

敏感技术物理及应用专题系列(IV)

磁敏传感器及其应用

黄得星

(黑龙江大学敏感技术研究所)

本文从与磁敏传感器相关的物理效应出发,探讨了各种磁敏传感器的工作原理、材料及其主要应用。

磁敏传感器是将磁场或磁感应强度等物理量转换成易于控制的电信号的磁电转换元器件或装置。磁学物理量的转换都是通过许多功能材料的物理效应来实现的,如表 1 所示。

表 1 磁敏传感器与相应的物理效应

物理效应	材料	检测范围	主要应用领域
约瑟夫森效应	超导材料	最高分辨率 10^{-13} T	检测弱磁场、微弱电压等
核磁共振效应	质子	最高分辨率 10^{-14} T	检测弱磁场,作测磁计量标准用
塞曼效应	碱金属原子、氢	最高分辨率 10^{-7} T	检测磁场(与磁场方向几乎无关)
倍频谱波效应	软磁材料	最高分辨率 10^{-14} T	检测弱磁场(方向性强)
霍耳效应	半导体材料		用于制作特斯拉计、无触点开关、函数发生器、运算器
磁阻效应	半导体材料 软磁材料		检测磁场,用于制作无触点电位器、磁卡识别传感器等
PN 结注入效应	半导体材料		检测磁场,用于制作无触点开关等
Weigand 效应	软磁合金丝		用于制作无源无触点开关等

下面按传感器的物理效应探讨各种磁敏传感器。

一、约瑟夫森超导量子干涉器件^[1]

1963 年,人们发现当 SIS 结(S 表示超导体, I 表示绝缘体)的 I 层厚度达到 1nm 左右时, SIS 结临界电流 I_c 与磁场有关。 I_c 对磁场很敏感,一般 10^{-4} T 的磁场能使 I_c 变化很大,而且 I_c 随外磁场周期地起伏。当磁场为零时,超导结的临界电流为最大,随着磁场的增强,结的临界电流下降,甚至为零,以后随着磁场的增强, I_c 又增加到较小的极大值,如图 1 所

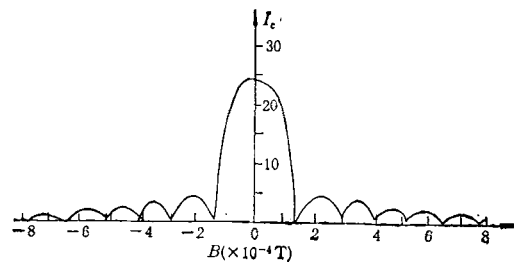


图 1 SnISn 结临界电流 I_c (mA) 随磁场变化关系

这种现象是与超导体 SIS 结两边超导电流之间的量子干涉效应有关,因此称为量子相干效应。这种约瑟夫森量子干涉器件(SQUID)

在超导状态下最高分辨率达到 10^{-13}T 。用这种传感器制作的直流电压计可分辨 10^{-19}V 的微弱电压,可用于测量温差电动势、霍耳电压、电噪声、超导体内的磁蠕变等物理量。

二、核磁共振仪

1946年 Bloch 和 Purcell 提出核磁共振理论,其重要应用之一是制成质子磁场计^[2],这种磁场计精度高,所以作为计量标准磁场测量的仪器。

设有一个核磁矩为 μ 、核角动量为 p 的原子核的顺磁性液体试样(例如含有质子的水、苯等),在外界磁场 H_0 的作用下,核磁矩的合成磁矩 M 以 H_0 为轴进动,其进动频率为

$$\omega = \gamma H_0, \quad (1)$$

式中 ω 叫拉莫尔进动角速度, $\gamma = \mu/p$ 。

如图 2 所示,在 y 轴方向缠绕试样的线圈上,通以高频交变电流。设交变电流频率 $f = \omega/2\pi = \gamma H_0/2\pi$ 时,核磁进动频率与外界频率发生共振,样品吸收高频交变信号能量,产生吸收峰。因此,只要准确测定 γ 值,就可以通过吸收峰的频率测量 H_0 。

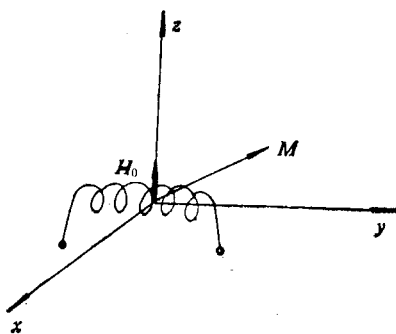


图 2 磁场 H_0 与检测线圈的相对方向

三、光抽运磁场计^[3-5]

从原理和结构上看,光抽运磁场计是比较复杂的,而且与磁场的方向几乎无关,其最高分辨率达到 10^{-7}T ,可以连续测量变化很快的磁

场(变化周期为几十毫秒)。

在磁场作用下,原子能级发生分裂(称为塞曼效应),能级分裂的间隔与磁场成正比。原子基态能级分裂间隔可用相应的频率表示为 $f_m = \gamma H_0/2\pi$,式中 γ 为旋磁比, f_m 称为塞曼频率。

一般用碱金属(如铯原子)和氦原子的基态能级的塞曼效应作光抽运磁场计的敏感材料。当外界磁场很小又不加光抽运的状态时,处于各分裂能级上的原子数是相等的。从铯光源发出的光通过圆偏振器射入铯原子气试样。如果光通过圆偏振器变成右旋偏振光,那么铯原子基态能级中被分裂的下能级上的原子就会被激发到高能级,如图 3(a) 所示。这种现象叫做光抽运。这时,试样加以塞曼频率进行调制,使被分裂为上能级的原子调制到下能级,而下能级上的电子又光抽运到高能级,光探测器检测出被抽运的光吸收峰。光探测器与放大器以及调制线圈组成一个正反馈系统。当调制频率正好与塞曼频率一致时,光探测器检测出非常尖锐的吸收峰。根据光抽运的吸收峰和塞曼频率来测定外界磁场。这种传感器的基本结构如图 3(b) 所示。

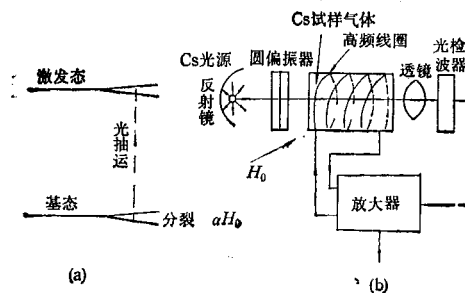


图 3 光抽运传感器的原理图

(a) 碱金属塞曼效应; (b) 传感器基本结构

四、用倍频发生器制成的麦克斯韦型磁传感器^[6]

在非线性软磁材料上绕初级线圈和次级线圈。在初级线圈上通以频率为 ω_0 (约 2kHz) 的正弦波电流,使得在软磁材料轴上产生充分磁

饱和的交流磁场,由于软磁材料的非线性特性,在次级线圈上产生正负矩形或尖脉冲。当外界磁场为零时,正负脉冲完全对称,所以它按傅里叶级数展开,偶数倍频率项为零;当外界磁场不为零时,正负脉冲出现不对称现象,所以按傅里叶级数展开,偶数倍频率项不为零,其中倍频谐波经滤波、放大和整流,可得到与外界磁场成正比的直流电压。因此,在非线性软磁材料上绕初级和次级线圈的变压器称为倍频发生器。软磁材料一般用超导磁合金和镍铁高导磁合金。最近发现非晶磁性薄膜具有更优良的特性。

设在倍频发生器软磁材料上通以频率为 ω_0 的正弦波电流,这时初级线圈内磁场为

$$H = H_m e^{i\omega_0 t} + H_0 \quad (2)$$

式中 H_m 为正弦波电流产生的最大磁场强度, H_0 为外加磁场。因此,在次级线圈内得倍频谐波电压为

$$V_i(2\omega_0, t) \propto \omega_0 H_0 \left[\frac{2H_i}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_i}{H_m}\right)^2} \right] e^{i2\omega_0 t} \quad (3)$$

式中 H_i 为饱和磁场。

这种磁传感器的探头长度越长,它的磁场分辨率越大。探头长度80mm时,可分辨 10^{-11} T的磁场。

这种传感器的探头对磁场方向的分辨率很高,用两个或三个探头做成互为垂直的探头,就可做成检测二维、三维地磁矢量的传感器。

这种传感器的优点是体积小,携带方便,可用于检测弱磁场、预防地震,预测地磁大小和方向变化,三维磁矢量传感器可代替陀螺,还可用于高空探矿和探测潜艇等。

五、霍耳元件及其集成电路

霍耳元件是一种半导体矩形薄片,在它的短边两端面分别焊接两根引线,称为控制电流端引线。在它的长边中央分别焊接两根引线,称为霍耳输出端引线。若在霍耳元件的控制电流端通以电流 I ,并在片子的平面法线方向加磁感应强度为 B 的磁场,则通过霍耳元件的电

流受磁场的洛伦兹力作用,在垂直于电流和磁场方向上发生偏转,产生一个电势 V_H (称为霍耳输出电势):

$$V_H = R_H I \cdot B, \quad (4)$$

式中 R_H 为霍耳系数。

这种现象称为霍耳效应。一般霍耳系数为

$$R_H = \mu \rho, \quad (5)$$

式中 μ 为迁移率, ρ 为半导体的电阻率。

霍耳元件的乘积灵敏度 K_H 为

$$K_H = R_H/d, \quad (6)$$

式中 d 为霍耳元件的厚度。

在相同的几何形状和相等的功耗下,不同半导体材料制成的霍耳元件,在单位磁感应强度下,最大霍耳输出电压仅仅取决于 $\mu\rho^{1/2}$,即材料本身。由此可见,半导体电子迁移率比空穴大,所以霍耳元件均采用N型半导体材料,如硅、锗、铋化钢、砷化钢、砷化镓等。

锗霍耳元件的 $K_H = 2-50\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{T}$,铋化钢的 $K_H = 80-300\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{T}$,砷化镓的 $K_H = 30-200\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{T}$ 。

硅的迁移率很小,但是易于集成化,因此将霍耳元件与放大电路、整形、开关电路等集成在一芯片上,可制成霍耳线性和开关集成电路。这种电路成本比较低,有多种用途^[7]。

用MOS场效应晶体管制成的霍耳元件的磁灵敏度较高,可达 $200\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{T}$ 。

利用MOS集成电路制造工艺已研制成MOS型霍耳集成电路^[8]。

随着半导体工艺的发展,霍耳元件的性能有了进一步的提高,并已发展到薄膜化、集成化、功能化阶段。其中用溅射技术制成的多晶薄膜铋化钢霍耳元件,虽然其灵敏度不如单晶铋化钢霍耳元件,但是它的制造工艺简单,易于批量生产,所以成本低,用量最多,大都用作无刷直流电机的转换元件。

霍耳元件的应用领域非常广泛,可作检测磁场的特斯拉计探头、钳型表的敏感元件、无接触开关元件,用于制作函数发生器、功率表以及各种运算功能的器件(如乘法器)等。

六、磁阻元件^[9]

在磁场中半导体的电阻率增大的现象叫做物理磁阻效应，而在磁场中半导体的电阻增大与它的形状有关的现象叫做几何磁阻效应。

为了提高几何磁阻效应，在矩形薄片上面蒸镀许多平行的等间距金属条，使霍尔电势 V_H 短路。设短路金属条数为 n ，而且 $l/(n+1) \leq 0.35w$ (l 为磁阻元件矩形薄片的长度， w 为它的宽度)，那么电阻将增加 $(n+1)$ 倍。

半导体磁阻元件用 N 型的、迁移率最大的半导体如锑化钢单晶。半导体磁阻元件是两端元件。在低磁场下，其电阻变化与 $(\mu_n B)^2$ 成正比，随着磁场变大，逐渐变为与 $(\mu_n B)$ 的一次方成正比关系。磁阻元件几乎都是用锑化钢单晶制作的，所以它的温度特性不好，温度补偿也很困难。

在锑化钢中掺入一定的镍金属，使它在结晶时析出针状晶体锑化镍。这种锑化镍单晶电阻率很低，针晶直径为 $1\mu\text{m}$ 左右，长度为 $100\mu\text{m}$ 左右。它在结晶过程中整齐地平行排列起来，使它起着霍尔电势短路作用。这就是锑化钢-锑化镍共晶磁阻元件。

还有一种软磁性合金的磁阻元件^[10]，它是用 Fe, Ni, Co 合金制成的薄膜型磁阻元件。这种元件不同于半导体磁阻元件，它的温度特性和使用温度范围均优于后者。

软磁性合金磁阻元件的电阻率只与磁场方向和通过元件的电流方向的夹角有关，而与磁场大小无关，这种现象叫做定向磁阻效应。

软磁性合金的电阻率 $\rho(\theta)$ 与磁场和电流方向之间夹角 θ 之间关系为

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} \sin^2 \theta + \rho_{\parallel} \cos^2 \theta, \quad (7)$$

式中 ρ_{\perp} 和 ρ_{\parallel} 分别为电流方向与磁场垂直和平行时的电阻率。

软磁性合金磁阻元件是三端元件，是由特性和尺寸完全一样的两个电阻器互相垂直排列而成，如图 4 所示。

设 x 和 y 轴方向的电阻率分别为 $\rho_x(\theta)$ 和

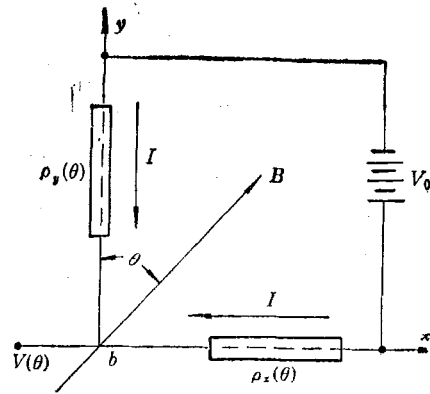


图 4 软磁性合金磁阻元件的结构

$\rho_y(\theta)$ ，则

$$\rho_x(\theta) = \rho_{\perp} \cos^2 \theta + \rho_{\parallel} \sin^2 \theta, \quad (8)$$

$$\rho_y(\theta) = \rho_{\perp} \sin^2 \theta + \rho_{\parallel} \cos^2 \theta. \quad (9)$$

设 V_0 为电源电压，则 b 点的输出电压 $V(\theta)$ 为

$$V(\theta) = \frac{V_0}{2} - \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos 2\theta}{2(\rho_{\parallel} + \rho_{\perp})} \cdot V_0. \quad (10)$$

由此可见，这种磁阻元件的输出电压只与磁场和电流方向夹角 θ 的 $\cos 2\theta$ 有关。

磁阻元件主要应用于检测磁场，制作无接触电位器、磁卡识别传感器、无接触开关等。

七、磁敏二极管和磁敏三极管^[11,12]

磁敏二极管和磁敏三极管是一种 PN 结型磁敏器件，它的灵敏度比霍尔元件大一、二个数量级。磁敏二极管是一种 PIN 型长二极管，I 区长度要大于载流子扩散长度，而且厚度要小于载流子扩散长度。在这种长二极管的下侧面，用喷砂等方法破坏晶格设置高复合表面区，以便两相对侧面的表面复合速度相差甚大。当正向偏压加在磁敏二极管上时，除了 PI 结和 IN 结偏压外，大部分偏压降在 I 区，使 I 区载流子漂移。在垂直于电流方向和平行于复合表面方向上加磁场时，漂荷载流子受洛伦兹力作用，向复合区偏转或者背离复合区向对立面偏转，使得载流子有效寿命下降或者增加，引起磁敏二极管的伏安曲线向右或者向左偏移。所以，磁

敏二极管具有正、负磁灵敏度。磁敏二极管的磁灵敏度一般用电压磁灵敏度来表示。也就是说，磁敏二极管在一定的负载电阻下，通过磁敏二极管的电流为 3mA 时，在 $B = \pm 0.1\text{T}$ 磁场中输出电压变化量定义为磁灵敏度。2ACM 型锗磁敏二极管和 2DCM 型硅磁敏二极管的磁灵敏度为 10V/T 左右。由于锗材料本身的特性，锗磁敏二极管的温漂很大。所以，一般采用互补或差分电路。也就是说，要选择两只特性一致的磁敏二极管串接或并接成互补电路或差分电路。在串、并接时，磁敏二极管的磁敏感极性要相反，因此互补或差分电路的磁灵敏度就等于磁敏二极管正、负磁灵敏度之和。

硅磁敏三极管是在磁敏二极管的基础上发展起来的，具有双极型 PNP 型结构的长基区三极管。这种 3CCM 型磁敏三极管的基区宽度要大于载流子扩散长度，它的放大系数 $\beta < 1$ ，但是它的集电极电流输出在磁场中增加或减少，具有正、负磁灵敏度。它的磁灵敏度用集电极电流的相对变化量来表示。

在 3CCM 型硅磁敏三极管中未设置复合区，所以它具有表面噪声小、性能稳定等特点。它的磁灵敏度大于 50%/T。

3CCM 硅磁敏三极管的集电极电流具有负温度系数，一般为 $-0.1 \sim -0.3\%/^{\circ}\text{C}$ 。

若选择特性一致的两只 3CCM 管做成差分电路，则可以提高磁灵敏度两倍，同时可补偿温漂。

两只 3CCM 管集成在一芯片上，可制成 4CCM 型硅磁敏三极管差分电路。

如果四只硅磁敏三极管以它们共用的发射区为中心，互相垂直地集成在一个芯片的 x 和 y 轴上，把各 x 、 y 轴上的两只硅磁敏三极管连成差分电路，那么用这种二维磁矢量传感器可测量二维磁场和它的取向。用二维磁矢量传感器制成的角度传感器可连续测量 360° 角度，同时测量瞬时角速度和角加速度。

据报道¹⁾，用三只霍尔元件集成在一个芯片上，可制成三维磁矢量传感器。

利用硅平面工艺也研制成硅磁敏三极管开

关集成电路和线性集成电路。硅磁敏三极管线性集成电路在制造工艺和成品率方面，优于霍尔线性集成电路，因此这种新型线性集成电路已开始用于直流无刷电机的转换元件。

PN 结型磁敏器件应用也比较广泛。它用来制作检测磁场的探头、测量直流电流的敏感器件以及各种高低温范围内的无接触开关等。

八、Weigand 磁敏器件^[13]

Weigand 磁敏器件是由 Fe48% + Ni52% 的坡莫合金丝和 V10% + Co52% + Fe38% 的维卡合金丝做成敏感元件的无源开关型磁传感器。这种合金丝经过表面特殊加工和处理后，就会变成内层和外层矫顽力不同的两重磁化特性的合金丝。图 5 给出这种合金丝的两重稳定的磁化状态。

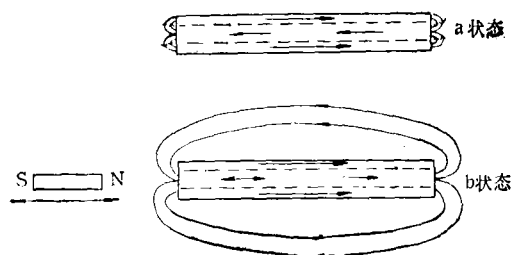


图 5 Weigand 丝的两重磁化状态及其器件结构
(a) 两种磁化状态；(b) Weigand 磁敏器件结构

如图 5 所示，由 a 状态转变成 b 状态和由 b 状态转变成 a 状态，都伴随着磁通量的突变。如果合金丝外面绕一组感应线圈，则当 a 和 b 状态之间突变时，线圈将感应出脉冲电压。这种器件就叫做 Weigand 磁敏器件。

合金丝经表面加工之后，表面一层的矫顽力比内层矫顽力大一个数量级以上。因此，在外层剩磁的作用下，内层软磁材料向着外层剩磁在内层的取向磁化，这就是 a 状态。如果对

着外层剩磁在内层产生的磁化的反方向，加一磁场，则当磁场加到一定程度时，由于外加磁场

(下转第 399 页)

1) 前中介一，第四届国际传感器会议论文集（下册），(1987), 782.