

静磁波法研究材料的磁性

张鹏翔 曹克定

(中国科学院物理研究所)

1984年9月19日收到

提 要

设计了可在片状样品上宽频带内(2—8GHz)激发,接收静磁波的器件。在此基础上建立了测量静磁波频率-磁场关系的系统。用该系统不仅可以研究材料中的静磁波的激发、传播特性,也可以用来测量材料的基本磁性。用于基础研究测量时该系统显示出与铁磁共振方法不同的特点:样品不置于谐振腔内,可以在对样品进行某些处理的同时作测量。

一、引 言

静磁波是磁性介质中传播的一种速度较慢的磁偶极子波。Damon 和 Eshbach^[1]最早在理论上研究了这种波的频散关系等基本特性。后来 Brandle 和 Freeman^[2]实验上也观测到了静磁体波和静磁表面波的传播。由于这类波的传播速度比电磁波速度慢几个数量级,以及可以做表面处理,受到人们的广泛重视,并在研制可调延迟线、表面波器件等方面取得进展^[3]。人们还试验用半导体中载流子和静磁波的相互作用实现磁波的放大。这样更有利于器件的实用化和集成化。为了有效地激发和接收磁波,人们研究了各种形式换能器^[4]。最近利用磁波的可调谐特性还研制成功了可调谐静磁波振荡器,滤波器等系列有实用价值的微波器件^[5]。

随着对静磁波基本特性的深入理解和静磁波接收技术的发展,可以用激发和检测静磁波的方法研究材料的磁性。我们设计了简单的能在宽频带内工作的静磁波激发,检测器件,并用于几种材料的基本参数测量。讨论了测量的可靠性和精度,并与其他常用方法做了比较,讨论了该方法的适用范围及优缺点。此外,在器件的研制中要求更多地了解与磁波激发有关的磁性问题的,我们的系统也可用于相应的研究,并为器件研制提供基础。

二、片状样品中的静磁波

静磁波实际上是磁性介质中自旋波的一部分。当样品处于外磁场中,所有磁矩彼此平行排列时,若有一扰动使一些磁矩偏离平行位置,则此偏离会如波一样传播出去。当波长很短时这种波的能量主要由自旋间的交换作用决定,称交换波,当波长很长时交换作用可以忽略,波的能量主要由静磁能,即磁偶极子作用能决定,因此称为静磁波。通过同时求解磁性介质中 Maxwell 方程和磁矩进动方程,考虑到样品的形状(边界条件,退磁因子)

以及决定相互作用的主要能量, 可以求出不同波长下自旋波的色散关系. 当交换作用为主 ($k > 10^5 \text{cm}^{-1}$) 忽略磁偶极相互作用时, 得到自旋波的 $\omega \approx Dk^2$ 的色散关系. 当 $k \approx 10^4 - 10^6 \text{cm}^{-1}$ 时必须同时考虑交换、偶极相互作用, 求解方程变得十分复杂, 只有在特殊情况下才得到解^[6]. 当交换作用可以忽略时 ($k < 10^4 \text{cm}^{-1}$), Damon 和 Eshbach 最早得到片状样品中静磁波的色散关系. 样品、坐标系以及外磁场方向如图 1 所示. 他们的结果可概括到图 2. 纵轴为静磁波归一化频率 Ω

$$\Omega = \frac{\omega}{r4\pi M_s} \quad (1)$$

两个横轴代表静磁波两个波矢 k_x, k_y .

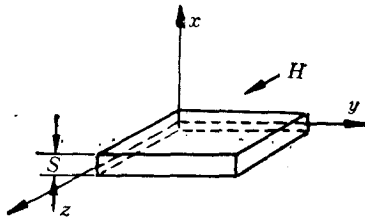


图 1 样品、外磁场及坐标系的选取

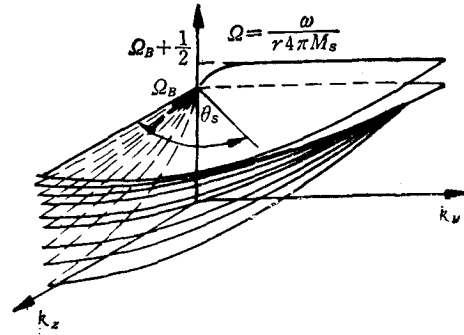


图 2 片状样品中静磁波的色散关系

图 2 表明, 当不考虑静磁波沿着片状样品平面法线方向 (x 轴) 的传播时, 沿磁场方向 (x) 和沿垂直磁场方向 (y) 的静磁波传播特性是不同的. 完全沿 x 方向即磁场方向传播的静磁波有许多支. 当 $k_x = 0$ 时其频率为一致进动频率:

$$\Omega = \Omega_B = [\Omega_H(\Omega_H + 1)]^{1/2} \quad (2)$$

其中

$$\Omega_H = H/(4\pi M_s) \quad (3)$$

H 为施加于磁矩上的有效磁场 (忽略各向异性场). (2) 式表明, 沿 y 方向激发磁波并 $k_x = 0$ 时, 磁波频率与波矢 k 无关. 这给实验带来极大的方便. 随着 k_x 的增加, 磁波分裂成许多支静磁波, 频率分布在 Ω_B 和 Ω_H 之间. 可以证明这些波的振幅在样品内是均匀的, 即是在整个样品内传播的磁波, 常称为体静磁波. 当静磁波波矢从磁场方向转向垂直于磁场的方向时, 各支之间的频率间距逐渐减小, 直到完全沿 y 方向传播时, 频率又与一致进动频率简并. 这时还有另一支静磁波出现, 其频率高于一致进动频率, 其色散关系不同于一致进动也不同于其他体磁波为

$$\Omega^2 = \Omega_B^2 + [2 + 2\coth(|k_y|S)]^{-1} \quad (4)$$

可以证明, 这支静磁波只存在于样品表面, 其振幅随着离表面的距离增加呈指数衰减, 因此是表面静磁波. 静磁表面波只存在于一定的波矢范围 (见图 2). 只有波矢的两个分量满足

$$\tan(\theta_s) = \frac{k_y}{k_x} \geq \Omega_H^{1/2} \quad (5)$$

时才有表面波出现. 表面静磁波的另一个特点是不可逆性, 即波矢 k , 外磁场 H 和样

品表面法向 $\mathbf{n}$ 组成右手螺旋, 磁场方向改变, 表面波的传播方向也改变 (见图 3)。这些特点在静磁表面波的激发和磁振子激光布里渊散射实验中都得到了证实^[7], 并被用于做静磁表面波非互易器件。

(4) 式中有两个极端情况是经常遇到的, 当表面波波长远小于样品厚度时, 磁表面波频率趋于常数:

$$\Omega = \Omega_H + \frac{1}{2} \quad (k_z S \gg 1) \quad (6)$$

当表面波波长远大于样品厚度时, 呈线性色散关系:

$$\Omega = \Omega_B + k_y \cdot S / (4\Omega_B) \quad (k_y S \ll 1) \quad (7)$$

迄今静磁波的这些特点还只是部分地被证实, 还有些特性需要进一步研究并开发其应用。

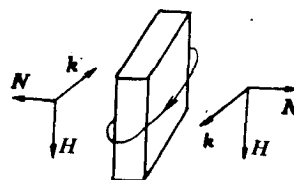


图3 表面波不可逆性

三、实验设备及样品

静磁波激发有多种形式^[4], 我们采用细丝耦合器激发。把传播微波信号的同轴线的中心导体引导片状样品然后短路, 就得到了最简单的静磁波激发器。微波场经过短路细丝在样品端面产生电磁场, 并与样品端面静磁偶极矩发生耦合, 产生 $k \approx 0$ 的磁波并传播出去。细丝直径越细, 激发的静磁波波矢越大。若细丝直径为 d , 则有 $k_{\max} = \frac{\pi}{d}$, $k_{\max}$ 为激发磁波的最大波矢。细丝耦合器制作简单, 有宽的使用频率范围, 很适于我们的测量。在样品的另一端放置另一根短路细丝通过上述过程的逆过程, 细丝上就感应出传播过来的静磁波。将丝的另一端经隔离器或衰减器接到检波器, 检波器得到的信号再接到 X-Y 记录仪 (见图 4), 就能记下传播信号。

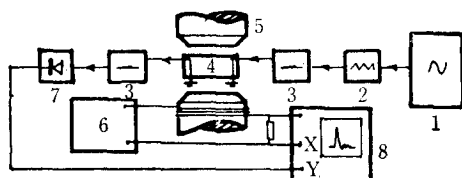


图4 实验装置图

- 1 为微波信号源; 2 为衰减器;
3 为隔离器; 4 为细丝耦合器和样品;
5 为电磁铁; 6 为扫描片;
7 为检波器; 8 为 X-Y 记录仪

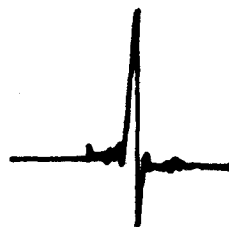


图5 记录到的典型曲线

实验上, 我们用类似于铁磁共振的办法, 固定微波频率, 输出连续微波功率, 扫描磁场, 得到一个与铁磁共振吸收曲线相反的曲线, 即传播的微波信号随磁场变化而有一极值, 这便是激发磁波的结果。磁场大小的信号送入 X-Y 记录仪的 X 轴, 检波信号送入 Y 轴, 得到图 5 所示的典型记录曲线。迄今我们采用了两种片状样品, 一种是矩形的, 一种是圆形的。后者多用于各向异性测量。因为容易转动样品使不同晶轴依次取磁场方向。还测量过外延膜样品。所用样品除应知道其结晶取向, 表面要仔细抛光。

四、实验结果及分析

如前所述,(2)式表明在面内磁化的样品中激发完全与磁场方向垂直的静磁波时,体静磁波的色散关系与一致进动频率相同.确切的说体静磁波频率与激发波矢无关.这为实验提供了方便,即可用任何直径的细丝耦合器激发体磁波,而得到的结果应该相同.详细的一致进动频率-磁场关系为

$$\left| \frac{\omega}{\gamma} \right|^2 = [H + H_{ax} + (N_x - N_z)4\pi M_s][H + H_{ay} + (N_y - N_z)4\pi M_s] \quad (8)$$

其中 N_x, N_y, N_z 是沿三个主轴方向的退磁因子; H_{ax}, H_{ay} 为 x, y 方向的磁晶各向异性场.若是片状样品不计各向异性、外磁场在面内沿 z 方向,上式可简化为

$$\left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 = H(H + 4\pi M_s) \quad (9)$$

当微波频率(相应共振场)较高, $H \gg H_{ax} (H_{ay})$ 时,按(9)式,从测到的体静磁波频率-磁场关系可以求出材料的 $4\pi M_s$ 和 r ,从而推出 g 因子.

利用高微波频率下求得的 $4\pi M_s$ 和 r 值,用到低微波频率,各向异性场有明显影响的区域,可以求出材料的 $\frac{2k_1}{M_s}$,即通常说的各向异性场.

还有另一个方法求材料的磁性参数.那就是测量 $\langle 110 \rangle$ 面内的各向异性共振场.假定取 $\langle 001 \rangle, \langle 110 \rangle, \langle 111 \rangle$ 三个方向,仍然固定频率,则由三个方向下相应的三个共振场-频率关系可以得到三个方程,按此三个方程就能同时定出 $4\pi M_s, \frac{k_1}{M_s}$ 和 r (g 因子)来.但这一方法定的 $4\pi M_s$ 的精度可能差些.

图6是测量的静磁波频率与外加磁场关系曲线.按体静磁波关系拟合该曲线得到表

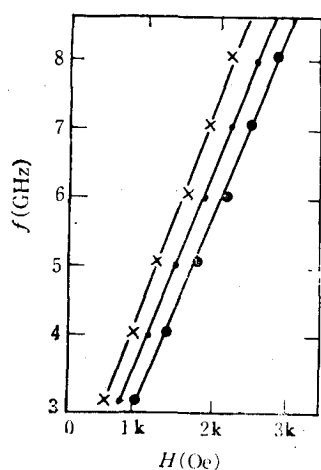


图6 测量到的频率与磁场的关系
×为外延 YIG 膜 ●为片状 YIG
○为片状 In BCYIG

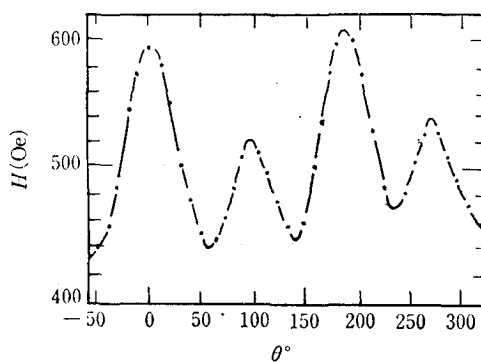


图7 YIG样品 $\langle 110 \rangle$ 面内, y 向激发时
4.6GHz 下的外场与结晶取向变化.
(纵轴仅为扫描变化值)

1 的 $4\pi M_s$ 和 g 因子。合理的拟合以及拟合导出磁性参数与文献值的一致,说明我们测到的是体静磁波,而不是表面静磁波。

图 7 是转 $\langle 110 \rangle$ 面取向的纯 YIG 样品时得到的各向异性“共振场”。按该曲线我们求得材料的各向异性也列入表 1。

从表 1 的结果明显看出,用激发和检测静磁波法测量磁性参数是可靠的,精度大体与铁磁共振法相同。因为都是由频率和磁场的测量精度决定的,而所用公式也相同。

表 1 磁波法测到的 YIG 样品参数

	$4\pi M_s(\text{G})$	g 因子	$k_1/M_s(\text{Oe}, \text{室温})$
本方法	1740 ± 20	2.0 ± 0.1	-43.5 ± 2
文献值 ^[2]	1740	2.0	-43

五、讨 论

从上面的分析和实验说明:(1)用激发静磁波测量磁性参数是可靠的,可以测量材料的饱和磁化强度,各向异性场和旋磁比,测量精度与传统的铁磁共振法相近。(2)静磁波法测量中,样品不被置于谐振腔内,样品表面可暴露在外面,因此易于在做一些处理的同时进行参数测量。(3)样品应做成片状,太厚的样品因退磁场计算不准会引起测量的误差,这是一个限制。但同时它更适于薄膜样品,如石榴石外延膜。

静磁波法测量材料的磁性还刚刚开始,实际上还有相当多的方面应进一步研究。例如表面静磁波的测量在我们的讨论中完全没有提到,原因是表面静磁波要求样品表面抛光良好,否则传播损耗太大,检测就非常困难了。而若能测到表面波,按图 2,我们知道在一定波矢范围内表面波的频率与波矢有关,据此实验上测到频率可以知道相应静磁波波矢,这是很重要的,因为迄今表面静磁波这一段还没有被实验研究过。第二个值得深入的问题是体磁波的传播衰减,激发器的效率。这些决定着输入、输出信号的强度,这对于器件应用无疑是非常重要的。测量中应能提取的一个信息是与铁磁共振线宽相应的“磁波线宽”,而波形的宽度,由于在我们的条件下磁波与一致进动是简并的,而且激发波矢及分布未知,是否该线宽就与材料的进动损耗有关尚不能肯定。但有一点是清楚的,铁磁共振线宽大的样品该线宽也大,说明彼此是有一定联系的。第三个有趣的问题是介质接近样品表面对色散关系的影响,我们试用金属接近样品,发现频率-磁场关系受到强烈影响,这一方面的工作我们准备进一步做下去,这些信息可能对色散延迟线的设计提供帮助。最后应指出我们用目前的系统可以方便地测量厚度大于 $1\mu\text{m}$ 的 YIG 外延膜,经改进系统引入锁相放大技术可以大大提高灵敏度。因此或许能方便、广泛地应用于表面磁性的研究。

作者感谢本文准备及实验中与赖武彦、庞玉璋同志的帮助和有益讨论。

参 考 文 献

- [1] R. W. Damon and J. R. Eshbach, *J. Phys. Chem. Solids*, **19** (1961), 308.
- [2] L. K. Brandle and N. J. Freeman, *Electron. Lett.*, **4**(1968), 132.
- [3] B. A. Auld, J. H. Collins and D. C. Webb, *J. Appl. Phys.*, **39** (1968), 1598.
- [4] J. H. Collins and F. A. Pizzarello, *Int. J. Electron.*, **34** (1973), 319.
- [5] J. P. Castera, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-14** (1978), 319.
- [6] 赖武彦、王鼎盛、蒲富恪, *物理学报*, **26** (1977), 285.
- [7] P. H. Chang, A. P. Malozemoff, M. Grimsditch, W. Senn and G. Winterling, *Solid State Comm.*, **27** (1978), 617.

STUDY MAGNETISM BY MAGNETOSTATIC WAVES

ZHANG PENG-XIANG CAO KE-DING

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

We constructed a device to excite and detect magnetostatic modes in slab ferrite samples for frequency range of 2—8GHz. Using this device, we set up a system to measure relation between frequency and applied magnetic field for magnetostatic waves. This system can be used to study not only the magnetostatic waves, but also the basic properties of ferrites. It is similar to FMR. However, the samples need not to be put into a microwave cavity, thus the system allows one to make measurements during some sample treatment.