

自组装置实现电阻应变法测量磁致伸缩系数

秦德辰 李雪薇 刘 奇 段启航 李昌林 王立英

(天津大学理学院物理系, 天津 300350)

摘 要 本文基于电阻应变片法, 自组了一套可实现恒温条件下测量材料磁致伸缩系数的测量装置, 并利用 LabVIEW 软件自主开发出程序控制的数据自动采集系统, 实现了计算机自动采集实验数据和实时显示数据图像。利用该装置, 我们对一种超磁致伸缩材料: 铽镝铁($\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$)合金的磁致伸缩系数进行了系统测量和对比实验, 测量结果表明利用该装置测量得到的材料磁致伸缩系数结果准确, 数据采集系统稳定可靠, 本实验内容可应用于应用物理学专业本科教学。

关键词 电阻应变法; 磁致伸缩系数; 数据采集系统

MEASUREMENT OF MAGNETOSTRICTIVE COEFFICIENT BY RESISTANCE STRAIN METHOD WITH SELF ASSEMBLED DEVICE

QIN Dechen LI Xuewei LIU Qi DUAN Qihang LI Changlin WANG Liying

(Department of Physics, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract Based on the resistance strain gauge method, a set of self-made measuring device was designed to measure the magnetostriction coefficient under room temperature. A program-controlled data acquisition system was developed by LabVIEW software, which enabled computer to collect experimental data automatically and display the real-time data images. The magnetostrictive coefficient of $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$ alloy was measured with this device, and contrast experiment was carried out. The results show that the measurement data is accurate and the data collection system is stable and reliable. This device can be applied to the undergraduate teaching of Applied Physics major.

Key words resistance strain method; magnetostrictive coefficient; data acquisition system

磁致伸缩效应是在外磁场下铁磁体和亚铁磁体的长度与体积随着磁化状态的变化而发生变化的现象。磁致伸缩材料是一类能将电磁能和机械能相互转换的功能材料, 作为 21 世纪战略性智能材料, 磁致伸缩材料已经广泛应用在电声换能器技术^[1]、海洋探测与开发技术、微位移驱动等高精密技术上, 与巨磁电阻、自旋阀等科学前沿热点研究联系紧密^[2]。

磁致伸缩系数是对磁致伸缩效应大小的最直

观描述, 是磁致伸缩材料的重要性能参数之一, 磁致伸缩系数越大则材料的磁致伸缩效应越强, 因此, 磁致伸缩系数已经成为磁致伸缩材料在实际工程应用中的重要衡量参数, 测量和研究材料的磁致伸缩系数, 将为更好地开发磁致伸缩材料的性能和用途提供理论指导。关于磁致伸缩系数的测量方法有很多^[3], 包括非平衡电桥^[4]、微位移法^[5]、劈尖干涉法^[6]和电阻应变片法^[7]等, 其中电阻应变片法由于兼具有分辨能力强、灵敏度高、可

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(51701138)。

通讯作者: 王立英, 女, 工程师, 主要从事大学物理实验管理和教学科研工作, liying.wang@tju.edu.cn。

引文格式: 秦德辰, 李雪薇, 刘奇, 等. 自组装置实现电阻应变法测量磁致伸缩系数[J]. 物理与工程, 2022, 32(2): 122-126.

Cite this article: QIN D C, LI X W, LIU Q, et al. Measurement of magnetostrictive coefficient by resistance strain method with self assembled device[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(2): 122-126. (in Chinese)

测量范围广、结构简单、性能稳定可靠等特点,而成为测量材料磁致伸缩性能的一种最常用的方法。铽镝铁(TbDyFe)^[8]合金是一种被广泛研究的稀土超磁致伸缩材料,其磁致伸缩系数可达 10^3 ppm 数量级^{[9][10]},是传统材料的几十至上百倍,可高效地实现电能转换成机械能,因而在各种控制元件、敏感元件等驱动原元件中得到了越来越广泛的应用。

本文采用电弧熔炼方法自行制备了磁致伸缩系数待测样品 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$,基于电阻应变片法,设计并搭建了室温下测量磁致伸缩系数的实验装置,且自行开发实验数据的自动采集程序,并利用该装置测量了 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$ 合金的磁致伸缩系数,实验测量过程操作简便,测量结果可信度较高。

1 实验原理

1.1 磁致伸缩效应

在一定的外磁场作用下,铁磁体(或亚铁磁体)的长度和体积会发生一定的变化,这种现象被称为磁致伸缩效应。根据材料伸缩效应的具体表现形式,磁致伸缩效应可以分为三种,一是长度变化沿着外磁场方向,称为纵向磁致伸缩;二是长度变化垂直于外磁场方向,称为横向磁致伸缩;三是磁化过程中铁磁体的体积发生变化,称为体积磁致伸缩。通常体积磁致伸缩系数非常小(ppm 量级),小到可以忽略,所以通常所说的磁致伸缩效应一般都是指纵向或横向磁致伸缩(统称为线性磁致伸缩)。

通常用磁致伸缩系数来描述磁致伸缩效应的大小。若在外磁场的作用下,沿着外磁场方向铁磁体长度 L 发生 ΔL 的长度变化,则定义 ΔL 和 L 的比值为材料的线性磁致伸缩系数,用符号 λ 表示,即

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

当 $\lambda > 0$ 时,表现为沿着外磁场方向铁磁体长度伸长,垂直于外磁场方向长度缩短,称为正磁致伸缩;当 $\lambda < 0$ 时,表现为沿着外磁场方向铁磁体长度缩短,垂直于外磁场方向长度伸长,称为负磁致伸缩。材料的磁致伸缩系数随着外磁场的增大而增大,当外磁场达到饱和时,则材料的磁致伸缩系数达到最大值 λ_s ,称为饱和磁致伸缩系数。

1.2 电阻应变片法测量磁致伸缩系数

电阻应变片是最常用的测力传感元件,其主要结构是将金属丝或半导体制成电阻栅贴在基底上,当用应变片进行测量时,将应变片固定在测试材料的表面上,施加外磁场后,测试材料形状发生变化,使得应变片的电阻栅变形,造成其电阻的变化。实验中,通过测量施加磁场前后应变片电阻的变化,根据一定的比例关系可以计算出实验材料在磁场作用下的磁致伸缩系数,即

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{kR} \quad (2)$$

其中, k 为应变片的灵敏系数(本实验所用应变片 $k = 2.08 \pm 0.01$),在实验过程中该数值基本保持不变; R 、 ΔR 分别为应变片的电阻和应变片电阻的变化值。

1.3 实验数据自动采集程序

本文基于 LabVIEW 编程系统,开发出了磁致伸缩实验数据自动测量系统,测量程序包括两部分:一是前面板,即人机界面(见图 1);二是程序框图,即程序源代码,(见图 2)。图 2 给出了磁致伸缩系数测量数据采集系统的完整方框图程序,方框图程序共包括三大模块:磁场控制模块、磁场-电阻(H - R)数据实时采集模块和数据储存模块。

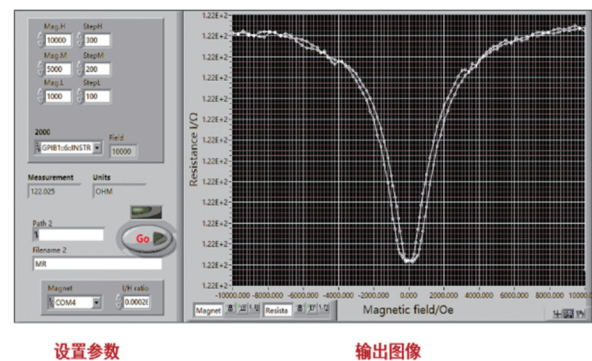


图 1 磁致伸缩系数测量程序前面板

首先是磁场控制模块(见图 2),设计了高(Mag. H)、中(Mag. M)和低(Mag. L)三个磁场强度范围,可分别设置不同采样步长(Step. H/Step. M/Step. L),用以提高采集数据的合理性和可靠性。其次是磁场-电阻(H - R)数据实时采集模块,该部分我们要实现磁场和电阻数据对的实时采集,为避免在测量过程中外置的霍尔探头位置移动造成采集到的磁场和电阻不对应,程序设计了在测量开始前输入电流大小和磁场强度的比值,

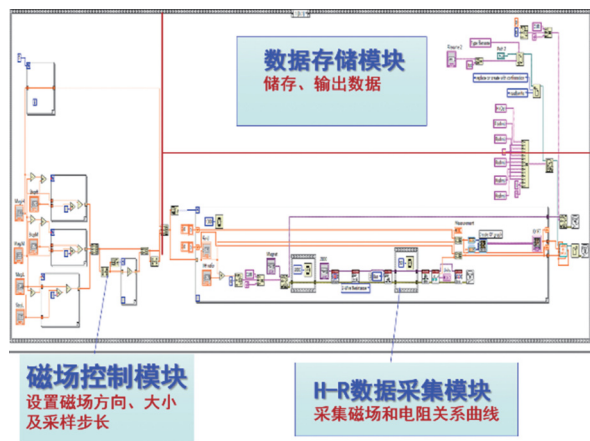


图2 基于LabVIEW控制的测量磁致伸缩系数的完整方框图程序

从而防止实验过程中高斯计移动造成实验数据和图像不准确,同时为了避免数据采集过快导致数据采集有误,磁场和电流的数据采样步长分别设置为 1000ms 和 2000ms,即每间隔 1000 ms 和 2000ms 采集一次磁场和电流数据。同时设计了磁场自动反向,以改变磁场方向测量。另外,磁场-电阻数据采集模块还设计了包括选择两端法测量、开始测量、结束测量、读取测量数据和输入数据单位等程序细节。最后是数据输出和存储模块,设计包括测量:1)数据的保存方式、路径和命名;2)记录存储数据类型,磁场强度大小 H 和电阻 R 大小;3)建立 XY 坐标轴,将写入的数据 H 作为横坐标, R 作为纵坐标,记录到坐标轴中作图,最终输出曲线。

2 实验仪器

实验装置如图3所示,装置主要由程控特斯拉计、程控功率电流源、电阻应变片、电磁铁、数字电表、可运行LabVIEW程序的计算机、磁致伸缩样品。

实验中使用的磁致伸缩样品为典型的超磁致伸缩材料: $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9}$ 合金。实验上将纯度大于 99.999% 的单质金属,按照合金中的原子百分比进行配料,采用电弧熔炼的方法,在高纯氩气保护下熔炼 4 次保证合金成相均匀。为了获得纯净的 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9}$ 合金相,将电弧熔炼的样品封入真空石英管中,使样品在 1123K 温度下持续保温 3 天(72 小时),然后缓慢随炉冷却至室温。采用 X

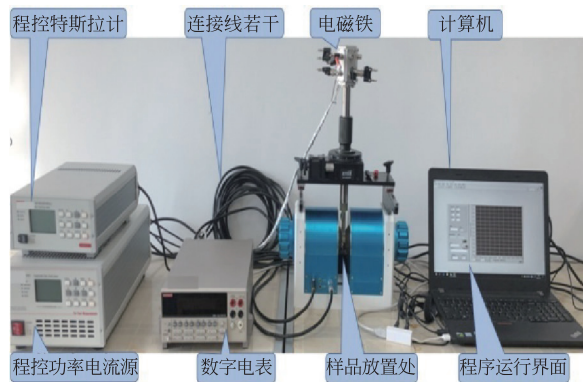


图3 实验装置实物图

射线衍射仪表征 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9}$ 样品的晶体结构,图4给出了我们制备的 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9}$ 合金的粉末 X 射线衍射图谱(XRD),从图中可以看出我们成功制备出了纯净的 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9}$ 合金相。

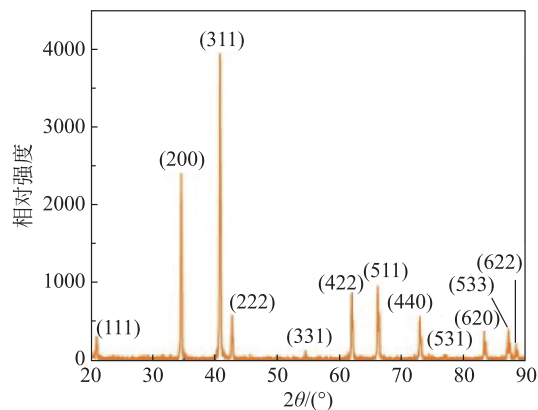


图4 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9}$ 合金的粉末 X 射线衍射图谱

接下来,我们将熔炼获得的 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9}$ 多晶样品在测试前进行线切割成长方体,并对测试面进行抛光,将电阻应变片粘贴于抛光好的样品薄片表面,如图5所示,并将样品固定在样品架上,最后用银胶将导线焊接到样品架电极上,使用二端法测量应变片电阻,处理好的样品如图6所示。

3 实验测量方法和数据处理

3.1 实验测量步骤

测量样品纵向长度平行于外磁场时的磁致伸缩系数

1) 将粘贴有样品的样品架置于线圈磁场中测

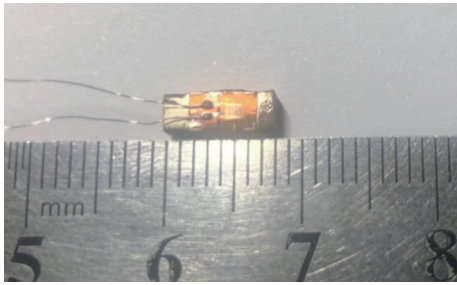


图5 粘贴电阻应变片的 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$ 合金

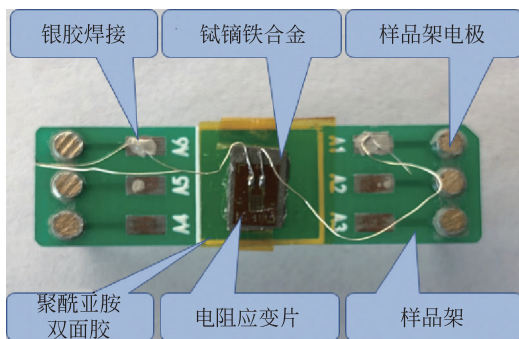


图6 固定在样品架上的 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$ 样品

量位置,将测量样品纵向长度平行或于磁场方向放置,将实时探测外磁场的霍尔探头置于磁场中。

2) 利用 LabVIEW 程序自动测量样品磁致伸缩系数

a. 确认所有的线缆都已正确连接后,打开计算机,运行已编写好的 LabVIEW 程序,输入不同磁场范围内采样步长等参数。

b. 依次打开程控功率电流源、程控特斯拉计和数字电表。

c. 待到特斯拉计显示屏显示的磁场稳定后,按“GO”键启动程序,开始自动测量,观察计算机测量软件界面输出的 $R_{\parallel}-H$ 曲线。

测量样品纵向长度垂于外磁场时的磁致伸缩系数

3) 将样品架上的样品旋转 90° ,使得样品纵向长度方向垂直于磁场方向,测量过程同步步骤 2),得到 $R_{\perp}-H$ 曲线。

4) 另外,本装置还可以实现手动测量 $H-R$ 曲线,具体过程为手动调节电流源使磁场升至 1T 左右,然后调节电流每减小 0.1A 记录一次磁场强度(H)和应变片电阻(R)。

3.2 数据处理

1) 将测得的外磁场下应变片的电阻值 $R_{\parallel}$ 和 $R_{\perp}$ 、应变片的灵敏系数 $k=2.08$ 和应变片初始电阻 $120\ \Omega$ 代入公式(1),即可计算出外磁场 H 下材料的磁致伸缩系数 λ 。

2) 利用 Origin 软件处理采集到的 $H-R$ 数据,绘制磁致伸缩系数 λ 随磁场强度 H 变化关系($H-\lambda$)曲线。图 7 和图 8 分别给出了自动和手动测量得到的 $H-\lambda$ 数据。

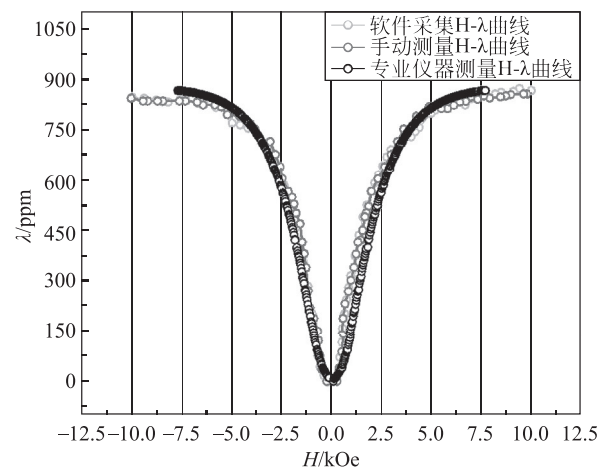


图7 室温下,样品纵向长度平行于外磁场时
样品 $H-\lambda$ 曲线

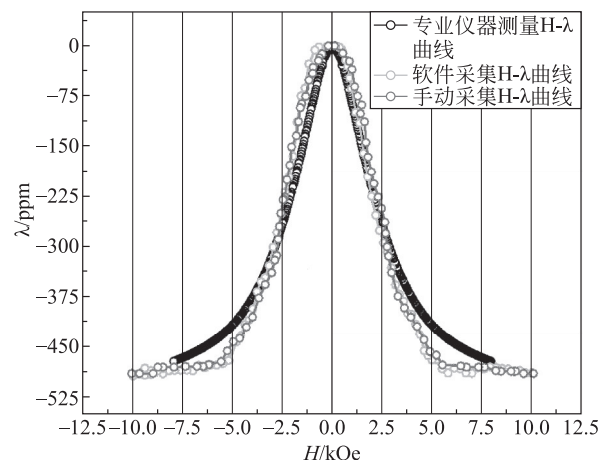


图8 室温下,样品纵向长度垂直于外磁场时
样品 $H-\lambda$ 曲线

观察图 7 和图 8,我们发现样品平行于外磁场方向的相对长度随磁场的增加而增大,所以在不改变应变片的粘贴方向时,当样品纵向长度平行于外磁场时,磁致伸缩系数为正值,而当样品纵向长度垂直于外磁场时,磁致伸缩系数为负值。对

比手动测量和自动测量的磁致伸缩曲线,发现两种方法测得的 $H-\lambda$ 曲线结果一致。其中,当样品纵向长度平行于外磁场时,手动测量和自动测量的饱和磁致伸缩系数 λ 分别为 866.0ppm 和 847.3ppm,相对百分差仅约 2%,对应饱和磁场分别为 7.5kOe 和 7.6kOe;当样品纵向长度垂直于外磁场时,手动测量和自动测量的饱和磁致伸缩系数分别为 -489.4ppm 和 -483.9ppm,相对百分差仅约 1%,对应饱和磁场均为 6.1kOe。说明通过我们编写的自动采集程序实时采集到了磁致伸缩效应引起的应变片电阻随磁场变化的真实值,即利用本程序实现了基于 LabVIEW 控制的实验数据实时采集的功能,程序自动测量结果可靠。

同时,为了验证本装置测量磁致伸缩系结果的准确性和可靠度,我们借助于河北工业大学材料学院的专业磁致伸缩和磁感生应变测试设备电阻应变计系统(中国科学院物理研究所与河北工业大学联合研制,型号 MEPMS-2),重复测量了 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$ 合金的磁致伸缩系数,并将测量结果与我们搭建装置测得的数据与进行了比较分析,如图 7、8 所示。电阻应变计系统测得的样品纵向长度平行/垂直于外磁场时的饱和磁致伸缩系数分别为 867.1ppm 和 -478.3ppm,比较发现专业测量磁致伸缩系数的科研设备的测量结果,与本实验装置所测磁致伸缩曲线非常吻合,饱和磁致伸缩系数相对百分差小于 2%,说明本实验装置测得时磁致伸缩曲线结果具有较好的准确度,结果可信。

4 结语

磁致伸缩系数使表征材料磁致伸缩性能的重要参数。本文基于电阻应变片法搭建了一套室温下磁致伸缩系数的测量装置,装置主要由电磁铁、程控功率电流源、程控特斯拉计、数字电表组成。同时,为了实现实验数据自动化采集,自主开发了基于 LabVIEW 控制的数据自动采集程序,极大地提高了数据测量效率。采用电弧熔炼方法自行制备出了实验需要的测量样品:典型的超磁致伸缩材料 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$ 合金。利用装置,测量了 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.9}$ 合金的磁致伸缩系数,从测量结果来看,该装置测量精度较好,并且原理简单,测量过程稳定,易于操作。该实验可作为大学物理

实验的一项研究型实验,以培养学生的科学研究基础和创新能力。

参 考 文 献

- [1] 贺西平. 稀土超磁致伸缩换能器[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 张东明, 周飞, 汪章维, 等. 磁致伸缩冻雨传感器系统研究与实验分析[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(4): 48-51.
ZHANG D M, ZHOU F, WANG Z W, et al. Research and experimental analysis of magnetostrictive frozen rain sensor system [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(4): 48-51. (in Chinese)
- [3] 高峰. 超磁致伸缩材料特性测量的实验设计[J]. 武汉理工大学学报, 2010(6): 410-412.
GAO F. Experimental design on measurement of giant magnetostrictive material properties[J]. JOURNAL OF WUT (INFORMATION & MANAGEMENT ENGINEERING), 2010(6): 410-412.
- [4] 陈宜保, 王文翰, 杨翔, 等. 超磁致伸缩材料性能测量实验[J]. 物理实验, 2008, 28(12): 13-15.
CHEN Y B, WANG W H, YANG X, et al. Performance measurement experiment of giant magnetostrictive material[J]. Physics Experimentation, 2008, 28(12): 13-15. (in Chinese)
- [5] 王学风, 张志杰, 孙昕, 等. 磁致伸缩测量仪[J]. 物理实验, 2013, 33(3): 14-17.
WANG X F, ZHANG Z J, SUN X, et al. Magnetostrictive apparatus[J]. Physics Experimentation, 2013, 33(3): 14-17. (in Chinese)
- [6] 吴庆春, 丁鸣. 劈尖干涉法测量磁致伸缩系数[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2015, 3(1): 32-35.
WU Q C, DING M. Measuring magnetostriction coefficient using wedge interference method[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2015, 3(1): 32-35. (in Chinese)
- [7] 杨艳, 安盼龙, 赵瑞娟. 电阻应变式传感器的研究[J]. 物理与工程, 2010, 20(2): 29-33.
YANG Y, AN P L, ZHAO R J. Study of the resistance strain sensor[J]. Physics and Engineering, 2010, 20(2): 29-33. (in Chinese)
- [8] 王博文, 曹淑瑛, 黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008, 131.
- [9] 唐鸿洋, 张洪平, 张羊换, 等. 超磁致伸缩合金 TbDyFe 组织与性能研究现状[J]. 金属功能材料, 2013, 20(2): 45-51.
TANG H Y, ZHANG H P, ZHANG Y H, et al. Research situation of microstructure and properties in giant magnetostrictive TbDyFe alloys[J]. Metallic Functional Materials, 2013, 20(2): 45-51. (in Chinese)
- [10] SPELIOTIS A, NIARCHOS D. Magnetostrictive properties of amorphous and crystalline TbDyFe thin films[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 106(1): 298-301.