

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417667

# 基于四探针法的磁性微米线电阻特性研究<sup>\*</sup>

熊心怡<sup>1,2</sup> 张玉东<sup>1,2</sup> 高昕<sup>1,2</sup> 杨轩<sup>1,2</sup> 卫荣汉<sup>1,2</sup>

(1. 郑州大学力学与安全工程学院 郑州 450001; 2. 河南省微机电系统制造与应用工程技术研究中心 郑州 450001)

**摘要:** 微纳米尺度下,磁性样品的电阻率会受到温度、尺寸和外加磁场等多种因素的影响。传统两线法测量样品阻值容易受到外界干扰,且由于接触电阻的存在会导致测量结果不够精确,影响实验结果。本文采用四探针法对磁性微米线样品的电阻特性进行研究,首先基于光刻工艺制备两种不同尺寸的镍微米线,同时配合能够对温度和磁场进行精确控制的测量系统,研究环境温度和外部磁场对不同尺寸样品阻值的影响。实验结果表明,镍微米线的阻值在-250℃以下的低温区几乎不随温度发生变化,之后随温度的升高近似呈线性增加;在常温下,镍微米线的阻值随着外部磁场强度的升高而增大,当磁场强度达到了2 000 Gauss后,样品阻值基本保持稳定。文章从微观电子输运角度,对磁性微米线电阻的温度效应、尺寸效应和磁阻效应进行了解释。

**关键词:** 四探针法;磁性微米线;电阻率;温度效应;磁阻效应

**中图分类号:** TN707    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Characterisation of magnetic microwire resistance based on the four-point probes method

Xiong Xinyi<sup>1,2</sup> Zhang Yudong<sup>1,2</sup> Gao Xin<sup>1,2</sup> Yang Xuan<sup>1,2</sup> Wei Ronghan<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Engineering Technology Research Center of Henan Province for MEMS Manufacturing and Applications, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The resistivity of magnetic samples at the micro-and nanoscale is affected by various factors such as temperature, size, and applied magnetic field. The traditional two-wire method to measure the sample resistance is easily affected by external interference, and the presence of contact resistance will lead to the measurement results not being precise enough, which affects the experimental results. In this paper, the four-point probes method is used to study the resistance characteristics of magnetic microwire samples. Firstly, two different sizes of nickel microwire are prepared based on photolithographic process, and at the same time, a measurement system that can accurately control the temperature and the magnetic field is used to study the effects of the ambient temperature and the external magnetic field on the resistance of the samples of different sizes. The experimental results show that the resistance value of the nickel microwire almost does not change with the temperature in the low-temperature region below -250℃, and then increases approximately linearly with the increase of the temperature; at room temperature, the resistance value of the nickel microwire increases with the increase of the strength of the external magnetic field, and the resistance value of the samples is basically stable after the magnetic field strength reaches 2 000 Gauss. The article explains the temperature effect, size effect, and magnetoresistance effect of magnetic microwire resistance from the microscopic electron transport perspective.

**Keywords:** 4-point probes method; magnetic microwire; resistivity; temperature effect; magnetoresistive effect

## 0 引言

磁性微米线<sup>[1-3]</sup>作为一类重要的磁性材料,具有广泛的应用前景,在数据存储领域,利用磁性微米线的巨磁电阻效

应可以实现高密度、高速度的磁存储<sup>[4]</sup>;在传感器技术领域,利用磁性微米线的电阻率变化可以实现对磁场、温度等物理量的高灵敏度检测<sup>[5]</sup>。电阻率是评估其性能和应用潜力的重要指标之一,通过深入研究其电阻率特性及影响因

收稿日期:2024-12-18

\* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(52171193)、国家自然科学基金青年项目(12102397)、国家留学基金(202407040056)项目资助

素,可以为材料设计与应用及新型电子器件的研发提供更多可能性<sup>[6-7]</sup>。而微米线作为一种微观尺度的材料结构,对其阻值的准确测量存在较大挑战,且容易受到外界干扰,测量时接入导线的电阻以及样品与电极间的接触电阻都会对结果产生较大影响,因此对于微纳米尺度的样品,可结合四探针法对其阻值进行精确测量<sup>[8]</sup>。

四探针法<sup>[9]</sup>是一种应用于电子器件中专门精确测定电阻值的方法。该方法基于欧姆定律的原理,即样品的阻值可以通过测量电阻两端电压与通过该电阻的电流来计算得出。在实际实验过程中,通常采用两线法对物体进行阻值的测量,这种做法的弊端在于会引入导线、探针以及导线与探针的接触电阻,对电阻值的测量结果产生干扰。为了克服这一难题,增设两个电流端点来施加电流,另外两个端点仅用来测量电压,由于两个测电压的触点不直接带电流,通过它们测得的电压值基本不受接触电阻的影响,从而可以保证较高的电阻测量精度,此即四探针测量方法<sup>[10]</sup>。由于磁性微米线样品在磁场作用下的阻值变化非常微小,各种因素对测量结果的影响较大。采用四探针法对磁性微米线的电阻进行测量,可以提高测量精度,准确捕捉细微的阻值变化。此外,四探针法能够对不同类型的磁性材料(如铁磁、反铁磁、顺磁性等)进行精确的电阻对比,从而帮助深入理解这些材料在不同磁场或温度条件下的电阻变化。这种精确的对比测量为研究磁性材料的电学性质提供了强有力的工具,特别是在需要测量不同材料在各种环境条件下电阻特性变化时,四探针法能够有效地减少外部因素的干扰。

本文通过多种光刻工艺的结合,制作不同尺寸的微米线,配合低温测量平台对不同样品的阻值进行测量,探究样品尺寸、温度、磁场等因素对微米线样品阻值的影响,并对测量结果进行详细分析。

## 1 实验设备

本研究使用的实验设备为实验室自主搭建的低温测量平台,如图 1 所示,该平台由四部分构成,分别是测量环境控制模块(真空系统、磁场系统、温控系统)和测量系统。

### 1.1 测量环境控制模块

真空系统为分子泵机组,如图 2(a)所示,工作时可以将样品测量腔室内的真空度维持在  $1 \times 10^{-5}$  Pa,通过这种方式可以减少外界环境对测量结果的干扰,减小实验测量过程中的误差,更加准确可靠的对样品电阻值进行测量。

磁场系统如图 2(b)所示,用于提供样品磁化所需要的外加磁场。该磁场系统采用独特的双轨结构,在使用该电磁铁时,需要将样品推入气隙处,调节两侧电磁铁的位置至合适位置。接着,控制通入电磁铁中的电流强度,便可以控制电磁铁产生的磁场大小。同时,实验时给电磁铁配置了切极箱,可以实现对电磁铁磁场方向的控制。此外,为了实时监测电磁铁气隙处磁场具体数值,还配置了一个高斯计,

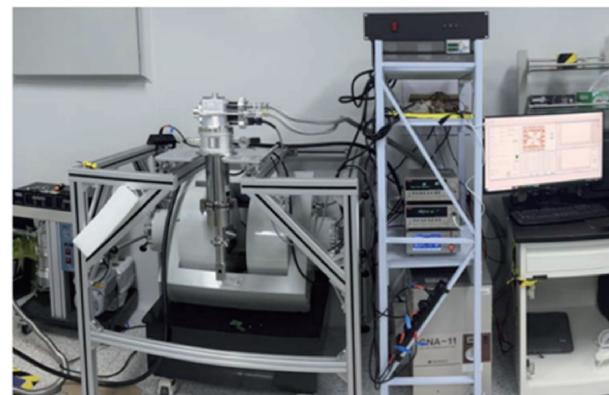


图 1 低温测量平台

Fig. 1 Low temperature measurement platform

在通入电流后高斯计会实时显示磁场大小,以便调整通入电流对磁场进行精确控制。在实验前,会先对磁场和通入电流的大小进行校准,首先向电磁铁施加同一方向不同强度的电流,之后逐渐改变电流方向,再次通入相同大小电流,逐一记录磁铁气隙处的磁场大小,便可以得到电流与磁场之间的对应关系。这一校准步骤对于后续测量流程中精确调控样品所处的磁场条件至关重要,它确保了测量结果的精确无误和可靠性。

温控系统如图 2(c)所示,可以提供样品测量时所需要的稳定环境温度,由闭循环低温恒温器和温控仪共同构成,闭循环低温恒温器内部会不断地压缩和释放氦气使温度持续降低,而温控仪可以加热使环境升温,该温控系统不仅可以使温度进行区间变化,还可以将温度稳定在测量设定的值,通过这种方式获得实时温度与设定温度之间的差值可以低至 0.01°C,实现对温度的精准调控。

### 1.2 测量系统设计

通过测量系统实现对整个系统设备的控制及对样品的测量过程,该测量系统由样品连接装置、16 选 4 模块、计算机、直流交流源表 KEITHLEY6221、微电压表 KEITHLEY2182A、GPIB 数据采集卡及数据线导线构成。

#### 1) 测量电表

由于测量对象为微纳米尺度样品,为了减少引入的导线电阻和样品与线路间的接触电阻,在本实验中采用了将直流源表(KEITHLEY6221)和微电压表(KEITHLEY2182A)共同使用的四探针法,直流源表提供稳定的电流,微电压表测量样品两端压降,如图 3(a)所示。二者的结合使用,使得阻值的测量结果可靠性提高,并且这种测量方式速度快、范围广,可以对样品阻值进行高速且准确的测量。

#### 2) 多通道测量系统

在测量过程中配备了温控装置,且该装置在关闭时需要至少 6 h 才能完成液氦的自然消散,这一过程极大地增加了测量时所需要的时间成本,让测量过程愈加复杂。因此本实验选择改进样品制作流程,在样品制作时,一次制作 4 根微米线,这样在放入真空腔室后,便可以一次测量多



图 2 测量环境控制模块  
Fig. 2 Modules for controlling the measurement environment

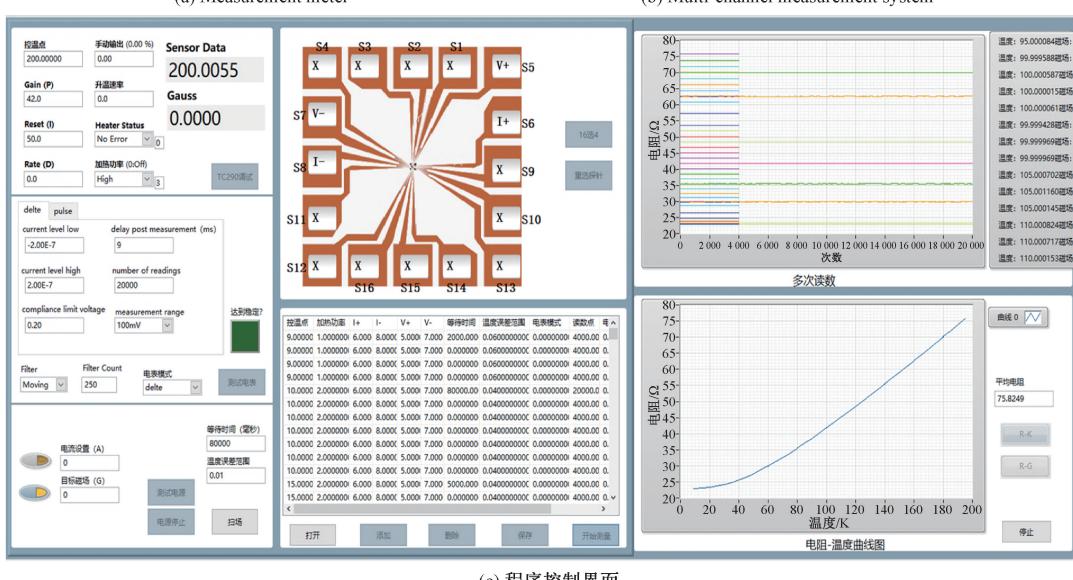


图 3 测量控制系统

Fig. 3 Control system

个样品的阻值。由于采用四点量测方式对阻值进行计算，4 根微米线会配有 16 个电极，因此选择了使用 4 个模拟开

关并联对 16 个电极共同进行控制，从中选出对应一根微米线的 4 个电极来进行样品的实时测量。与十六选四模

块相对应的,是真空密闭腔室处样品杆上的 16 根导线,这 16 根线与外部线路相连。接着使用 Altium Designer 软件进行线路设计并印制电路板,得到如图 3(b)所示的样品连接装置样品连接装置。该连接装置上有大小不同的各 16 个孔,大孔用来对应连接样品杆上的线路,小孔上焊接有压针用来连接样品片上的 16 个电极。通过这种方式,可以实现金极片上制作的样品与外部测量装置的连接,以此来对样品进行选择测量。

### 3) 程序控制

低温测量系统中使用的电磁铁、电表、十六选四系统、PID 控制系统均可与上位机进行通讯。为简化测量过程中的操作,采用了 LabVIEW 进行编程<sup>[11]</sup>,实现对各系统的同步控制,以及数据采集、GPIB 和串口控制、数据分析、数据显示和存储。这种方式使得系统设置更加简便,操作速度更快,可靠性更高,减少了操作误差,且便于维护。图 3(c)展示了 LabVIEW 程序的控制界面,通过该界面可以实现样品测量时对温度、加热速率、磁场、样品的选择,同时可以实时看到样品阻值的测量结果。

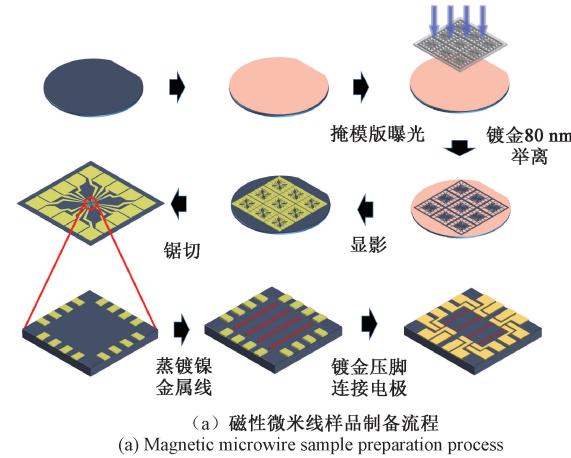
## 2 磁性微米线样品的制备与表征

本文所用到的磁性微米线样品基于 MEMS 工艺进行制作,完整的样品制作流程如图 4(a)所示<sup>[12]</sup>。首先将晶圆清洗并烘干,之后旋涂 AZ1500 4.4cp 光刻胶,使用提前制作好的掩模版,在紫外曝光机下曝光电极图案,曝光时间为 0.6 s。曝光完成后,使用 ZX238 显影液进行显影,显影时间不固定。显影过程中,可多次在显微镜下观察,确保图案基本显现出来后,使用去离子水进行冲洗。显影后检查图案,确认无误后,将晶圆放入双电子束蒸发镀膜系统中,沉积金层。之后将镀膜后的基板放入丙酮溶液中浸泡,举离掉多余的光刻胶,得到金电极片阵列。接下来,将晶圆通过锯切的方式割成 2×2 的单个金电极片,后续将在该单个金极片中心区域制作悬空微米线样品,中心样品制作区域面积约为 70 μm×70 μm。

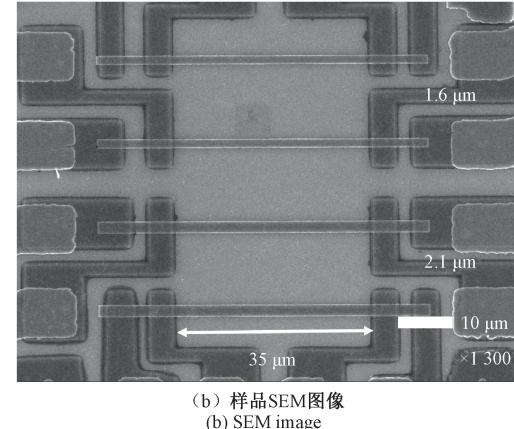
带有金电极的硅基板制作完成后,接着在基板上继续进行微米线的制备。采用微纳米制造工艺来产生微米线。首先依次使用丙酮、异丙醇、水和酒精清洗金极片,确保基板上的各个金电极未发生粘连。随后,使用氧等离子体清洗机对硅片表面进行亲水处理。接下来,旋涂 PMMA A4 光刻胶于金极片表面,并使用图形发生器曝光微米线图案。曝光完成后,使用显影液显影 70 s,再放入定影液中处理 30 s,处理完成后,样品将放入双电子束蒸发镀膜系统中沉积 100 nm 镍层,举离后获得带有结构的金属微米线。然后,再次旋涂 PMMA A7 光刻胶,配合电子束光刻方法曝光压脚层,曝光完成后,将硅片置入显影液中处理 30 s,随后在定影液中处理 15 s,并用氮气吹干定影液。最后,使用镀膜工艺在样品表面镀 100 nm 金。压脚层用于连接微米线与提前制作好的 16 根电极,以便后续使用四点量测

法进行测量。

在样品制作完成后,使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)表征样品的宽度与长度。在本实验中制作的两根样品实物图如图 4(b)所示,待测量的两根样品长度均为 35 μm,宽度分别为 1.6 μm 和 2.1 μm,图中右下角标注有 SEM 的放大倍数和比例尺。



(a) 磁性微米线样品制备流程  
(a) Magnetic microwire sample preparation process



(b) 样品 SEM 图像  
(b) SEM image

图 4 样品制备流程及表征

Fig. 4 Sample preparation process and characterization

## 3 实验结果与分析

### 3.1 温度对阻值的影响

使用前文中介绍的低温测量平台对制作出的两根微米线在−265℃~26.5℃温度范围内进行测量。在本实验中,样品的阻值随温度变化的测量从 26.5℃开始,并逐步降温,每次降温幅度为 5℃。每个温度点,阻值测量以 9 ms 为间隔进行,总共读取 4 000 次测量数据,以计算其平均值。每个温度点的测量重复进行 3 次,最终对 3 次测量结果取平均值,以提高数据的准确性和可靠性。测量结果如图 5 所示。

从图 5(a)中可以发现,两样品阻值随温度的变化特征较为相似,在一250℃以下的低温区阻值几乎不发生变化,之后阻值随温度的升高近似线性增加。这是因为,在低温

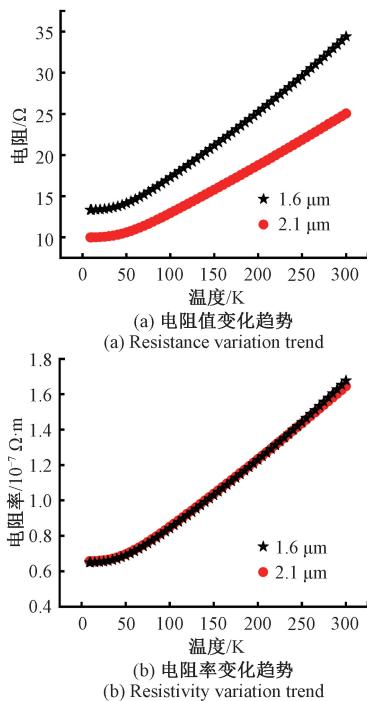
图 5 两种尺寸微米线在  $-265^{\circ}\text{C} \sim 26.5^{\circ}\text{C}$  温度范围测量结果

Fig. 5 Measurement results of two microwires in the temperature range of  $-265^{\circ}\text{C} \sim 26.5^{\circ}\text{C}$

时电阻主要来源于电子与样品内部缺陷的散射,而缺陷的存在与温度无关;随着温度的增加,样品中受激发声子的数目增多,电子与声子间的碰撞逐渐增强,导致阻值的不断增大<sup>[12]</sup>。同时,从图 5(a)中可以发现随着样品宽度的增加,样品的电阻值减小。这是因为样品尺寸增大时,样品内部电子发生碰撞的机会减少,电子的散射概率降低,从而表现为电阻值的减小。进一步计算二者的电阻率,如图 5(b)所示,可以发现电阻率随温度升高而增大,这一趋势与 2015 年 Darnbrough 团队<sup>[13]</sup>对镍纳晶的测量结果一致,即温度升高会导致电子的散射增加,从而增加电阻率。此外,从图 5(b)中可以发现,在不同温度下两种宽度的样品电阻率基本重合。同时也可看到,随着温度的升高,二者的电阻率出现略微差别,宽度为  $1.6\text{ }\mu\text{m}$  的微米线电阻率略高于宽度为  $2.1\text{ }\mu\text{m}$  的样品,这一差异在温度为  $26.5^{\circ}\text{C}$  时尤为明显。事实上,这一差异正是微米线电阻的尺寸效应,随着样品宽度的减小,微观上电子与壁面的碰撞几率增加,导致电阻的略微增大,而在宏观尺度下则基本很难观测到电阻率随尺寸的变化。这一现象表明,在微米尺度上,电阻率并不能简单地视为材料的固有属性,还会受到特征尺寸的影响。因此,在分析微纳米尺度材料的电传输特性时,应特别关注尺寸效应对电学性质的影响。

### 3.2 外部磁场对阻值的影响

在 3.1 节的基础上,使用低温测量平台控制测量温度为  $26.5^{\circ}\text{C}$ ,在该温度下设置磁场方向相同(沿微米线长轴

方向),对尺寸  $1.6\text{ }\mu\text{m}$  和  $2.1\text{ }\mu\text{m}$  的样品分别施加磁场,进一步研究外加磁场对磁性微米线阻值的影响。磁场强度从 0 逐渐升高到 4 000 Gauss,每隔 200 Gauss 测量样品阻值的大小,并在每个磁场强度下对阻值重复测量 3 次,之后求得电阻平均值,测量结果如图 6 所示。

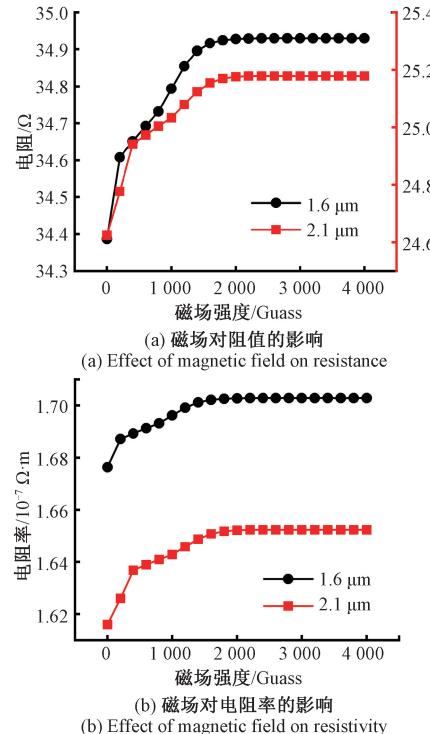


图 6 两种尺寸微米线在不同磁场强度下测量结果

Fig. 6 Measurements of two sizes of micron wires at different magnetic field strengths

从图 6 中可以发现,随着外加磁场强度的增加,样品的阻值也在随之增加,磁场强度增大到一定程度后阻值几乎不再发生变化。该测量结果与 2019 年 Isnaini 团队<sup>[14]</sup>的结论一致,即当外部磁场方向与样品方向平行时,阻值随磁场的增强先增大后达到稳定。对于普通导电样品,当外部磁场存在时,样品中电子将受到洛伦兹力的作用而发生偏转撞击到侧壁上,并逐渐在侧壁积累而形成与电流方向垂直的电势差,此即霍尔效应。由于外部磁场的存在,导致电子与晶格的碰撞概率增加,使得电子的有效迁移率降低,从而宏观上就表现为样品的电阻值增加<sup>[15]</sup>。对于磁性材料,外部磁场的作用不仅影响电子的运动,还会引起样品的磁化,在样品内部形成特定的磁畴结构。运动中的电子与内部磁畴的相互作用也会引起电阻值的变化。随着磁场的增强,材料的磁化会逐渐趋于饱和,此时磁场对电子迁移的影响也达到极限,电阻值不再发生变化<sup>[16]</sup>。实验中可以观察到,当外部磁场强度接近 2 000 Gauss 时,磁性微米线的电阻值基本达到稳定,这主要是由于此时样品内磁畴结构也基本稳定。

为直观展示磁性样品内部的磁畴结构,本文还采用磁

力显微镜<sup>[17]</sup>分别对加磁前后微米线的磁畴结构进行表征,结果如图 7 所示。图 7(a)为未施加磁场时两根微纳米内部磁畴分布状态,图 7(b)为施加饱和磁场后的磁畴分布状态。对两个图进行对比可以发现,磁场的存在改变了样品内部磁畴的分布状态,从未加磁时的混乱无序,逐渐变得有规律。结合电阻的测量结果可以推断,对于磁性微纳米线样品,其电阻值受到磁畴结构的影响。当有外部磁场施加时,磁畴的重新排列会导致电子在材料中的传输路径发生变化,从而影响电阻的大小。这一现象表明,磁性微米线的电阻特性不仅受到尺寸效应的影响,还与其内部磁畴结构的排列密切相关。

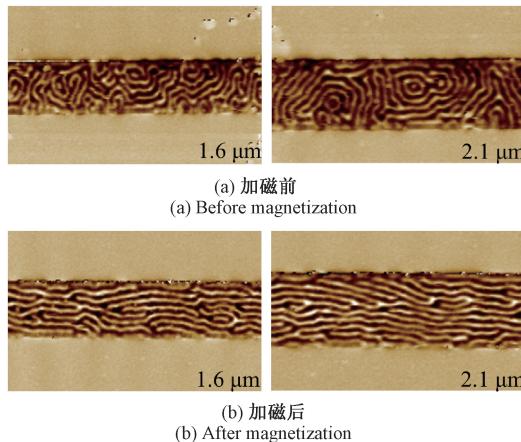


图 7 两根样品加磁前后磁畴分布状态

Fig. 7 Magnetic domain distribution states of two samples before and after magnetization

## 4 结 论

本文将闭循环低温恒温器、真空泵和外加电磁铁等整合为一个测量系统,通过十六选四模块可对样品进行选择测量,结合 LabView 程序对整个系统实时控制,可以很方便地实现对微米线样品电阻特性的精确测量和研究。基于光刻工艺制作了镍微米线样品,采用四探针法结合整个测量系统对宽度 1.6  $\mu\text{m}$  和 2.1  $\mu\text{m}$  的两根微米线的电阻值进行测量。结果发现,温度会对微米线的阻值有较大影响:当温度在  $-250^\circ\text{C}$  以下时样品阻值几乎不变,而在  $-250^\circ\text{C}$  之后,由于电子和声子的散射逐渐加剧,样品阻值随温度的升高而增大。同时,通过不同样品的对比发现,在微米尺度下,样品特征尺寸的减小会电阻率的略微增加。此外,还探究了磁场对样品阻值的影响,结果发现随着磁场强度的增加,样品阻值先增加之后达到饱和并保持稳定。

本实验中仅对两种尺寸的微米线进行了测量,如果希望进一步深入探究微米线电阻特性随尺寸的定量变化关系,未来可以对更多尺寸的微纳米线进行测量。此外,本文主要关注低温下微米线的电阻变化特性,实验中温度范围为  $-265^\circ\text{C} \sim 26.5^\circ\text{C}$ ,未来可以通过改进测量平台温控

系统,扩展测量范围,进一步探究  $26.5^\circ\text{C}$  以上温度对阻值特性的影响。

## 参 考 文 献

- [1] GAO W H, ZHANG Y K, LIU SH H, et al. High-precision strategy for piezoelectric characterization of nano/microwire[J]. Nano Energy, 2024(123):109392.
- [2] CORODEANU S, HLENSCHI C, ROTARESCU C, et al. Structural relaxation in metastable magnetic submicronic wires [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 905:164260.
- [3] BARANOV S A. Dependence of magnetic properties of micro-and nanowires on stress and magnetic heat treatment [J]. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2017, 53: 77-88.
- [4] AL BAHRI M. Controlling domain wall thermal stability switching in magnetic nanowires for storage memory nanodevices[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 543(16):168611.
- [5] LIANG ZH, WU J H, CUI Y, et al. Self-optimized single-nanowire photoluminescence thermometry[J]. Light-Science & Applications, 2023, 12(1):36.
- [6] 曾祥安, 朱丹丹, 周昊, 等. 基于特征融合的微电阻率成像测井空白带无监督填充方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(8):171-180.
- ZENG X AN, ZHU D D, ZHOU H, et al. Unsupervised filling method of micro-resistivity imaging logging blank zone based on feature fusion [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8):171-180.
- [7] 胡远洋. 基于深度神经网络的电阻层析成像重建方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(5):78-82.
- HU Y Y. Reconstruction method of electrical resistance tomography based on deep neural network[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(5):78-82.
- [8] 周博阳, 任少卿, 鲁富强, 等. 四探针方法测量钕铁硼永磁体电阻率[J]. 稀土, 2024, 45(2): 136-142.
- ZHOU B Y, REN SH Q, LU F Q, et al. Measurement of resistivity of NdFeB magnet with four-probe method[J]. Chinese Rare Earths, 2024, 45(2): 136-142.
- [9] ROUGET G, MAJIDI B, PICARD D, et al. Electrical resistivity measurement of petroleum coke powder by means of four-probe method [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48: 2543-2550.
- CHINNAPPAN A, LEE J K Y, JAYATHILAKA W A D M, et al. Fabrication of MWCNT/Cu nanofibers via electrospinning method and analysis of their electrical conductivity by four-probe method [J].

- International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 43(2):721-729.
- [11] 郭佑民,宋明瑞,郭啸. 电机轴承故障监测系统设计[J]. 电子测量技术,2023,46(11):179-184.  
GUO Y M, SONG M R, GUO X. Design of motor bearing fault monitoring system [J]. Electronic Measurement Technology, 2023,46(11):179-184.
- [12] ZHANG Y D, DU X R, JIA X, et al. Size and kink effects on thermal conductivity in nickel nanowires[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(8): 082201.
- [13] DARNBROUGH J E, ROEBUCK B, FLEWITT P E J. The influence of temperature and grain boundary volume on the resistivity of nanocrystalline nickel[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(18):675-20.
- [14] ISNAINI V A, KOLONITS T, CZIGÁNY Z, et al. Room-temperature magnetoresistance of nanocrystalline Ni metal with various grain sizes[J]. The European Physical Journal Plus, 2020, 135: 39.
- [15] 苏秀崖,湛高超,符斯列. 获得巨磁阻效应对称曲线的实验方法[J]. 物理实验, 2017, 37(S1): 56-58.  
SU X Y, ZHAN G CH, FU S L. Obtaining symmetrical curve of giant magnetoresistance effect [J]. Physics Experimentation, 2017, 37(S1): 56-58.
- [16] VITAYAYA O, NEHAN P Z Z, MUNAZAT D R, et al. Magnetoresistance(MR) properties of magnetic materials[J]. RSC Advances, 2024, 14: 18617.
- [17] KAZAKOVA O, PUTTOCK R, BARTON C, et al. Frontiers of magnetic force microscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(6):060901.

### 作者简介

熊心怡,硕士研究生,主要研究方向为功能微纳米结构。  
E-mail: xxy528210@163.com

张玉东(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为微纳米尺度流动传热、微纳机电系统。

E-mail:ydzhang@zzu.edu.cn

高昕,硕士研究生,主要研究方向为微纳机电系统。

杨轩,硕士研究生,主要研究方向为微纳机电系统。

卫荣汉,博士,教授,主要研究方向为微纳机电系统及功能微纳米结构、纳米热传导研究及热电器件开发。