Journal of Applied Acoustics

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

新型声表面波电流传感器*

王 文† 贾雅娜 刘鑫璐 薛蓄峰 梁 勇

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 将声表面波技术的快速响应特点与磁致伸缩薄膜的高磁敏特点相结合,可实现一种快速、高灵敏、稳定 可靠的新型电流检测技术。传感器由双通道差分式振荡器与沉积在传感通道器件表面的声传播路径上的磁致 伸缩薄膜组成。该文基于分层介质中声传播理论及磁致伸缩效应,对声表面波电流传感机理进行了分析,以实 现对传感器结构的优化设计。实验研制了采用铁钴 (FeCo) 薄膜的声表面波电流传感器,测试结果表明,该传 感器具有快速响应和高灵敏特点。为抑制磁致伸缩薄膜自身的剩磁效应所带来的高磁滞误差,采用的有效途 径是将沉积的磁致伸缩薄膜进行图形化设计。实验结果表明,采用栅阵化 FeCo 薄膜结构的传感器表现出更高 检测灵敏度、更好线性及更低的磁滞误差。

关键词 声表面波,电流传感器,磁致伸缩效应,铁钴,图形化设计

中图法分类号: O429 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)01-0008-08 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.002

Research on novel SAW based current sensor

WANG Wen JIA Yana LIU Xinlu XUE Xufeng LIANG Yong

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

Abstract A new current sensing technology with fast response, high sensitivity, and good stability and reliability can be realized by using the surface acoustic wave (SAW) with characteristic of fast response and features of high magnetic susceptibility of magnetostrictive thin films. The sensor consists of a dual channel difference oscillator structure and a magnetostrictive coating deposited on the surface of the sensor chip. Based on the acoustic wave propagation theory in layered structure and magnetostrictive effect, the mechanism of SAW current sensor is analyzed to realize optimal design of sensor structure. The FeCo film coated SAW current sensor was developed and the measured results indicated that the sensor has some specific characteristics as fast response and high sensitivity. To suppress the hysteresis error from the remanence effect of magnetostrictive film itself, a patterned design on magnetostrictive film was considered. The measured results show that the stripped-FeCo coated sensor exerts higher sensitivity, better linearity, and lower hysteresis error.

Key words Surface acoustic wave, Current sensor, Magnetostrictive effect, FeCo, Patterned design

作者简介:王文(1976-),男,湖南沅江人,中科院特聘研究员,博士生导师,研究方向:微声学器件与系统,超声检测与成像。

²⁰¹⁷⁻¹⁰⁻¹⁹ 收稿; 2017-12-01 定稿

^{*}国家自然科学基金项目(11774381),中国钢研基金(16020220Z),国网基金项目(DG71-15-038/5442DG150031)

[†]通讯作者 E-mail: wangwenwq@mail.ioa.ac.cn

1 引言

具有高灵敏度、高分辨率、良好稳定性与可靠 性的高性能电流检测技术研究在智能电网线路检 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保等领域具有重要意义[1]。电 流传感器在电力系统控制保护和监控中起到了枢 纽作用。现代电力系统朝着大容量、高压电、小型紧 凑以及输配电系统自动化的方向发展,因此,人们对 电流传感器不仅提出了小型化、高可靠性与稳定性 的要求,还要求它具有高低压全隔离、抗电磁干扰 性好、宽频带、无铁磁饱和以及高灵敏度等特点。目 前典型的电流传感技术主要包括霍尔型与光纤型 两种。基于霍尔效应的霍尔型电流检测技术以其较 高精度、良好线性以及快速响应等优点在电流传感 领域占有主导地位^[2],已广泛应用于UPS电源、逆 变焊机、变电站、电解电镀、数控机床、微机监测系 统、电网监控系统和需要隔离检测的大电流、电压 等诸多领域中。然而随着现代智能电网及工业自动 化的发展,传统的霍尔传感器的直流工作供电、绝 缘困难、精度易受偏移电流以及外界温度环境因素 影响等问题也愈发突出。光纤电流传感器的基本原 理是利用法拉第磁光效应,它具有高灵敏度、传感 探头无需供电以及良好的稳定性等特点,目前开始 在输电线网、变电站以及工业自动化电源继保中得 到了初步应用^[3-6]。但光学材料又存在制作与施工 难度大、传感探头易碎、成本高等不足,严重制约了 其推广应用。

相对于上述两种现有技术,基于声表面波(Surface acoustic wave, SAW)的电流检测技术以其快 速、高灵敏、低成本、稳定可靠的特点引起人们的广 泛关注。SAW是结合压电基片与淀积于表面的叉 指电极通过压电效应原理所激发的一种表面声波, 因而对表面扰动极为敏感,在各种物理及化学传感 器中有着广泛的应用前景,特别是可提供无线无源 的检测手段,在高温高压及无人值守等应用环境极 具应用潜力^[7-11],其中,SAW磁场/电流传感器是 其中一个的研究热点技术。典型SAW磁场/电流传 感器采用两种基本原理:其一是通过结合磁阻效应 的负载式结构,典型代表是德国弗莱堡大学Reindl 教授所报道的如图1所示的磁阻式电流传感结构, 在反射型延迟线的反射器上外接磁敏电阻负载,通 过磁阻效应改变反射器反射特性,进而以反射信号 相应相位的变化来感知待测电流量。该结构较好地 实现了无线无源的大电流检测,在-800 A~800 A 的动态范围内满量程分辨率可达5%^[12-13]。Li等也 将实验研制类似外接巨磁阻传感器负载的SAW 电 流传感器,实现了0.1 Oe的磁场分辨率^[14],对应电 流约为0.5 A。从测量结果来看,这种外接负载传感 器式的SAW 电流传感器灵敏度仍不尽如人意,主 要原因是SAW 器件仅作为应答器以相位或者幅度 信号传递磁场感知信号过程中的低分辨率与滞后 性;此外基于磁阻效应的磁敏材料在大电流检测中 由于较大的磁滞导致其磁敏性不够高、线性度较差。 另外一种SAW电流检测方式则是将磁致伸缩薄膜 的高磁敏特点与SAW的快速响应特点相结合,其 结构如图2所示,在SAW传感器件的声传播路径上 沉积磁致伸缩薄膜,通过在电磁场作用下引起的磁 致伸缩效应所导致的应变及薄膜本身的所谓 ΔE 效 应,引起SAW传播特性的变化,进而以频率电信号 来表征待测电流量。磁致伸缩薄膜材料作为一种新 型的磁敏功能材料,具有高磁敏、快速响应、高制备 效率、低成本等特点,特别是可以通过溅射沉积的 方法,可与SAW器件实现传感器的芯片化设计。近 年来一些具有良好磁敏特性的磁致伸缩材料如镓、 铁镓合金、镍以及稀土型磁致伸缩薄膜材料被应用 为磁敏材料^[15-17]。特别是铁钴(FeCo)薄膜是具有 很高饱和磁感应强度(Bs)的一种软磁合金,有较为 理想的单晶磁致伸缩常数(约400×10⁻⁶),不含稀 土元素,价格低廉,并具有良好的韧性,可承受较 大拉应力和剪应力,因而也引起人们较大的研究兴 趣,取得了良好的实验结果。在对沉积FeCo薄膜的 SAW 电流传感器实验中,获得了 0.2 mA 的较高分 辨率^[18-19]。但是在实验中也发现,由于磁致伸缩 薄膜自身较强的剩磁和磁滞现象,导致电流传感器 的线性度较差且迟滞误差大,严重影响到SAW电 流传感器的实用性。

本文对采用FeCo为磁敏薄膜材料的SAW电 流传感器开展了研究,传感器采用双通道差分振荡 器结构,如图2所示。在传感通道的SAW传感器件 表面声传播路径上沉积FeCo薄膜,另外一个采用 相同器件结构的未镀膜器件作为参考,以有效消除 环境温度及振动的影响。首先对其敏感机理进行理 论模型构建,分析影响传感性能的关键结构参数, 为传感器结构优化提供理论指导;在理论分析基础 上,实验制备了沉积FeCo薄膜的SAW电流传感器 以验证理论分析结果。此外,为抑制磁致伸缩薄膜 自身剩磁效应,本文将磁致伸缩薄膜进行了栅阵式 的图形化设计,从而实现具有高灵敏、快速响应、良 好线性及低磁滞误差的新型SAW电流传感器,以 满足实际应用需求。



(b) 基于磁致伸缩效应的结构原理图

图1 两种电流传感器结构原理图

Fig. 1 The scheme picture of SAW current sensor based on magnetoresistive effect and magnetostrictive effect



图 2 采用双通道差分振荡器结构的 SAW 电流传 感器结构原理图

Fig. 2 The scheme picture of SAW current sensor utlizing dual channel differntial oscillator structure

2 沉积 FeCo 薄膜的电流传感机理分析

为实现在磁致伸缩FeCo薄膜制备过程中对 SAW传感器件的金属叉指电极的保护,在FeCo制 备之前,在SAW器件表面沉积SiO₂薄层。因此,电 流传感器件结构由128°YX-LiNbO₃压电晶体及覆 盖于其上的SiO₂薄层及FeCo薄膜组成。那么建立 如图3所示的层状分析模型,其中 x_1 轴与SAW传 播方向平行, x_2 轴与SAW波阵面平行, x_3 轴为压 电基片的法线方向,叉指换能器位于压电基片与的 分界面 $x_3 = 0$ 处,且其指条平行于 x_2 轴。利用层 状介质中声传播理论及有效介电常数方法^[18],对 FeCo/SiO₂/128°YX-LiNbO₃ 层状结构中SAW传 播特性进行分析,结合磁致伸缩效应,获得SAW传 播速度与磁场强度的关联特性,进而分析FeCo膜 厚及传感器工作频率对传感器响应的影响,从而实 现对传感器结构设计的优化。



图 3 SAW 电流传感器的层状结构图 Fig. 3 The layered structure picture of SAW current sensor

显然,在如图3所示的层状结构中,可通过分别 建立压电晶体、SiO₂及FeCo薄膜中的声波波动方 程,继而利用各层间力学与电学边界条件,结合有效 介电常数方法即可求解声波波动方程^[19]。此外,非 晶态的FeCo在外磁场作用下的磁致伸缩效应为各 向异性,即沿长度方向磁化时,薄膜产生的磁致伸缩 应变为

$$\begin{cases} \varepsilon_{e1} = -2\varepsilon_{e2} = -2\varepsilon_{e3} = \beta, \\ \beta = \beta_0 \times (1 + k_p \times p), \end{cases}$$
(1)

其中, ε_{ei} 是FeCo薄膜沿 x_i (i = 1, 2, 3)方向的应 变, β 是薄膜的磁致伸缩系数,与外部磁场强度相 关, β_0 是无磁场作用时的薄膜磁致伸缩系数,p是 FeCo长宽比, k_p 是关联系数,对于FeCo,其值为 1.27×10^{-6[19]}。由此,磁致伸缩效应引起FeCo薄膜 的厚度h和密度 ρ 发生如下变化:

$$\begin{cases} h = h_0(1 - \beta/2), \\ \rho = m \cdot \left[a_0 \times \left(1 + \frac{\beta}{2} \right) \times b_0 \times \left(1 - \frac{\beta}{2} \right) \\ \times h_0 \times \left(1 - \frac{\beta}{2} \right) \right]^{-1}, \\ m = \rho_F \times (a_0 \times b_0 \times h_0), \end{cases}$$
(2)

其中, m是 FeCo 薄膜质量, ρ_F 、 a_0 、 b_0 及 h_0 分别为 FeCo 薄膜的密度及初始长度、宽度和厚度。此外, 磁致伸缩薄膜在外磁场作用下同时产生 ΔE 效应, 即 FeCo 薄膜材料自身的弹性系数发生变化,

$$\begin{cases} c_{11} = \frac{E(1-u)}{(1+u)(1-2u)}, \\ c_{12} = \frac{Eu}{(1+u)(1-2u)}, \\ c_{44} = \frac{c_{11}-c_{12}}{2} = \frac{E(1-2u)}{2(1+u)(1-2u)}, \end{cases}$$
(3)

其中, u是FeCo薄膜的泊松比, 一般不随电流变化, 取为0.3, E是FeCo薄膜的杨氏弹性模量, 与外部磁场强度相关。

将公式 (1)~(3) 代入层状结构声波动方程求解 过程之中,即可获得外磁场强度与 SAW 传播速度变 化的关系。此外,利用毕奥萨伐尔定律给出的电流 场 I 与磁场 H 的关系 ^[20],即 $H = \mu_0 \times I/(4\pi r)$,其 中 μ_0 为空气中的介电常数,r 为传感器与导线之间 的距离,在文中均设置为1 cm。由此即可建立 SAW 速度与电流之间的对应关系,并可以分析 FeCo薄 膜厚度以及传感器工作频率对传感响应的影响。

表1 理论计算所需的压电基底、 $SiO_2 \gtrsim FeCo$ 磁致伸缩薄膜的部分物理参数

Table 1 Some physical parameters for the piezoelectric substrate, SiO_2 , and the FeCo

材料参数		参数值		
		LiNbO ₃	SiO_2	FeCo
弹性参数/ (10 ¹¹ N·m ⁻²)	c_{11}	2.03	0.785	
	c_{12}	0.53		
	c_{13}	0.75		
	c_{14}	0.09		
	c_{33}	2.45		
	c_{44}	0.6	0.312	
压电系数/(C·m ⁻²)	e_{31}	0.2		
	e_{15}	3.7		
	e_{33}	1.3		
	e_{22}	2.5		
介电系数/(10 ⁻¹¹ F·m ⁻¹)	ε_{11}	84		
	ε_{33}	29		
密度/(kg·m ⁻³)		7450	2651	9250
磁致系数/10 ⁻⁶				1500
杨氏模量/(N·m ⁻²)				62.6

利用上述理论分析,对沉积FeCo薄膜的电流传感器响应进行了仿真。相关参数如表1所示。 FeCo薄膜的长宽比为2。首先利用静电法获得FeCo 薄膜的杨氏模量与磁场强度之间的关系^[21],如图4 所示。



图 4 测试获得的磁场强度与 FeCo 薄膜杨氏模量 的关联曲线

Fig. 4 Measured relationship between the young's modulus of FeCo and magnetic field intensity



图 5 传感器频率和 FeCo 薄膜对传感响应的影响 Fig. 5 Influence to sensor response from sensor frequency and FeCo film thickness

图5(a)给出了传感器响应与其工作频率的关 系,在计算中,给定磁场强度为200 Oe,FeCo薄膜的 长度和宽度设计为2 mm 和1 mm。从图5(a)中可 以看出,由磁致伸缩效应导致的SAW速度变化随着 传感器工作频率增加而单调递增,意味着提高传感 器工作频率,可以改善传感器的检测灵敏度。FeCo 薄膜厚度对传感器响应的影响则相对较为复杂,如 图 5(b) 所示, 随着 FeCo 薄膜的厚度增加, SAW 速 度变化随之增加并在FeCo薄膜膜厚在500 nm的 时候达到最大值,随后就随FeCo膜厚的进一步增 加而递减,这主要是因为FeCo自身的磁滞特点引 起的。如设定传感器工作频率为300 MHz, FeCo薄 膜为500 nm,此时传感器频率响应随电流变化的 计算结果如图6所示,从图6中可以看出,传感器 响应呈现较好的线性特点,其理论计算灵敏度约为 18 kHz/A_{\circ}





3 传感器设计

从物理结构上来说,SAW 电流传感器的传感元 主要采用双通道差分振荡器结构以降低环境温度 等影响,如图1所示。在SAW传感器件设计中,采 用延迟线结构,其压电基片采用具有较高压电系数 的128°YX-LiNbO3。在换能器设计中,采用单向单 相换能器 (SPUDT) 结构以降低器件损耗 [22]。传感 器件的具体制备方法为: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,铝电极膜厚为300 nm。为验证传感工作频 率对传感器响应的影响,器件频率设计为80 MHz、 150 MHz和300 MHz。随后,在压电晶体表面利用 PECVD方法沉积50 nm的SiO2薄膜以保护金属 电极。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薄膜来响应电磁场, FeCo薄膜的长度和宽度 与理论计算一致,分别设计为2 mm 和1 mm。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 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 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



图7 沉积 FeCo 薄膜的传感器件及 FeCo SEM 图与沉积 FeCo 栅阵的传感器件及 FeCo 栅阵图 Fig.7 Picture of FeCo film coated sensor and corresponding SEM picture of FeCo, and stripped FeCo coated sensor

圆片置于水冷盘上,采用电磁靶进行镀膜,靶材为 FeCo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。

此外,为抑制磁致伸缩薄膜自身的剩磁效应 所导致的明显磁滞误差,将FeCo薄膜进行栅阵 化设计,栅阵结构中FeCo指条宽度与间距均为 1λ。图7分别为制备有500 nm FeCo薄膜及栅阵的 150 MHz SAW 传感器件图,其中FeCo薄膜的扫描 电镜(SEM)图表明镀膜致密度良好。图8则利用网 络分析仪测试得到的沉积500 nmFeCo的150 MHz 传感器件的频响曲线,从图8中可以看出沉积FeCo 薄膜仅因质量负载引起频率偏移,对声传播衰减影 响并不明显。



图 8 沉积 500 nm FeCo 薄膜的 150 MHz 传感器 件频响曲线

Fig. 8 Frequency response of the 150 MHz sensor device coated with 500 nm FeCo film



图 9 所研制的 SAW 电流传感器电路系统 Fig. 9 The circuit system of the developed SAW current sensor

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、放大器及混频器等构成的振 荡电路中,构成双通道差分式振荡器,其中传感通道 采用沉积 FeCo薄膜及栅阵的传感器件。振荡频率 信号由基于 FPGA 的频率信号采集模块采集并由 电脑实时成图。所研制的传感器电路系统如图9 所 示,在外部电流激发磁场作用下,磁致伸缩 FeCo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 生相应变化,利用差分频率信号的相应变化即可对 待测电流参量进行检测。

4 传感器实验

4.1 测试系统

SAW 电流传感器实验测试系统由赫姆霍兹驱动线圈及其外接直流电流源、记录数据输出的电脑服务器、用于校准的高斯计以及 SAW 电流传感器构成,如图 10 所示。高精度赫姆霍兹线圈在给定电流源下可为 SAW 电流传感器提供均匀分布的驱动磁场,将 SAW 电流传感器放置于线圈中间的载物台上,确保其处于线圈的中轴线上,这是因为赫姆霍兹线圈中轴线上的磁场强度及均匀性最强,直流电流通过赫姆霍兹线圈产生磁场,FeCo薄膜磁致伸缩效应引起的传感器响应信号的变化通过 FPGA 模块被实时采集 (采样率为50 Hz),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。



图 10 SAW 电流传感器测试系统 Fig. 10 Testing system for SAW current sensor

4.2 测试结果

首先对沉积 FeCo薄膜的传感器性能进行测试 以验证理论计算结果。图 11 显示了 FeCo薄膜厚度 及传感器工作频率对传感器灵敏度的影响。从图 11 中可看出,随着 FeCo薄膜膜厚的增加,传感器灵敏 度随之增加,但是在FeCo薄膜膜厚大于500 nm之时,传感器灵敏度开始下降,此时可认为FeCo薄膜的优化膜厚在500 nm左右,与理论计算结果一致。 另外,从图11中可知,传感器的工作频率也极大地影响到传感器性能。传感器灵敏度随其工作频率增加而递增,意味着在传感器件制作工艺容许条件下, 适当增加传感器工作频率,有利于传感器灵敏度的改善。在FeCo薄膜膜厚为500 nm、传感器工作频 率为300 MHz之时,传感器随电流变化的实时响应

如图 12 所示,从图 12 中可以看出,传感器呈现快速 响应的特点,其测试灵敏度可达 16.6 kHz/A,接近 理论计算结果。但是,这种沉积 FeCo薄膜的传感器 磁滞效应非常明显,如图 13 所示,即在测试电流下 降和上升过程中传感响应明显不对称,究其原因是 因为 FeCo薄膜较强的剩磁和磁滞效应。通常采用 磁滞误差 ε_H 来表征这种磁滞效应,其表达式为

$$\varepsilon_H = (\Delta y)_{\text{max}} / (2y_{\text{RS}}) \times 100\%,$$

$$(\Delta y)_{\text{max}} = \max(y_{ui} - y_{di}), \qquad (4)$$

其中, y_{ui}和 y_{di}分别为在电流上升和下降过程中相同电流强度下的传感响应值, y_{RS}为满量程输出。那么,利用式(4), 沉积 FeCo薄膜的电流传感器的磁滞误差可计算为8.721%。



图 11 FeCo 薄膜膜厚及传感器工作频率对传感器 响应的影响

Fig. 11 The measured sensitivity depending on FeCo thickness and sensor frequency

利用相同测试系统,对沉积FeCo栅阵的传感 器性能进行评价,如图13所示。从图13中可以看 出,通过FeCo薄膜的栅阵化设计,大幅降低了传感 器的磁滞效应,且其灵敏度也获得了提升。究其原 因是将磁致伸缩薄膜栅阵化,在最大化磁致伸缩效 应的基础上,有效地抑制了FeCo薄膜的磁滞效应, 降低薄膜磁致伸缩应变时内部约束力的影响。表2 为沉积相同厚度 FeCo 薄膜与栅阵的传感器具体性 能对比。沉积500 nm FeCo 栅阵的传感器的检测灵 敏度可达18 kHz/A,磁滞误差 ε_H 仅为1.1%,远小 于沉积 FeCo 薄膜的传感器。此外,实验测得传感器 的基线噪声约为±0.5 Hz/s,那么传感器的检测下 限可达0.05 mA。由此可见,通过对磁致伸缩薄膜 栅阵化,将更好地改善SAW 电流传感器性能,以满 足电网中的实际应用需求。





Fig. 12 The measured continuous response of the stimulated sensor at various current values



图 13 沉积 FeCo 薄膜与栅阵的传感器响应对比

Fig. 13 Sensor reponse comparison betteen the sensor coated with FeCo film and grating

表 2 沉积 FeCo 薄膜和栅阵的传感器性能对比 Table 2 Performance comparison between the FeCo film coated sensor and stripped FeCo coated sensor

SAW 电流传感器	灵敏度/ (kHz·A ⁻¹)	线性度	迟滞误差 ε_H
沉积 500 nm FeCo 薄膜	16.6	1.36%	8.721%
沉积 500 nm FeCo 栅阵	18.1	0.73%	1.14%

5 结论

本文介绍了一种结合高磁敏磁致伸缩薄膜的 新型SAW电流传感器的设计原理与实验测试结果。 通过理论分析提取了优化的传感器设计参数。在 此基础上,实验研制了沉积FeCo薄膜的电流传感 器,测试结果显示,传感器表现出较高的检测灵敏 度和线性特点。为抑制磁致伸缩薄膜的磁滞效应, 文中将磁致伸缩薄膜栅阵化,测试结果显示,沉 积FeCo栅阵的SAW电流传感器表现出高灵敏度 (18 kHz/A)、良好的线性,此外,其磁滞误差远低于 沉积FeCo薄膜的传感器,仅为1.14%,因而在智能 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保等领域具有很好 的应用前景。

参考文献

 李璨, 乔凯. 电力系统中电流互感器论述 [J]. 技术与市场, 2016, 23(1): 85-86.

Li Can, Qiao Kai. Current transformer in power system[J]. Technology and Market, 2016, 23(1): 85–86.

- [2] 谢完成,戴瑜兴. 一种新的基于霍尔传感器的电流测量方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(8): 705-710.
 Xie Wancheng, Dai Yuxing. New current measurement method based on Hall sensors[J]. J. Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(8): 705-710.
- [3] 肖智宏. 电力系统中光学互感器的研究与评述 [J]. 电力系统 保护与控制, 2014, 42(12): 148–154.
 Xiao Zhihong. Study and comment of the optical transformers in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 148–154.
- [4] 张宇娇,程炯. 光学电流互感器在电力系统应用中出现的问题 及处理方法 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 101–103. Zhang Yujiao, Cheng Jiong. Issues and solutions of optical transducer used in power system[J]. Electronic Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 101–103.
- [5] 徐雪鹏. 光学电流互感器的稳定性研究及改善 [J]. 吉林电力, 2015, 43(3): 21-24.
 Xu Xuepeng. Research and improvement on the stability of optical current transformer[J]. Jilin Electric Power, 2015, 43(3): 21-24.
- [6] 张健, 及洪泉, 远振海, 等. 光学电流互感器及其应用评述 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 32–36.
 Zhang Jian, Ji Hongquan, Yuan Zhenhai, et al. Optical current transducer and its application[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 32–36.
- [7] Tang Y L, Li Z J, Ma J Y. Ammonia gas sensors based on ZnO/SiO₂ bi-layer nanofilms on ST-cut quartz surface acoustic wave devices[J]. Sens. Actuators B-Chem., 2014, 201(4): 114–121.
- [8] Wang W, Xue X, Huang Y, et al. A novel wireless and temperature-compensated SAW vibration sensor[J]. Sensors, 2014, 14(11): 20702–20712.

- [9] Wang W, Huang Y, Liu X L, et al. Surface acoustic wave acceleration sensor with high sensitivity incorporating ST-X quartz cantilever beam[J]. Smart Mater. Struct., 2014, 24(1): 015015.
- [10] Ma G M, Wu Z A. Wireless and passive on-line temperature monitoring system for GIS based on surface acoustic wave sensor[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2015, 31(3): 1270–1280.
- [11] Stoney R, Geraghty D, Odonnell G E. Characterization of differentially measured strain using passive wireless surface acoustic wave strain sensors[J]. IEEE Sensors J., 2014, 14(3): 722–728.
- [12] Steindl R, Hausleimer C, Hauser H. Wireless magnetic field sensor employing SAW-transponder[J]. Applications of Ferroelectrics, 2000, 2: 855–858.
- [13] Reindl L. Wireless passive saw identification marks and sensors[C]. 2nd Int. Symp. Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems. Chiba Univ., 2004: 1–12.
- [14] Li B D, Omar Y, Jurgen K. A surface acoustic wave passive and wireless sensor for magnetic fields, temperature, and humidity[J]. IEEE Sensors J., 2015, 15(1): 453–459.
- [15] Kadota M, Shigeo I. Sensitivity of surface acoustic wave magnetic sensors composed of various Ni electrode structures[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2013, 51(7): 120–124.
- [16] Meriem E, Omar E, Sebastien P W, et al. Magnetic field SAW sensors based on magnetostrictive-piezoelectric layered structures: FEM modeling and experimental validation[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2016, 240: 41–49.
- [17] Tong J, Jia Y, Wang W, et al. Development of a FeNi coated SAW current sensor based on magnetostrictive effect[J]. Applied Sciences, 2017, 7(8): 755.
- [18] 贾雅娜, 王文. 基于磁致伸缩效应的声表面波电流传感器敏感机理分析 [J]. 传感技术学报, 2017, 30(9): 1310–1317.
 Jia Yana, Wang Wen. Analysis on response mechanim of SAW current sensor based on magnetostrictive effect[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(9): 1310–1317.
- [19] Wang W, Jia Y, Liu X, et al. Enhanced sensitivity of temperature-compensated SAW based current sensor using the magnetostrictive effect[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(2): 025008.
- [20] Morales A L, Nieto A J. Simultaneous measurement of young's modulus and damping dependence on magnetic fields by laser interferometry[C]. International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems, 2007: 1–5.
- [21] 周磊,金自力,张羊换,等. 铁钴基软磁材料合金化的研究进展 [J]. 金属功能材料, 2006, 13(6): 37–40.
 Zhou Lei, Jin Zili, Zhang Yanghuan, et al. FeCo-based soft magnetic material's addition element and its development[J]. Metallic Functional Materials, 2006, 13(6): 37–40.
- [22] Plessky V P, Koskela J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices[J]. Int, J. High Speed El. and Syst., 2000, 10(4): 864–947.