

# 基于磁致伸缩效应的声表面波电流传感器研究

全杰<sup>1</sup>, 贾雅娜<sup>2</sup>, 张薇<sup>1</sup>, 王兴隆<sup>1</sup>, 王诗月<sup>1</sup>, 王文<sup>2</sup>

(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)

**摘要:**该文设计制作了一种基于磁致伸缩效应的声表面波(SAW)电流传感器, 采用了磁致伸缩铁钴合金(FeCo)薄膜, 并对其性能进行实验研究。传感器采用双通道 300 MHz 声表面波延迟线型振荡器结构, 以 128°YX-LiNbO<sub>3</sub> 为压电基片, 在其表面覆盖与其温度系数极性相反的 SiO<sub>2</sub> 薄膜来改善器件温度稳定性, 并在声传播路径上溅射 FeCo 薄膜用以感知电流。在电流产生磁场作用下, FeCo 薄膜发生磁致伸缩应变, 导致声传播速度的变化, 进而以振荡器频率信号的改变来表征待测电流。该文通过对不同 FeCo 膜厚及不同 FeCo 薄膜长宽比的传感器进行实验分析, 以获得优化的传感功能结构。实验结果表明, 在优化的 FeCo 薄膜厚度(500 nm)和长宽比(2:1)条件下, 所研制的声表面波电流传感器的灵敏度为 12.375 kHz/A。

**关键词:**声表面波(SAW); 磁致伸缩效应; FeCo 薄膜; 射频磁控溅射; 128°YX-LiNbO<sub>3</sub>

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

## Study on SAW Current Sensor Based on Magnetostrictive Effect

TONG Jie<sup>1</sup>, JIA Yana<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Xinglong<sup>1</sup>, WANG Shiyue<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, State Grid Corporation of China, Beijing 100192, China;

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

**Abstract:** In this paper, a kind of surface acoustic wave(SAW) current sensor based on the magnetostrictive effect was designed, the sensor adopted magnetostrictive FeCo thin film and its characteristics were studied experimentally. The SAW current sensor used 300 MHz dual-channel delay line oscillator, and 128°YX-LiNbO<sub>3</sub> as piezoelectric substrate. SiO<sub>2</sub> thin film layer was coated on the piezoelectric substrate to improve the temperature stability because they had opposite temperature coefficient polarity, and the magnetostrictive FeCo film was sputtered on one of the SAW delay lines to percept the current. Under the magnetic field of desired current, the FeCo film produces magnetostrictive strain, and results in SAW phase velocity changes, and then the current to be measured is characterized by the change of the frequency signal of SAW oscillator. SAW current sensors with different thickness and different aspect ratio of FeCo film were tested in the experiments to obtain optimized sensing structure. The experimental results show that the sensitivity of the developed SAW current sensor is up to 12.375 kHz/A with optimized FeCo film thickness of 500 nm and aspect ratio of 2:1.

**Key words:** surface acoustic wave(SAW); magnetostrictive effect; FeCo film; RF magnetron sputtering; 128°YX-LiNbO<sub>3</sub>

## 0 引言

与传统霍尔及光纤电流传感技术相比, 声表面波(SAW)电流传感器具有快速响应, 结构简单, 抗干扰能力强, 使用寿命长及体积小等特点, 特别是可实现无线无源的电流检测手段, 提高了系统安全性, 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

域极具工程应用前景和重大的学术价值<sup>[1]</sup>。

2000 年, 德国弗莱堡大学的 Leonhard Reindl 和 R. Steindl 等将 SAW 技术与磁阻效应结合应用于电流测量中, 研制出在 -800~+800 A 的电流检测范围内精度为 5% 的无线无源声表面波电流传感器<sup>[2-3]</sup>。但已有报道表明, 这种 SAW 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

收稿日期: 2016-09-05

基金项目: 国家电网公司总部科技基金资助项(DG71-15-038), 国家自然科学基金资助项目(11374254)

作者简介: 全杰(1983-), 男, 山西运城人, 高级工程师, 工学博士, 主要从事能源互联网、电力物联网及电力无线通信技术等的研究。E-mail: tongjie1@epri.sgcc.com.cn。

遇到一些问题。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及传感机理模型的系统性认知,导致目前 SAW 电流检测技术离实用化仍存较大距离。

近年来,一种磁致伸缩薄膜材料以其高磁敏特性引起人们较大的兴趣。如 FeCo 合金具有较好的综合性能,其单晶磁致伸缩常数(约  $400 \times 10^{-6}$ )较理想,不含稀土元素,价格低,韧性良好,并可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<sup>[4]</sup>。

本文设计制作了将磁致伸缩 FeCo 薄膜的高磁敏特性与 SAW 高负载灵敏性相结合的新型电流传感器,由双通道差分式 300 MHz SAW 延迟线型振荡器构成,其中传感通道器件 SAW 传播路径表面利用磁控溅射技术沉积磁致伸缩 FeCo 薄膜作为敏感膜,另外一个通道则作为参考,用以最大程度消除压电晶体材料热膨胀系数所导致的温漂影响。此外,考虑到 LiNbO<sub>3</sub> 较高的温度系数( $75 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )及 FeCo 镀膜过程中对金属叉指电极的保护,在 SAW 器件表面沉积 SiO<sub>2</sub> 薄层<sup>[5]</sup>。由于 FeCo 对电流所产生电磁场的磁敏效应导致 SAW 传播速度的变化,进而导致振荡器差分频率发生改变,以此评价待测电流。利用由赫姆霍兹线圈及计算机搭建的测试平台对研制的 SAW 电流传感器性能进行评价,特别是分析了不同 FeCo 膜厚与长宽比对器件性能的影响,由此确定优化的传感功能结构。

## 1 传感器设计与制作

如图 1 所示,传感器的主要结构由双通道差分式 SAW 延迟线型振荡器与沉积于传感通道器件声传播路径表面的 FeCo 薄膜组成,因此,在传感器设计与研制中,主要着眼于高频率稳定度的 SAW 振荡器研制及 FeCo 的高效沉积。

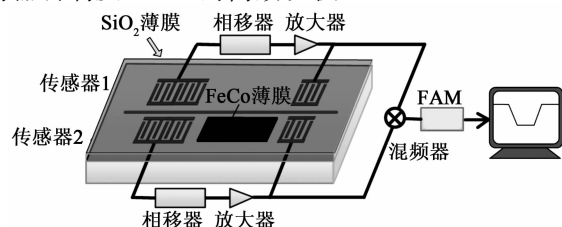


图1 研制的 SAW 电流传感器的结构模型

## 1.1 低损耗 SAW 延迟线器件设计

首先,对作为振荡器频率控制元的 SAW 延迟线进行设计。器件采用具有高机电耦合系数的 128°YX-LiNbO<sub>3</sub> 为压电基片材料。此外,为降低器件损耗,器件结构采用电极宽度控制单向单相换能器(SPUT)结构,器件工作频率为 300 MHz,延迟线的输出、输入换能器指对数分别为 25 和 15,声孔径为  $100\lambda_0$  (其中  $\lambda_0$  为换能器周期,且  $\lambda_0 = 17 \mu\text{m}$ ),输入、输出换能器间距为 2.5 mm。在利用标准光刻工艺制作延迟线图形后,利用磁控溅射法在器件表面制备了膜厚为 300 nm 的 SiO<sub>2</sub> 保护层。

利用 Agilent E5061B 网络分析仪对沉积 300 nm SiO<sub>2</sub> 薄膜的 300 MHz SAW 延迟线器件在室温下进行了频响测试,如图 2 所示。由图可看出,所研制的 SAW 延迟线器件的中心频率为 300.3 MHz,中心频点损耗为 6.9 dB。

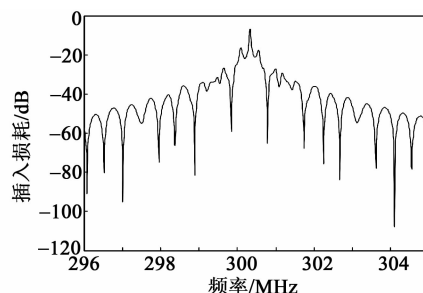


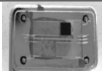
图2 覆盖 SiO<sub>2</sub> 薄膜的 SAW 延迟线器件插入损耗的测试结果

## 1.2 FeCo 磁致伸缩薄膜的制备

采用 JGP-560C 型双室多功能磁控溅射设备及套刻工艺在前文制备完成分布多个 SAW 延迟线器件的 LiNbO<sub>3</sub> 圆片表面沉积 FeCo 薄膜。圆片依次在丙酮、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 Fe-Co 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  $400 \text{ V(DC)} \times 80 \text{ mA} / [\pi(35 \text{ mm})^2]$ 。另外,为提取优化的 FeCo 薄膜膜厚及长宽比,制备了不同 FeCo 膜厚和不同长宽比。在 FeCo 薄膜沉积完成后,利用划片机对圆片进行切割形成单一双通道式传感器件。具有不同长宽比的 SAW 传感器件如表 1 所示。

表1 镀有不同长宽比 FeCo 薄膜的

SAW 器件结构图

| FeCo 薄膜长宽比 | 1:1                                                                               | 1.5:1                                                                             | 2:1                                                                               |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 器件结构图      |  |  |  |

### 1.3 差分振荡器研制

利用研制的双通道 SAW 延迟线为频率控制单元,并结合由反馈放大器、移相网络及匹配网络等组成的振荡电路,并经混频研制出差分式延迟线型振荡器。差分振荡器混频输出的频率信号通过由现场可编程门阵列(FPGA)构成的频率采集模块进行采集,采集频率为 120 次/min,再通过自制软件实时成图并记录于电脑。由此,完成整个 SAW 电流传感器系统,如图 3 所示。

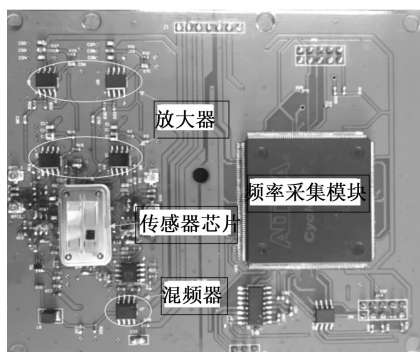


图3 SAW 振荡电路

## 2 传感器实验与分析

如图 4 所示,所搭建的实验平台由研制的 SAW 电流传感器、直流电流源、赫姆霍兹线圈、记录数据输出的 PC 及用来校准的高斯计构成。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 FeCo 薄膜长度方向)的磁场,且电流在 0~10 A 范围内单调增大和减小。SAW 电流传感器振荡电路放置于赫姆霍兹线圈中间的载物台上,确保其处于磁场强度和均匀性最强线圈中轴线上。被测电流通过赫姆霍兹线圈产生磁场,由 FeCo 的磁致伸缩特性导致传感器频率信号的变化,通过观察采集频率信号的变化,可对待测电流强度进行评价。

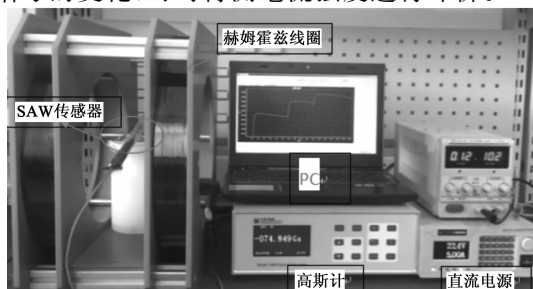


图4 SAW 电流传感器实验平台

图 5 为具有不同长宽比 FeCo 薄膜的 SAW 电流传感器响应情况,FeCo 厚度均为 500 nm。由图可看出,当电流从 0 增大到 10 A 时,传感信号呈近似线性递减。随着长宽比的增加,传感器响应也随之增加,但线性度变差。这是由磁致伸缩 FeCo 薄膜的磁滞现象造成。当 FeCo 薄膜具有最大长宽比(为 2:1)时,相应 SAW 电流传感器也有最大的灵敏度(为 12.375 kHz/A),但此时电流增大时传感响应的线性度最差,这是由于当 FeCo 薄膜长宽比增大时,沿其长度方向的磁滞现象同样增大的原因<sup>[6]</sup>。

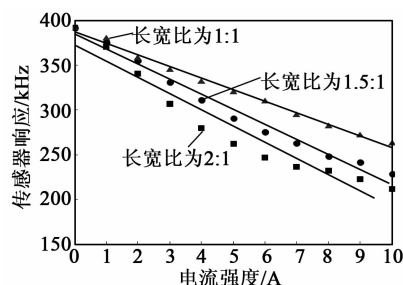


图5 镀有不同长宽比 FeCo 薄膜的 SAW 电流传感器的频率输出

图 6 为沉积不同膜厚的 FeCo 薄膜的 SAW 电流传感器响应特性,FeCo 薄膜长宽比均为 1.5:1。由图可看出,当电流从 0 增大到 10 A 时,传感信号呈近似线性递减;当电流从 10 A 减小到 0 时,传感信号呈近似递增。由图可看出,当 FeCo 薄膜厚度为 500 nm 时,相应 SAW 电流传感器具有最大的灵敏度(为 10.377 kHz/A)。此外,图中 3 种不同厚度 FeCo 薄膜的传感器在电流增大时的重现性相似,这是由于 FeCo 薄膜的磁滞现象主要由其长宽比决定,与薄膜厚度无关。

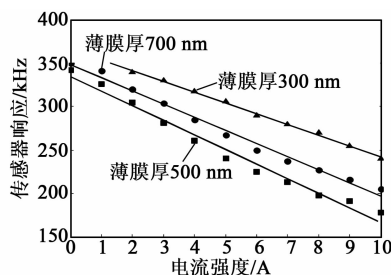


图6 镀有不同厚度 FeCo 薄膜的 SAW 电流传感器的频率输出

综上所述,在 FeCo 薄膜厚为 500 nm,长宽比为 2:1 时,传感器将获得最佳灵敏度性能,灵敏度可达 12.375 kHz/A,同时也表现出较好的线性特性。

(下转第 706 页)