

Q1-1
CHINA (China)

## 巨磁阻 [Giant Magnetoresistance (GMR)]

#### 引言

磁阻效应是指样品的电阻依赖于外部的磁感应强度。它由以下公式表征:

$$\delta(B) = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \tag{1}$$

公式中 R(B) 是在外部磁场 B 下的样品的阻值,R(0) 是样品在 B=0 时的阻值, $\delta(B)$  是电阻的相对变化率。

通常情况下,在相对较弱的磁场中, 电阻的相对变化率较小,一般在几个百分点以下。例如,磁场对电流的直接 作用就可能引起磁阻效应。由于洛伦兹力的作用,电荷载流子的流动受到影响,导致其流动性显著降低。因此, 电导率会随着磁场的增加而减小,样品电阻将会增大,这种现象发生在磁感应强度变化范围相对较大的情况下。

巨磁阻效应是由固体中的传导电子(载流子)自旋与磁矩的相互作用产生的。这种效应指的是,由铁磁层和非铁磁层交替构成的厚度为几个纳米的多层结构,在施加外部磁场的情况下,其电阻会减小。因为在相对较弱的磁场中电阻变化较大,因此称之为巨磁阻效应。由于巨磁阻效应的实用意义,Albert Fert 和 Peter Grünberg 在2007 年被授予诺贝尔物理学奖。

在这样一个多层结构中,在没有外部磁场的情况下,相邻的(中间隔着一层非铁磁层)两个铁磁层具有相反方向的自发磁化。如果该多层结构中的传导电子的自旋平行于磁化方向时,与磁矩有关的传导电子的散射是弱的;对于自旋反平行于磁化方向的电子,其与磁矩有关的散射是强的。所以自旋方向平行于磁化方向的和反平行于磁化方向的电子必然在其中一个铁磁层内强烈地散射。因此,在这种情况下,该多层结构的总电阻率是高的(参见图 1)。

如果施加一个足够强的磁场,使之平行于层的平面,那么所有的铁磁层都沿着磁场的相同方向被磁化。自旋方向平行于磁化方向的电子通过该结构,几乎没有与磁矩有关的散射。相反,自旋反平行于磁化方向的电子在铁磁层中会强烈散射。由于两个自旋通道并行传导电流,因此多层结构的总电阻主要由高导电的自旋与磁化方向平行的电子决定,会很小(见图 1b)。在图中,R 表示具有强散射层的大电阻,而 r 表示具有弱散射层的小电阻。  $R_0$  是这种结构在零磁场中的电阻,  $R_B$  是在一个足够强的磁场中使相邻两个铁磁层在相同方向磁化时的电阻。 GMR 效应的等效电路模型(所谓的"双电阻模型"),如图 1 所示。模型中的电路代表一个 1 GMR 元件。

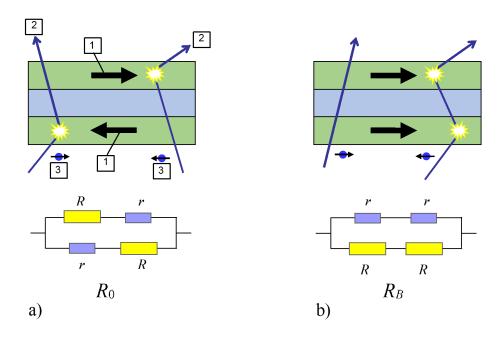
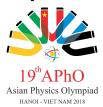
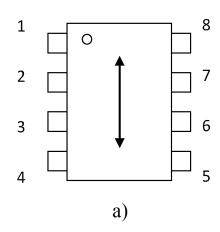


图 1: 巨磁阻效应模型。(1) 磁化方向;(2) 电子路径;(3) 电子自旋方向



Q1-2
CHINA (China)

巨磁阻效应(GMR)的一个应用是磁传感器,也称为磁力计,它可以用来测量所施加的磁感应强度。一种使用比较广泛的巨磁阻(GMR)磁传感器由连接在惠斯通电桥中的四个 GMR 元件组成,如图 2b 所示,每个 GMR 元件由上述模型中所描述的多层结构组成。这四个元件中的两个被封装以屏蔽所施加的外磁场,从而它们对外部磁场不敏感。磁传感器被封装在如图 2a 所示的 8 引脚器件中,电源电压连接到引脚 4 和 8。引脚 1 和 5 间的电压为输出信号电压。这是通常的操作方法。不过在本实验中,你可以对任何一对引脚连接供电,而不会损害传感器。传感器的灵敏度轴由图 2a 上的箭头表示,磁传感器对所施加的垂直于该轴线的磁场不敏感。



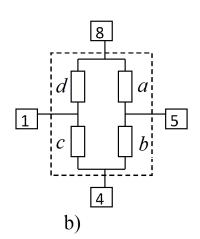


图 2

我们将传感器的四个元件的电阻称为 a, b, c, d , 如图 2b 所示。

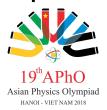
请注意,元件电阻可以认为是不依赖电流的。

为了制造具有不同灵敏度的传感器,使用了集成的磁通量集中器(flux concentrator )。由于它的作用,传感器内部元件的有效磁场比施加的磁场强。

由于集成的通量集中器和多层结构的磁性层中存在铁磁材料,所以传感器的电特性存在磁滞现象。

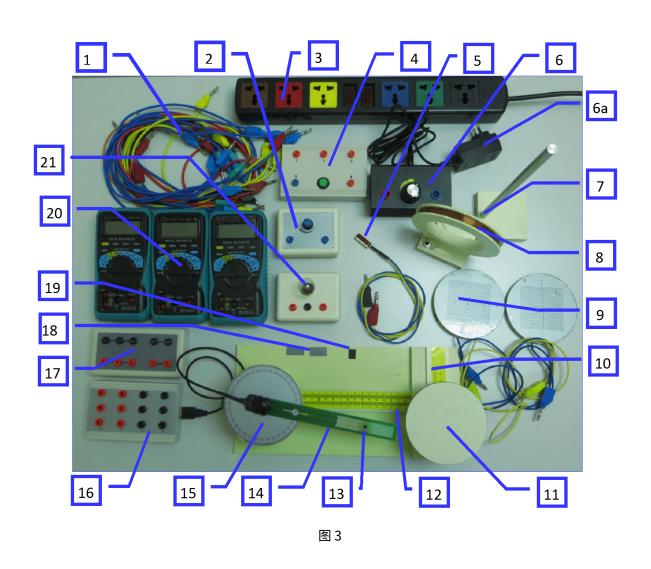
## 实验目的是:

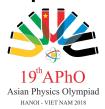
- 1. 研究巨磁阻效应。
- 2. 研究巨磁阻效应磁传感器。
- 3. 研究巨磁阻效应传感器的一些应用。



# Q1-3 CHINA (China)

## Ⅲ. 实验装置





1	导线	12	具有纵向导轨的平台
2	变阻箱	13	磁传感器
3	220 伏交流电源插线板	14	传感器固定架
4	电池	15	短杆(图片中看不到)支撑的刻有角 度的圆台
5	扁平线圈	16	传感器接线盒
6	可调节直流电流源(带适配器 [6a])	17	接线盒
7	带高杆的支撑架	18	铁磁片
8	圆形线圈	19	永久磁铁片
9	埋有电路的印刷电路板	20	万用表(3个)
10	横轨	21	双灯丝电灯泡
11	转台		

## \*) 更多信息请见附录

警告: 220 V 交流电压仅可用于台灯(图 3 中未显示出)以及可调节直流电流源的适配器(6a)的供电。严禁将任何其他设备接入此交流电压。

Ⅲ. 实验

## A. 了解磁场 (1.0 分)

在这个实验问题中,磁场可能是

- · · 由以下元件产生的磁场
  - -载流的圆形线圈;
  - -载流的扁平线圈;
  - 一片永久磁铁。
- · · 地球的磁场。

#### 1. 了解由载流圆形线圈产生的磁场

圆形线圈 [8] 的平均直径 d=10.0 厘米,匝数 N=500。当电流 I 流入时,由该线圈在其中心产生的场,约等于半径为圆形线圈的平均半径、电流为 500I 的圆形电流环产生的磁场。

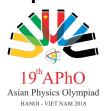
**A.1** 圆形线圈中心处的磁感应强度可以写成 B=kI 的形式。B 以 mT 为单位和 I 以 mA 为 0.5pt 单位,计算 k 的数值。

## 2. 了解地球磁场

地球磁场无处不在。在每个给定点周围一个很大的空间区域内,可以认为地球磁场是均匀的。地球磁场的水平分量的大小用  $B_h$  来表示。

**A.2** 写出与地球磁场磁感应强度水平分量成  $\beta$  角的方向上的磁场  $B_{\beta}$  的表达式,用  $B_h$  和 0.5pt  $\beta$  表示。

注意: 始终考虑地球磁场对磁场测量的影响。



## B. 使用 GMR 磁传感器研究 GMR 效应(7分)

注意: 这部分相对独立于其余部分。在不做 B 部分的情况下,你可以先做 C 和 D 部分。

在这部分,我们研究磁传感器内每个元件的电阻对外部磁场的依赖性。圆形线圈 [8] 放置在纵向导轨上。传感器固定架 [14] 用旋钮拧在圆形刻度盘 [15] 的水平位置上,将磁传感器 [13] 置于圆形线圈的中心,并且传感器的灵敏轴垂直于线圈平面。通过改变圆形线圈中的电流,来改变作用在传感器上的磁场。确保磁传感器的灵敏度方向沿着东西向(在实验桌上标记了),以保证地球磁场不会影响你的测量。请注意,东西向已使用磁罗盘在本地确定。磁传感器由电池 [4] 供电。圆形线圈由可调直流电流源 [6] 供电。

#### 1. 确定 GMR 元件的电阻

a. 元件在 B=0. 时的电阻。

将圆形线圈中的电流设置为 I=0

B.1	B.1 绘制实验图,并根据实验数据求出计算每个元件的电阻的表达式。	1.25pt
B.2	B.2 进行测量和计算,以确定 $B=0$ 时的元件 $a$ , $b$ , $c$ 和 $d$ 的电阻值。	1.25pt

## b. 元件在最大外部磁场下的电阻。

将线圈中的电流 | 设置为可能的最高值。

**B.3** 进行测量和计算,以确定元件 a,b,c 和 d 在最大外部磁场中的电阻值。 0.5pt

## c. 元件的属性

**B.4** 指出哪几个元件对磁场敏感。

0.25pt

## 2. GMR 元件的特性

在本节中,你将研究未被封装的两个 GMR 元件中的一个的性质。选择其中一个 GMR 元件并确定  $\delta(B)$  - 电阻相对变化对外部磁场的依赖性。

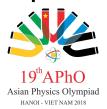
B.5	给出所选 GMR 元件的名称。	画出实验电路图,	并根据测量数据,	推导出计算 $\delta(B)$ 的	0.75pt
	表达式。				

B.6	进行相应测量和计算,以确定 $\delta(B)$ 与外部磁场 B 的关系,B 的范围从零到最大可能	1.25pt
	值,在表中填入物理量的测量值,根据电流 $I$ 和外部磁场 $B$ 的值,确定 $\delta(B)$ 的值。	•

B.7	绘制 $\delta(B)$ 关于外部磁场 B	(图1)	的曲线	0.5pt

<b>B.8</b>	在曲线 $\delta(B)$ 强烈依赖于 B 的区域,	确定在该区域中曲线 $\delta(B)$ 的平均斜率 $\alpha = \frac{\Delta \delta(B)}{\Delta B}$	0.25pt
<b>D</b> .0		$\mathbf{m}$	0.201

B.9	确定元件的 GMR 系数 $\delta = rac{ riangle R_{max}}{R(0)}$ 。	这里 $ riangle R_{max}$ 是磁场中电阻的最大变化值。	0.25pt
-----	--	-------------------------------------	--------



**B.10** 根据图 1 中给出的模型,求出 GMR 元件的电阻 R 和 r 的值,以及比率  $\gamma = \frac{r}{R}$  的值。 0.75pt

## 巨磁阻效应磁传感器的研究(6分)

在这部分,我们将会研究磁传感器 [13] 的最重要性质。圆形线圈 [8] 放置在纵向导轨上 [12]。把传感器固定架 [14] 用螺丝固定在圆形刻度盘 [15] 的水平位置上,令传感器的位置处于圆形线圈的中心,而传感器的中轴与线圈平面垂直。通过改变线圈电流来改变作用在传感器上的磁场。确保传感器的灵敏轴方向应设置于东西方向,以避免地球磁场对测量的影响。

#### 1. 传感器的输出特性

磁传感器由电池[4]以最大电压供电,供电电压连到引脚4和8。圆形线圈由可调直流电流源[6]供电。

- $\mathbf{a}$ . 首先把线圈电流 I 调到最大值。1 号引脚和 5 号引脚之间的电压就是传感器的输出电压 S 。
- **b.** 逐渐减少线圈中的电流直到它的值降至 I=0 ,对于每一个电流值,读取相应的输出电压 S 的值。
- **c.** 改变线圈中的电流方向,逐渐增大电流 I 的值直至最大值,并读取每个电流值 I 及其对应的输出电压 S 的值。
- **d.** 逐渐减小通过线圈中的电流 I 直到它的值降至 I=0 ,并读取每个电流值 I 及其对应的输出电压值 S。
- **e.** 改变通过线圈中的电流 I 的方向。逐渐提升电流 I 的值至最大值,并读取每个电流值 I 及其对应的输出电压值 S。

C.1	将上述测量过程中的电流值 $I$ 以及对应的输出值 $S$ ,以及外加磁场 $B$ 填入表格。	1.0pt
C.2	输出电压 S 为外部磁场 B 的函数,画出 $S(B)$ 对应于 B 的图。(图 2)	1.0pt
C.3	1. 圈出 $S(B)$ 曲线的饱和区域,并用"S"标记。 2. 圈出 $S(B)$ 曲线的线性区,并以"L"标记。 求出线性部份的平均斜率 $m= \frac{\triangle S}{AB}$ 的值。	0.5pt

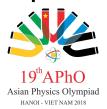
**C.4** 从图 S(B) 中,确定矫顽磁场  $B_C$ ,它是反向磁化达到饱和后使得 S 最小所需要的外 0.5pt 部磁场,它是使 S 在饱和磁场的相反方向磁化后变为最小所需的外部磁场。

**注意**:在实验时,若你想用曲线 S(B) 的线性区域,你可使用提供的永久磁铁片 [19]。把磁铁片放在传感器固定架 [14] 上,传感器 [13] 的附近,改变它与传感器的相对位置,以选择曲线上的工作点,一旦找到合适的工作点,就利用胶布将磁铁片固定。以上步骤叫做**偏置**。

#### 2. 供电电压对输出电压的影响

电池盒 [4] 给磁传感器供电。将传感器连接到电池盒不同的插孔,可以选择不同的供电电压 E 。设置线圈的电流 I ,使其对应于 S(B) 曲线的线性区域。

C.5	在表中填入供电电压 E 及对应的输出电压 S 的值。	0.25pt
C.6	画出 S 作为 E 的函数的图。	0.25pt



Q1-7
CHINA (China)

**C.7** 试推导一个解析表达式,即传感器输出电压 S 关于 B.8 中求出的 GMR 元件的斜率  $\alpha$ 、 0.5pt 供电电压 E 以及外加磁场 B 的关系式。这里,我们假设两元件的  $\alpha$  是相等的,它们也没有磁滞特性。此外,我们假设在没有磁场的情况下,四个元件的电阻值均相同。

#### 磁通量集中器(flux concentrator)之研究

磁传感器中的磁通量集中器,包含两块薄膜铁磁结构,其厚度为微米量级,长度为数百微米。磁通量集中器的 作用是加强两块铁磁结构空隙间的磁场。

为研究磁通量集中器对磁传感器的效应,我们用两块铁磁性薄片组成外置的磁通量集中器 (如图 4 所示),放置在磁传感器两端附近的位置,每块薄片长度为  $L_2$ ,两薄片之间相距  $L_1$ 。

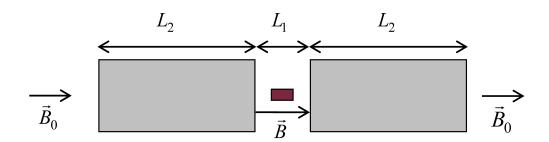


图 4. 磁通量集中器示意图

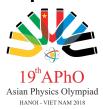
 $B_0$  后,作用在传感器的等效磁场便为 B。假如  $L_1$  的改变范围不太大, B 可以用以下经验公式表示。

$$\frac{B}{B_0} = n\frac{L_2}{L_1} + 1 \tag{2}$$

试对磁场传感器及两片铁磁性薄片 [18] 进行实验,以求出公式 (2) 中 n 的值。

8		1.0pt
	你选择用以下哪一个磁场来进行实验? a. 圆形线圈电流所形成的磁场 b. 扁平线圈电流所形成的磁场 c. 永久磁铁片的磁场 d. 地球磁场	0.25 %
	画出实验简图,并依据实验测量数据,求出决定 n 值的表达式。	0.75 ታ

**C.10**  $B/B_0$  关于某个合适变量的函数的图 (**Graph 4**),从而好确定 n 的值。给出 n 的值。 0.5pt



## GMR 巨磁传感器的应用()

在这一部分,我们考虑磁场传感器的一些应用。

#### 1. 地球磁场的测量

要求使用磁传感器来确定地球磁场的一些参数。实验提供了一些额外的坐标纸,需要用它们来求解该题。

a. 地球磁场水平分量的大小

将圆盘 [15] 固定在水平面上。传感器固定架 [14] 用旋钮拧在圆盘上。通过旋转圆盘上的传感器固定架,确定在 与传感器灵敏轴成不同角度的方向上地球磁场水平分量的值。

**D.1** 绘制实验示意图,并依据测量数据求出用于计算地球磁场 水平分量大小  $B_h$  的表达 0.5pt 式。

**D.2** 进行测量和计算,算出  $B_h$ 

0.25pt

## b. 地球磁场的大小和磁倾角

磁倾角定义为地球磁场矢量  $\vec{B}_{Earth}$  与水平面之间的夹角  $\theta$ 。

将圆盘 [15] 固定在高杆 [7] 上,使圆盘在南北方向的垂直平面内。传感器固定架 [14] 拧在圆盘上。通过旋转圆盘上的传感器固定架,确定在与传感器灵敏轴成不同角度的方向上地球磁场分量的值。

**D.3** 绘制实验示意图,并依据测量数据给出计算  $B_{Earth}$  和磁倾角 heta 的表达式。

0.75pt

**D.4** 进行测量和计算,并算出  $B_{Earth}$  和  $\theta$  的值

0.5pt

#### 2. 直流功率计

在本节中,使用磁场传感器制作功率计的电路。将传感器插入扁平线圈 [5] 内。这个扁平线圈与负载串联,所以扁平线圈中的电流 I 与负载中的相同。扁平线圈中的电流 I 产生作用于传感器的磁场,并且负载两端的电压 U 用于为传感器供电。

传感器的输出电压信号 S 用于确定负载中耗散的功率 P.

双丝灯泡 [21] 用作负载。通过以不同方式使用灯泡的三个接线插口,可以获得多个负载电阻值  $R_L$ 。

在许多情况下,即使没有外部磁场作用,磁传感器的惠斯通电桥也不平衡。这是由于组件的电阻和铁磁层的剩磁的小差异导致的。在这种情况下,需要先平衡电桥,然后才能在功率计的电路中使用它。传感器固定架 [14] 水平地用旋钮拧在圆形板 [15] 上。传感器由电池 [4] 以最高电压供电。使传感器垂直于地球磁场。观察万用表上的输出电压信号 S。如果S=0,电桥是平衡的,你不需要做其它事情。如果  $S\neq0$ ,电桥不平衡,你需要平衡它。将变阻器 [2] 并联到组件 a,b,c 和 d 中的一个,以使信号 S 的数值减小。调整变阻器以将 S 减小到零。现在这个电桥是平衡的。这个过程称为平衡。

在某些情况下,使用变阻器无助于平衡电桥。在这种情况下,只需将传感器固定架旋转一个小角度即可,以使输出信号 S 降至 S=0。

**D.5** 绘制功率计的电路图,图中包括测量中使用的负载及万用表。

0.5pt

使用连接盒 [17] 制作(连接)图中功率计的电路。改变负载电阻  $R_L$  并调节直流电流源 [6] 的输出以改变负载上的电压  ${\sf U}.$ 



Q1-9
CHINA (China)

 D.6
 在表格中填入传感器输出信号 S ,和其对应的 I、U 以及 P = U.I 的值。
 0.75pt

 D.7
 绘出 P 关于 S 的函数的图(图 5)
 0.5pt

P = f(S) 的曲线被称为功率表的校准曲线。

**D.8** 求出校准曲线 P = f(S) 的函数形式,并确定其系数的值。

0.25pt

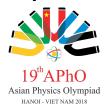
#### 3. 检测隐藏的电路

在本节中,要求使用磁传感器来制作一个用于查找隐藏电路形状的设备。电路是隐藏在印刷电路板的表面内。 粘贴在印刷电路板反面上的网格用作坐标系统。

可以通过以下方式进行此实验。将圆盘 [15] 置于水平位置并固定在短杆上。传感器固定架 [14] 拧在圆盘上。将隐藏电路的印刷电路板 [9] 平放在转台上 [11]。转盘可以在水平面内自由转动,也可以在两个垂直方向上沿轨道 [10] 和 [12] 移动。将印刷电路板的导线连接到可调直流电流源 [6],红色导线连接正极。调节直流电流源以选择电路中的电流值。通过相对于磁传感器 [13] 移动的印刷电路板,并观察传感器输出信号 S 的变化,可以检测埋藏电路的位置和形状及其电流方向。实验提供了一些更大的方格纸,在求解此问题时可能需要它们。

**D.9** 在答题卡的方格纸上画出隐藏的电路图及其电流方向。

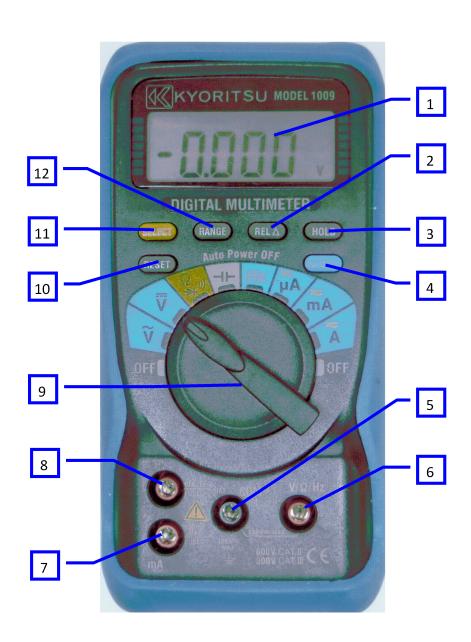
2.0pt

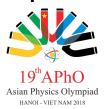


Q1-10
CHINA (China)

附录

## 1. 万用表说明





1	显示	7	测量端(mA)
2	归零键	8	测量端 (A)
3	数据保持键(保留测量数据)	9	功能选择开关
4	频率/占空比测量键	10	重置键
5	公共测量端	11	功能选择键
6	测量端(V/Ω/Hz)	12	量程

- · 为避免复杂化,请勿使用以下按键: REL 键 [2],HOLD 键 [3],Hz,DUTY 键 [4],RESET 键 [10]。
- · 要启动万用表并开始测量,请将功能选择开关 [9] 旋转至所需的功能。
- ・ 使用测量端( $V/\Omega/Hz$ )[6] 和公共测量端(COM)[5] 测量电压和电阻。
- · 使用测量端(A)[8]和测量端子(COM)[5]和功能A测量电流。
- · 开机后约 30 分钟万用表将自动关闭。旋转功能选择键切换到 OFF,然后返回到所需功能继续测量。

为避免自动关闭,请在将功能选择开关旋转至所需功能时按 SELECT 键。

#### 2. 电池

电池的电路如图 A2 所示。

按下按钮时电池开启,松开按钮时电池关闭。

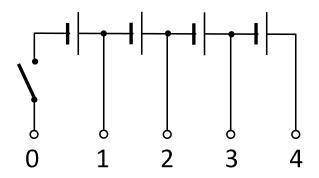


图 A2

## 3. 传感器接线盒

在使用传感器之前,需要将传感器线缆插入传感器接线盒。一旦传感器连接到这个接线盒上,盒子上标记的数字就对应于图 2 中的引脚数字。