言,采用FeNi合 金薄膜的电流传感器表现出更好的线性特性和重 现性以及较高的检测灵敏度。此外,随着薄膜膜厚 的增加,传感器灵敏度也获得了较大的改善。

参考文献

- 张华伟,孙越强. 几种非侵入式电流测量技术 [J]. 现代电子技术, 2005, 28(21): 80-83.
 ZHANG Huawei, SUN Yueqiang. Techniques of non-invasive current measurement[J]. Modern Electronics Technique, 2005, 28(21): 80-83.
- [2] REINDL L, SCHOLL G, OSTERTAG T, et al. Theory and application of passive saw radio transponders as sensors[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2008, 45(5): 1281–1292.
- STEINDL R, HAUSLEIMER C, HAUSER H, et al. Wireless magnetic field sensor employing SAW-transponder[J].
 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2000, 2: 855–858.
- [4] MACKENSEN E, REIND L. Wireless passive SAW identification marks and sensors[C]. 2nd Int. Symp. Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, Chiba Univ. 3rd- 5th March, 2004.

- [5] 洪贺. FeCo/PZT 层状磁电复合材料的制备与性能研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- [6] 刘天成, 卢志超, 李德仁, 等. 电沉积铁镍纳米合金薄膜的结构和性能研究 [J]. 功能材料, 2007, (1): 138–141. LIU Tiancheng, LU Zhichao, LI Deren, et al. Investigation on the microstructure and properties of electrode-posited iron-nickel alloy film with nano structure[J]. Journal of Functional Materials, 2007, (1): 138–141.
- [7] TOMAR M, GUPTA V, MANSINGH A, et al. Temperature stability of c-axis oriented LiNbO₃/SiO₂/Si thin film layered structures[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, 34(34): 2267–2273.
- [8] 穆丹宁,杨长林,魏晓伟,等. FeCo基合金软磁材料研究进展[J].稀有金属材料与工程, 2013, 42(6): 1316-1320.
 MU Danning, YANG Changlin, WEI Xiaowei, et al. Research development of FeCo[J]. Alloy Soft Magnetic Materials, 2013, 42(6): 1316-1320.
- [9] 袁涛. 磁场热处理对磁性材料性能的影响 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [10] PLESSKY V P, KOSKELA J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices[J]. Int. J. High Speed El. and Syst., 2000, 10(4): 1–81.