

研究简报

自旋波线宽的测量

韩世莹

(南京大学物理系)

1980年6月9日收到

提 要

本文描述了磁有序材料在垂直激励和平行激励下产生第一阶非稳定性微波阈值磁场的测试装置及有关测试技术。在平行激励下通过阈值场的测量可以获得自旋波线宽。同时给出了在室温、X波段条件下对 YIG 单晶小球进行自旋波线宽测量的结果,与同类测量进行比较,两者相当一致。

一、引 言

自旋波是磁有序材料中自旋集体运动的一种模式,它具有波动的一切特性。自旋波的激发过程也即是能量转换的过程。在利用磁有序材料中自旋波构成的微波固体器件中,人们希望将电磁波的能量有效地转换成自旋波,以便发挥自旋波的作用。而在微波铁氧体电磁器件中,由于工作方式和微波功率电平的原因,往往会激发起自旋波而损害了微波器件的电磁性能,这种场合自旋波的产生却成了不利因素,因此人们又要求有效地抑制它。磁有序材料中自旋波的激发和增长是与自旋波的衰减常数 η_k 有关,而 $\eta_k = \frac{\gamma \Delta H_k}{2}$, γ 为旋磁比, ΔH_k 叫做波数为 k 的自旋波的线宽。

从事微波器件研究所面临的问题之一是如何按照人们的意愿去激发或者抑制自旋波,而自旋波线宽的大小在一定程度上为实现这种意愿提供了资料。实践和理论业已证明,构成自旋波器件必须使用低 ΔH_k 的材料,而高功率微波电磁器件又必须使用适当的 ΔH_k 材料。

ΔH_k 又表征了自旋波的弛豫率,非稳定性引入了相干自旋波与热自旋波之间的磁相互作用^[1],同时又引入了自旋波与声波的磁弹性相互作用^[2],测量 ΔH_k 为研究磁有序材料的本征弛豫和固体的力学性质提供了重要手段。

本文介绍的测量装置原则上既可测量单晶,也可测量多晶铁氧体的自旋波线宽。实践证明,材料的 ΔH_k 愈大,观察非稳定性出现导致的脉冲畸变愈不灵敏,且又因样品腔的输入功率容量所限,使得 ΔH_k 的测量存在上限。测量装置的灵敏度决定了测量 ΔH_k 的下限。

二、测量原理

1. 第一阶非稳定性的观察和阈值场的测量

将球形样品支撑在谐振腔中微波磁场为最大值的均匀的区域,外加稳恒磁场 H_e 偏置在铁磁共振场以下但足以使样品饱和磁化的范围,使用脉冲微波磁场并且在欠耦合而又趋于临界耦合的情况下激励带有样品的谐振腔,随着微波磁场的增加,观察腔的输出脉冲波形的变化. 首先在脉冲的后沿看到高功率吸收,当微波磁场增加到阈值磁场以上时,在脉冲的更宽范围看到这种吸收,以致在脉冲的前沿出现光峰. 这是由于非稳定自旋波的振幅从它们的热电平生长到大的振幅是需要一定的时间,确定脉冲形状首先发生变化所相应的阈值功率 P_{ic} , 由下式可以确定阈值磁场^[3]:

$$h_c = 4 \left\{ \frac{P_{ic} Q_l}{(1 + \rho) \mu_0 \pi f_0 a b c \left[1 + \left(\frac{c}{na} \right)^2 \right]} \right\}^{1/2} \quad (\text{M. K. S. A 制})^{[3]}, \quad (1)$$

式中 P_{ic} 是入射到谐振腔的阈值功率, ρ 是谐振腔的输入电压驻波比, Q_l 是谐振腔的有载品质因素, a, b, c 分别是谐振腔的长、宽、高, f_0 是谐振腔的谐振频率, μ_0 是自由空间的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$, n 是腔长的半波数. 由此可见, 阈值场的测定归结为阈值功率 P_{ic} 和谐振腔的特性 Q_l 与 ρ 的测量.

改变偏场 H_e , 可以测出 h_c 与 H_e 的关系, 它反映了自旋波线宽 ΔH_k 与波数 k 的关系.

2. 自旋波线宽 ΔH_k 的确定

Schlömann^[4] 给出了平行激励方式下阈值磁场 h_c 与自旋波线宽 ΔH_k 的关系为

$$h_c = \frac{\omega}{\gamma 4\pi M} \min \left[\frac{\Delta H_k}{\sin^2 \theta_k} \right] \quad (2)$$

及辅助条件

$$\omega_k = \omega/2. \quad (3)$$

(2) 式中 $4\pi M$ 为材料的饱和磁化强度, θ_k 为自旋波的传播方向与外加稳恒场之间的夹角. 显然这种方式最易激发自旋波的传播方向处于与 H_e 相垂直的平面内, 即 $\theta_k = \pi/2$. 因此

$$h_c = \frac{\omega}{\gamma 4\pi M} \Delta H_k \quad \text{或} \quad \Delta H_k = \frac{\gamma 4\pi M}{\omega} h_c. \quad (4)$$

由(4)式可以确定自旋波线宽.

根据各向同性介质的自旋波谱公式^[5]

$$\omega_k = \gamma [(H_i + Dk^2)(H_i + Dk^2 + 4\pi M \sin^2 \theta_k)]^{1/2}, \quad (5)$$

式中 D 是唯象的交换常数. 对于立方晶系单晶旋转椭球, 且外加稳恒磁场加在单晶体的

1) 为尊重引文中公式的原始形式, (1) 式采用 M. K. S. A 制, 其他公式均为高斯制. 因此由 (1) 式测得的 h_c 值(以 A/m 为单位)必须换算为高斯制单位(以 Oe 为单位)才能与 (2) 式进行量值上的比较.

[100] 及 [111] 方向, 则 (5) 式中的内场 H_i 与外场 H_e 的关系应修正为

$$H_i = H_e + H_m + H_d, \quad (6)$$

式中 H_m 为各向异性等效场, H_d 为样品沿稳恒磁场方向的退磁场. 考虑到 $\omega_k = \omega/2$ 及 $\theta_k = \pi/2$, 则由 (5) 式可得到平行激励时自旋波的内稳恒场 H_i 与波数 k 的关系为

$$H_i^c - H_i = Dk^2, \quad (7)$$

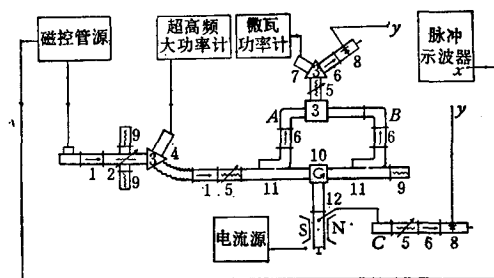
而

$$H_i^c = -2\pi M + \left[(2\pi M)^2 + \left(\frac{\omega}{2\gamma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

由 (7) 式可知, 当 $H_i > H_i^c$ 时, k 变为虚数, 这意味着传播在 $\theta_k = \pi/2$ 方向的自旋波已不能满足辅助条件 (3) 式, 这时, 满足辅助条件 (3) 式的自旋波必然不满足 $\theta_k = \pi/2$, 因此根据 (2) 式, 在 $H_i > H_i^c$ 的稳恒磁场范围, 阈值磁场 h_c 随稳恒场 H_i 的增加而增大. 在 $H_i < H_i^c$ 的磁场范围, k 随 H_i 减小而增大. 实验表明, ΔH_k 随 k 增加而增大^[4,6], 因而 h_c 随 k 增加 (即随 H_i 减小) 而增大. 在 $H_i = H_i^c$ 时, $k \rightarrow 0$, h_c 有一最小值, 因而自旋波线宽 $\Delta H_{k \rightarrow 0}$ 最小, 这个线宽近似地等于一致进动的本征线宽. H_i^c 称为特徵磁场, h_c 与 H_i (或 H_e) 的关系称为蝶形曲线^[7].

三、测量装置和测试方法

测量方框图示于图 1. 有关各部件的功能和参数分述如下.



- | | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 1——高功率隔离器; | 2——功分器; | 3——转换开关; |
| 4——大功率计探头; | 5——精密可变衰减器; | 6——场移式隔离器; |
| 7——小功率计探头; | 8——检波器; | 9——大功率负载; |
| 10——高功率环行器; | 11——方向耦合器; | 12——样品和谐振腔; |

图 1 测试装置方框图

磁控管源的工作状态参数是: 频率 $f = 9340$ MHz, 调制脉冲宽度 $\tau = 1.25$ μ s, 调制周期 $T = 2.0$ ms (相当 500 Hz), 负载循环 $d \approx 6 \times 10^{-4}$, 平均功率约 30 W, 峰值功率 50 kW.

波导系统由主通道, 入射分通道 A 和反射分通道 B 组成. 功分器由微波平衡电桥构成, 其功能是根据测量需要首先将磁控管源的输出功率进行固定分配, 功分器的输出功率又可在 25 dB 范围内连续可变, 将它与小功率精密衰减器串联使用, 可使入射到腔体的功率在 50 dB 范围内连续可调. 腔体为 TE_{102} 型反射式谐振腔, $Q_i > 1500$, 耦合孔径 $\phi =$

6.3 mm, 腔的宽面开一小孔, 从中可萃取信号。

测试样品为直径在 1.5—1.8 mm 之间的小球, 本文所提供的测试结果是对直径为 1.7 mm 的 YIG 单晶小球进行测量的, 小球支撑在聚四氟乙烯杆上, 可在磁场中自由取向。

外加稳恒磁场由电磁铁提供, 用核磁共振测定磁场。

非稳定性的观察可由反射通道 B 或从腔中萃取信号经 C 通道接脉冲示波器进行观察。入射到腔体的功率由转换开关转换到超高频大功率计测定, 也可由入射分通道 B 用微瓦功率计测出。谐振腔的 Q_i 由频谱分析仪测定。电压驻波比 ρ 由测定入射功率和反射功率而算出, 也可在小功率系统上模拟高功率状态直接用测量线测定。

四、测量结果和讨论

在同一系统中安装谐振腔的宽面与外加稳恒磁场垂直或平行, 可分别进行垂直激励与平行激励方式的测量。图 2 表明调试好了的测试系统各通道显示的微波脉冲信号, 图 2 中 1 是入射到腔体的信号; 2 是谐振腔工作在谐振状态的反射信号; 3 是从腔中萃取的信号, 用以代替腔的传输脉冲信号。两种工作方式观察第一阶非稳定性出现的脉冲波形随样品腔中微波激发磁场强度变化的过程极为相似。图 3 表示了偏场固定时在不同功率



图 2 波导系统各通道信号显示



图 3 在不同功率下萃取信号的示波器图形 数字(以 dB 为单位)指输入功率级

下萃取信号的示波器图形。左起第 2 幅照片可以识别出非稳定性出现的起始点, 由此可测定阈值功率 P_{ic} , 当 $P_i > P_{ic}$ 时, 脉冲的更宽范围发生变化, 且在脉冲前沿出现光峰, 如图 3 中左起第 2 幅照片之后的各幅照片。

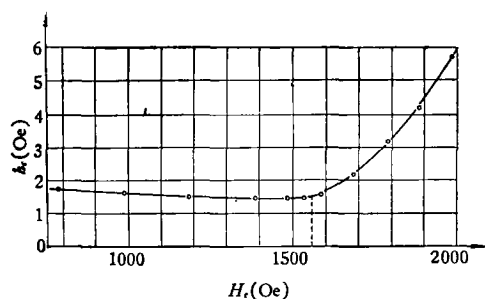


图 4

图 4 是平行激励方式下自旋波非稳定性的阈值场与外加稳恒磁场的关系, 即所谓蝶形曲线。图 4 中最小 h_e 所对应的外特征场 $H_e^* \approx 1560$ Oe, 自旋波线宽 $\Delta H_{h \rightarrow 0} = 0.68$ Oe。

由以上观察和测量结果与同类工作进行比较, 讨论如下:

1. 对固定频率的微波功率源必须使用可调谐谐振腔, 所见同类工作都是使用不可调

传输型腔(微波功率源频率可调),便于观察传输脉冲随功率的变化,以确定第一阶非稳定性出现的起始点。本文从可调谐反射式谐振腔中萃取信号所得图3与传输信号的图象是一致的^[4,8],而且萃取信号的耦合孔比传输腔的输出耦合孔小得多,保证了腔具有足够高的 Q 值。

2. 蝶形曲线的变化趋向与理论分析和前人的实验结果^[4]都是定性地一致。室温条件下 YIG 的 $4\pi M = 1780 \text{ Oe}$, $H_{a[111]} = 50 \text{ Oe}^{[9]}$ $H_d = -\frac{1}{3} \cdot 4\pi M = -594 \text{ Oe}$, 由(7)式可算出理论上的 $H_c^* \simeq 1550 \text{ Oe}$, 与实验值符合得很好。

3. 由测得的 h_c 导出 YIG 中垂直于稳恒磁场方向的长波长自旋波线宽 $\Delta H_{k \rightarrow 0} \simeq 0.68 \text{ Oe}$, 比文献[4]给出的结果偏高一倍左右。其可能的原因是: 两者的测试条件有所不同, 尤其是本文使用的脉冲宽度偏窄, 用以测量小 ΔH_k 的材料会导致其测量值偏高; 功率测量上可能有系统误差; 不同质量的 YIG 单晶可以具有不同的 ΔH_k 。

对王源波、杨冲琪同学参加了部份工作表示感谢。金通政同志协助用核磁共振测量磁场, 胡洪铨同志经常关心磁控管源的技术问题, 白红絮同志建议用平衡电桥构成分器, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] J. J. Green, E. Schlömann, *J. Appl. Phys. Supp.*, **32**(1961), 168S.
- [2] E. H. Turner, *Phys. Rev. Lett.*, **5**(1960), 100.
- [3] 国际电工委员会(IEC)第51委员会 1978 年发出的文件“旋磁材料性质的测量方法”。
- [4] E. Schlömann *et al.*, *J. Appl. Phys. Supp.*, **31**(1960), 386S.
- [5] H. Suhl, *J. Phys. Chem. Solids*, **1**(1957), 209.
- [6] E. G. Spencer and R. C. LeCraw, *Proc. IEE. Part B, Supp.*, **109**(1962), 66.
- [7] U. Milano, E. Schlömann, *Proc. IEE. Supp.*, **109**(1962), 59.
- [8] J. F., Ollom, W. H. Von Aulock, *IEEE. Trans. Instr.*, 1—9, (1960), 187.
- [9] J. R. Sandercock and W. Wetling, *Solid Stat. Commun.*, **13**(1973), 1729.

MEASUREMENT OF SPIN WAVE LINEWIDTH

HAN SHI-YING

(Department of Physics, Nanjing University)

ABSTRACT

In this paper, we describe the instrumentation and technique which are suitable for measuring first-Order instability threshold values of microwave field for both configurations of perpendicular and parallel pumping in magnetic order materials. The spin wave linewidth is derived from instability threshold values for parallel pumping. Experimental results are given for a sphere of yttrium iron garnet at room temperature and x -band. These results are in good agreement with those obtained by other researchers.