

磁性薄膜自旋波共振谱的研究

钱昆明¹⁾ 戴道生 方瑞宜 林肇华

(北京大学物理系)

1982年10月20日收到

提 要

在 Fe-Ni 多晶薄膜和 YIG 单晶薄膜上观测到线性自旋波共振谱。发现薄膜的自旋波谱中奇偶次模一般都是同时被激发的, 它们的强度分别按不同的包络线变化。进一步的研究表明, 这些奇偶次模的位置和相对强度明显地随膜的制备过程和热处理而变化。所有这些实验研究的结果都可以利用表面-体不均匀 (S-VI) 模型和非对称体不均匀 (AVI) 模型很好地解释。本文同时还给出了自旋波共振谱的测量装置及有关的测量方法。

一、引 言

自从 1958 年在磁性薄膜中首次观察到自旋波共振谱^[1]以来, 薄膜的自旋波共振研究引起了广泛的兴趣。人们竞相用不同的材料进行实验, 不断改进实验的方法, 对所得结果进行理论探讨。自旋波共振已成为研究磁性材料的内禀性质以及薄膜表面特性的一种有效手段。

铁镍薄膜的自旋波共振是研究得最多也是最早的^[2-6], 但至今仍有一些问题未能很好地理解。七十年代以来, 人们相继对 YIG 单晶薄膜^[7-9]和非晶态薄膜^[10-13]的自旋波共振也进行了研究。作者对自己制备的铁镍薄膜进行了自旋波共振谱的观察, 研究了不同基片、不同制备过程和热处理对共振谱的影响。并对液相外延掺 La 和 Sm 的 YIG 单晶薄膜进行了共振谱的观察。测得的共振谱低次模均呈现线性律变化, 并且偶奇次模同时被激发, 其强度分别按不同的包络线而变化。随着工艺的不同, 吸收峰的位置和两条包络线的相对幅度发生相应的变化。类似的结果在其它文献中也有所报道^[3,6,8]。我们的讨论表明, 这些结果都可以用表面-体不均匀 (S-VI) 模型或非对称体不均匀 (AVI) 模型^[14]解释, 理论和实验符合得相当好。

二、测 量 装 置

本质上讲, 自旋波共振是铁磁共振的一种。但它又具有自己的特点, 因而对测量设备也提出了不同的要求。自旋波共振是一种多重激发, 吸收峰所给出的信号强度随模数增

1) 现在工作单位: 清华大学物理系。

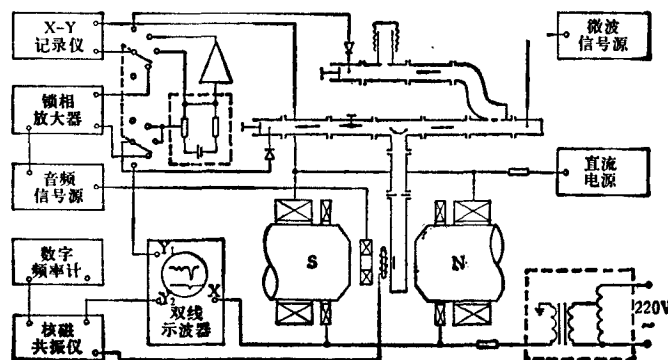


图1 自旋波共振测试系统原理图

加衰减很快,因此要求测量设备具有高的灵敏度,由于采用薄膜样品,当外静磁场垂直膜面时将产生很大的退磁场,这就要求直流磁场要足够强和较大的均匀区;为了得到更多的信息,还应使样品能相对直流磁场作任意角度的转动。

按照上述要求,我们采用了图1所示的测试系统。它包括如下几个主要部分:

1. 微波系统: 采用反射式微波谐振电路,谐振腔尺寸为 $18 \times 10 \times 120 \text{ mm}$ 。样品置于谐振腔窄边壁上微波磁场的波腹处。耦合孔的选择应使腔体 Q 值适中,太高将导致基线平移,太低又影响测试灵敏度。微波频率由谐振式波长计给出。本实验采用的频率为 8.7 GHz 。

2. 磁场及其测量系统: 电磁铁为Y型结构,极头直径为 180 mm ,当间距为 25 mm 时磁场强度可达 1.5 T ,磁场均匀度高于 $10^{-5} / \text{cm}^2$ 。为提高磁场稳定性和降低噪音,线圈的主绕组由碱蓄电池组供电。工频调制线圈直接用市电供给。磁场强度用核磁共振仪测量。为了测量共振谱与角度的关系,磁场可以绕垂直轴转动。

3. 信号检测系统: 根据不同的需要,可以有三种不同的检测方式: 将检波后的信号经直流补偿后直接(或通过直流放大)送入X-Y记录仪绘出共振吸收谱;或经锁相放大器放大后送入X-Y记录仪得到谱线的微分曲线;或利用双迹示波器同时观察自旋波共振谱和核磁共振峰。最后一种方式可以准确测定共振吸收峰的磁场大小,这对窄线宽的情况尤为必要。

三、样 品

我们选用了两类样品。第一类样品为FeNi薄膜。将1J79玻莫合金薄带缠绕在钨丝环上,通电加热钨丝将合金蒸镀在基片上得到。真空度为 $1 \times 10^{-5} \text{ Torr}$,基片温度 $250-300^\circ \text{C}$ 。根据不同的实验目的,在上述基本工艺的基础上附加其它工艺措施,可以得到各种特点的薄膜样品。从样品的角度,我们做了如下的实验研究:

1. 采用上述基本工艺重复制备了若干批FeNi薄膜,得到上百个样品,结果表明工艺和测试的重复性是良好的;

2. 为在同一次蒸镀中获得成分相近而厚度不同的样品,采用翻板遮盖的办法。蒸镀

前先将翻板盖住一部分基片,在蒸镀一段时间后打开翻板,这种方法简称为“掀法”;另一种方法称为“盖法”,是在蒸镀了一段时间后将翻板放下遮盖住部分样品。这两种方法得到的自旋波共振谱有所不同,表明不同的制备过程引起了不同的体不均匀性。

3. 外加一个蒸镀源,将纯镍丝绕在这个钨丝环上。在蒸镀过程中同时加热两个钨丝环,通过控制加热电流来改变蒸镀薄膜的成分或体不均匀性,观测相应共振谱的变化。

4. 通过改变基片和对样品进行热处理的方法,观察表面状况对共振谱的影响。

薄膜的厚度用探针式测厚仪测定,成分用俄歇谱仪分析。如不加说明,所有样品的基片均采用玻璃盖玻片。

第二类样品为掺 La 和 Sm 的 YIG 单晶薄膜,是用液相外延法在单晶 GGG 基片上得到的,其成分为 $Y_{3-x-y-z}La_xSm_zGe_xCa_xFe_{(5-x)}O_{12}$ 。样品是由华中工学院提供的。

表 1 给出了所用典型样品的工艺特点。

表 1

样品编号	基片材料	薄膜材料	制备工艺
1 [#] (a)	玻 璃	FeNi	蒸 镀
1 [#] (b)	玻 璃	FeNi	1 [#] (a) 掀法减薄
2 [#] (a)	玻 璃	FeNi	蒸 镀
2 [#] (b)	玻 璃	FeNi	2 [#] (a) 盖法减薄
2 [#] (c)	玻 璃	FeNi	2 [#] (a) 退火处理
3 [#] (a)	玻 璃	FeNi	蒸 镀
3 [#] (b)	单 晶 硅	FeNi	同 3 [#] (a)
3 [#] (c)	微晶玻璃	FeNi	同 3 [#] (a)
4 [#]	玻 璃	FeNi	双蒸发源蒸镀
5 [#]	GGG	掺 La, Sm 的 YIG	液相外延

四、结果与讨论

1. 图 2 给出了两条典型 FeNi 薄膜样品的自旋波共振谱。谱线显示了如下特点:

1) 低次模呈现线性律,吸收峰的位置与模数 n 成正比,相对强度大致按 n^{-1} 规律减小;高次模则趋于平方律,吸收峰间距随模数增加而增大,其强度则按 n^{-2} 规律迅速衰减。

2) 偶次模和奇次模的幅度分别显示各自的包络线,两条包络线的相对强度随样品而异。

类似特点的自旋波共振谱在其它文献中也有过报道,它们显示出薄膜内部存在着接近抛物线型的体不均匀性。图 2(a) 中奇次模较强,显示体不均匀是高度不对称的,按照文献 [14],应当用 S-VI 模型加以描述;图 2(b) 则显示了接近对称的体不均匀,可以用 AVI 模型解释。

2. 分别采用“掀法”和“盖法”制得了两组成分相同但厚度不同的样品。

1) 1[#](a) 和 1[#](b) 为掀法得到的两个不同厚度的样品,它们的厚度分别约为 2800 Å

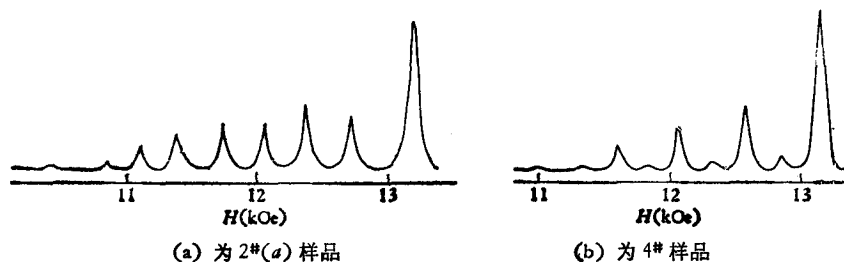


图 2 典型的线性共振谱

和 $1700\text{\AA}$ 。图 3 中的实线给出了实测谱线的位置和相对强度，虚线则为根据 S-VI 模型计算的结果。由图 3 可见，在 n 较小时两者符合得较好。图 4 描述了两个样品吸收峰位置与模数的关系。低次模遵循线性律，且随膜厚增加线性区增大。这一结果是同 Rossing 的结果^[15]相一致的。

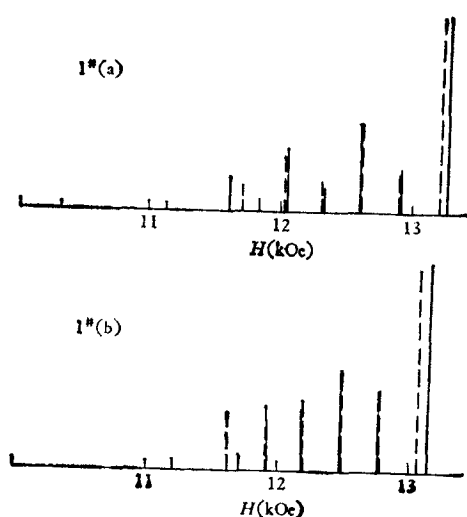


图 3 剥法得到不同厚度样品的共振谱

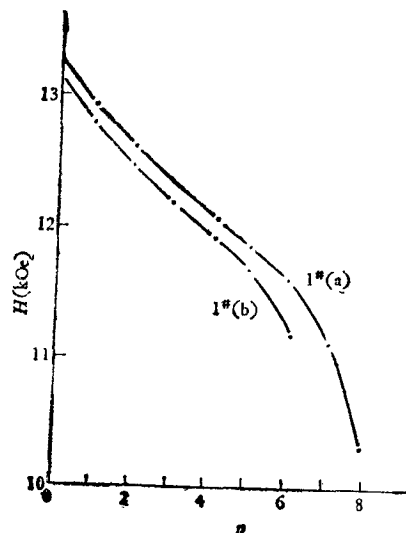


图 4

两个共振谱相邻峰间距大致相等，表明两个样品具有相同的体不均匀参数 β 。图 5 所显示的剥法工艺特点很好地说明了这一点。

测试频率为 8700MHz 。按照 S-VI 模型^[14]，对 $1\#(a)$ 样品的实测结果，取峰间距 $\delta H = H_1 - H_2 = 290\text{Oe}$ ， $n = 2$ 的吸收峰位置 $H_2 = 12.60\text{kOe}$ 。由峰的相对强度可以得到 $Q \approx 0$ 。

再将 $\sqrt{\Lambda\beta} = \delta H / 8 \sqrt{\pi} M_0$ 代入

$$H_2 = \frac{\omega}{\gamma} + 4\pi M_0 + 2\beta\Lambda M_0 - 2(4n+3)M_0\sqrt{\pi\Lambda\beta}$$

中得到 $M_0 = 819\text{Oe}$ ，这与用其它方法得到的结果相符合。若令交换常数 $A = 1.0 \times 10^{-6}\text{erg/cm}$ ，计算可得 $\Lambda = 2A/M_0^2$

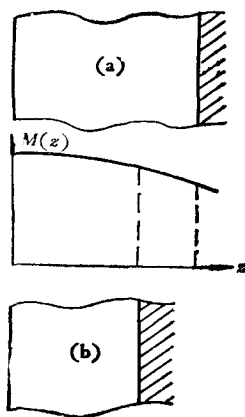


图 5

$= 3.0 \times 10^{-12} \text{cm}^2$ 和 $\beta = 2.1 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$.

利用所得到的 A , β , M_0 值, 并取 $Q = 1$, 可以得到样品 $1^\#(b)$ 的 $H_2 = 12.48 \text{kOe}$, 相应的实测值为 12.47kOe .

2) 图 6 给出用盖法得到的两个不同厚度样品 $2^\#(a)$ 和 $2^\#(b)$ 的共振谱, 图 7 为相应吸收峰位置与模数 n 的关系曲线. 与掀法得到的结果不同的是, 较薄的样品 $2^\#(b)$ 相邻吸收峰间距明显地比 $2^\#(a)$ 样品来得大. 比较图 5 和图 8, 这一点是不难理解的.

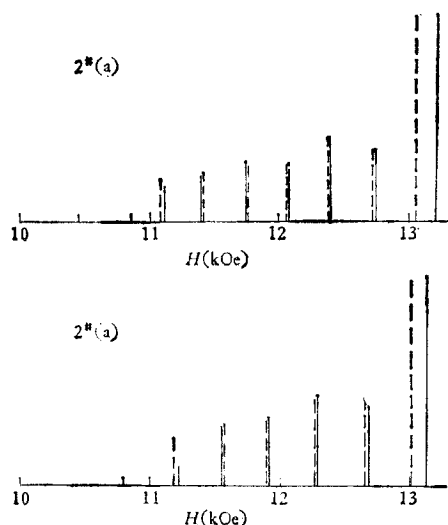


图 6

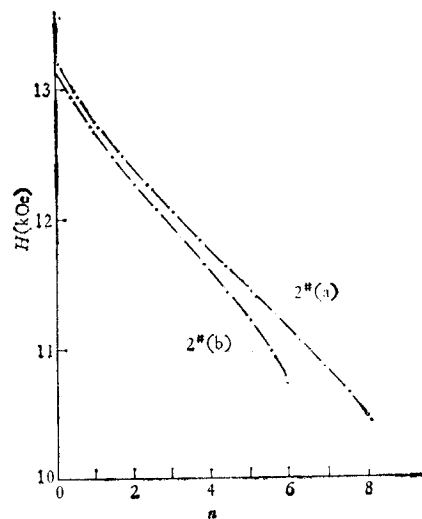


图 7

图 6 中的实线和虚线分别为实验和理论计算的结果, 两者显示了较好的一致.

3. 图 9 给出样品 $2^\#(a)$ 退火前后自旋波共振谱的比较. 退火时样品被封装在玻璃管中, 真空度为 $1 \times 10^{-5} \text{Torr}$, 在 500°C 下保温半小时.

退火引起的变化, 用上述 S-VI 模型可以得到很好的解释:

- 1) 退火使材料的 M_s 下降, 表现为相应共振吸收峰向低场方向作整体移动;
- 2) 线性区明显减小, 在线性区的 δH 也有所下降, 这表明退火后样品体不均匀性有

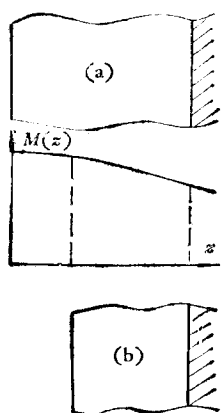


图 8 盖法工艺特点

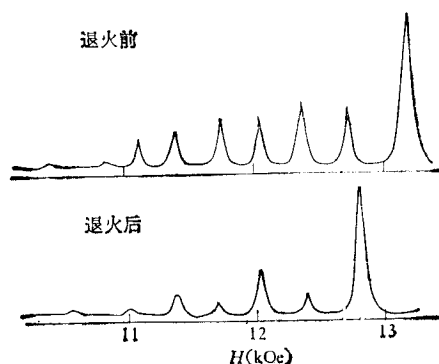


图 9

所改善;

3) 奇次激发明显地减弱, 可以设想为由于样品自由表面被氧化, 造成 $|Q|$ 值下降所致。

4. 在玻璃盖玻片、单晶硅片和微晶玻璃三种不同基片上同时蒸镀了 FeNi 薄膜。图 10 给出相应的测试结果。三条谱线显示的谱型十分接近, 表明不同基片对低次模影响不大。按照 S-VI 模型, 这意味着体不均匀的极值应处于自由面附近。

相比之下, 微晶玻璃为基片的共振谱, 吸收峰强度要弱得多, 线宽也明显加宽。扫描电子显微镜的观察表明, 微晶玻璃的表面过于不平整。此外, 硅单晶为基片的共振谱显示了较大的峰间距, 并且有向低场偏移的趋势, 我们认为这是由于有较多的硅向膜内扩散所造成的。

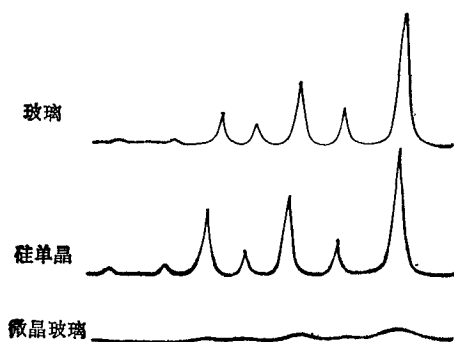


图 10 不同基片共振谱

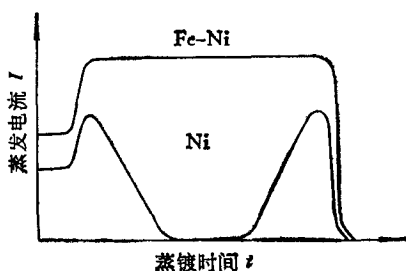


图 11 4# 样品的制备工艺

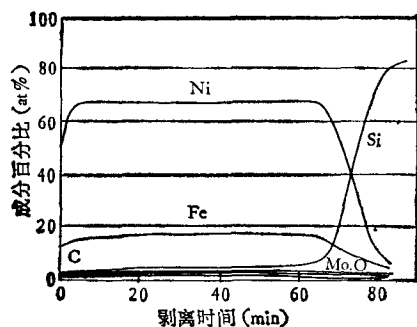


图 12 4# 样品成分随深度的变化

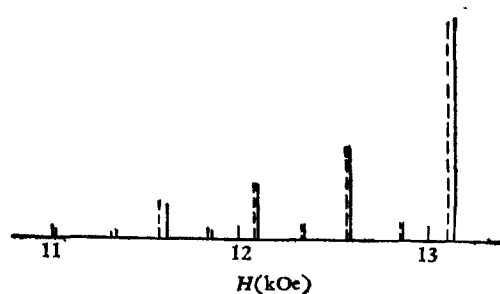


图 13 4# 样品实测结果与 AVI 模型计算的比较

5. 在前面的例子里, 奇次模均有较强的激发, 是属于极值在一个表面附近的体不均匀情况。为了获得极值在膜内部的体不均匀, 我们采用了两组蒸发源的办法。按照图 11 所示的工艺过程, 制备了 4# 样品。图 12 为俄歇谱仪测得的成份随膜深度的变化关系, FeNi 含量的比值在样品中间确实呈现出极大值。该样品的自旋波共振谱由图 2(b) 给出, 显然, 奇次模的强度要弱多了, 这一实验事实是与对称体不均匀 (AVI) 模型相一致的。取 $H_2 = 12.68 \text{ kOe}$, 峰间距为 250 Oe , 交换作用常数为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ 。根据 AVI 模型可以求得 $M_0 = 804 \text{ Gs}$, $\Lambda = 3.1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$, $\beta_1 = 0.58 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, $\beta_2 = 9.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}$ 。图 13 中的实线和虚线分别为实测和理论计算的结果。

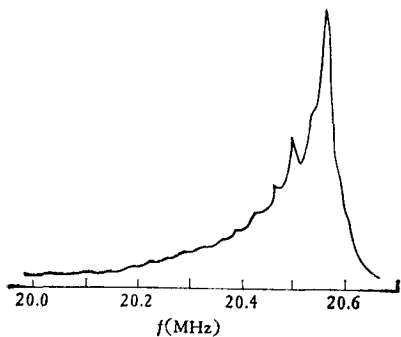


图 14 YIG 单晶的共振谱

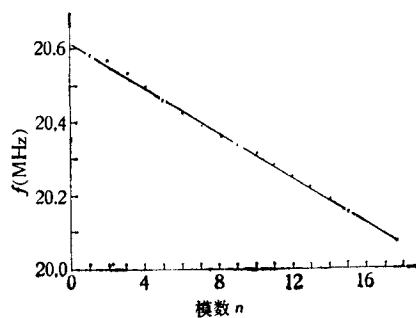


图 15 YIG 单晶的吸收峰与模数的关系

6. 在 YIG 单晶薄膜上同样观察到了非常明显的线性律共振谱 (图 14 和图 15)。由于薄膜厚达 $2-3\mu m$, 线性区包括了约 15 个共振吸收峰。它反映了膜内存在明显的体不均匀性。图中的磁场强度用核磁共振的频率值表示。两者具有如下关系:

$$H = 0.23487f(\text{kOe/MHz}).$$

五、结 论

1. 实验结果表明, 我们建立的自旋波共振测量装置, 其测试精度和可靠性是令人满意的, 样品薄膜制备工艺重复性良好。

2. 在不同的样品上观察到偶奇次模被同时激发的线性自旋波共振谱, 偶奇次模分别有各自的包络线。其谱线位置和相对强度随工艺不同而变化, 这些特点可以用文献[14]提出的两个模型加以很好地解释, 理论计算与实验结果符合得比较好, 这表明 S-VI 模型和 AVI 模型能够较好地反映体不均匀薄膜中自旋波共振激发现象。

3. 分析和讨论表明, 自旋波共振方法不仅可以测定材料的交换作用、磁化强度等内禀磁参量, 而且能够有效地进行样品表面特性和体不均匀性的研究。

北京大学廖绍彬、朱生传、虞丽生和清华大学路东文等同志对测试设备的建立给予了热情的帮助, 华中工学院温伟光和中国科学院物理研究所郑德娟等同志提供了部分样品和基片, 中国科学院半导体研究所海朝和王维民同志协助测定了薄膜的成分和厚度, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] M. H. Seavey and P. E. Tannenwald, *Phys. Rev. Lett.*, **1**(1958), 168.
- [2] P. E. Wigen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **9**(1962), 206.
- [3] C. F. Kooi *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **35**(1964), 791.
- [4] G. C. Bailey *et al.*, *Phys. Rev. B*, **8**(1973), 3247.
- [5] M. Nisenoff *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **35**(1964), 806.
- [6] T. D. Rossing, *J. Appl. Phys.*, **34**(1963), 1133.
- [7] Б. Д. Иванов, *Физика твердого тела*, **14**(1972), 653.
- [8] J. T. Yu *et al.*, *Phys. Rev. B*, **11**(1975), 420.
- [9] J. Baszynski *et al.*, *Phys. Status Solidi, (B)*, **73**(1976), K85.
- [10] M. Rivoire *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 1853.
- [11] G. Suran *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **50**(1979), 7671.

- [12] Г. И. Рисов, *Физика металлов и металловедения*, **49** (1980), 1263.
[13] C. Vittoria *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 4909.
[14] 钱昆明、林肇华、戴道生, 本刊本期.
[15] D. Rossing, *J. Appl. Phys.*, **36**(1965), 1207.

STUDIES OF SPIN-WAVE SPECTRA IN MAGNETIC FILMS

QIAN KUN-MING DAI DAO-SHENG FANG RUI-YI LIN ZHAO-HUA

(*Department of Physics, Peking University*)

ABSTRACT

The linear spin-wave spectra in Fe-Ni polycrystalline films and YIG single crystal films have been observed. It is found that in the spin-wave spectrum of magnetic film the odd and even modes are usually excited simultaneously, and their intensities change in accordance with different envelopes. Further investigations indicate that the positions and relative intensities of the odd and even modes vary with the depositing process and annealing of the film. All these experimental results can be well explained in terms of the Surface-Volume Inhomogeneity (S-VI) Model and the Asymmetric Volume Inhomogeneity (AVI) Model. In this paper the equipment and the relevant methods for measuring the spinwave spectrum are also described briefly.