

基于微波铁磁共振的 YIG 铁氧体晶体材料探究实验

杨东侠, 刘安平, 韩忠, 何光宏, 席明, 张昊一, 倪曙煜

(重庆大学物理学院, 重庆 401331)

摘要:在超高频微波场中测量了 YIG 晶体的共振谱线, 并计算多晶样品的 g 因子、旋磁比、共振线宽、弛豫时间以及单晶样品的 g 因子. 实验结果表明: YIG 样品的磁场强度 H 与励磁电压 U 成正比关系, 励磁电流 I 与功率 P 之间成线性关系, 并通过电压 U 与电流 I 的关系得到 H 与 I 的关系, 即 $U \propto H \propto I \propto P$.

关键词:微波铁磁共振; 电子自旋; YIG 晶体; 共振谱线

中图分类号: TN61

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2016)12-0001-04

铁磁共振与电子自旋、核磁共振等是研究物质微观结构的有效手段^[1]. 早在 1935 年栗弗席兹等就提出铁磁性物质具有铁磁共振特性, 10 年后由于超高频技术发展起来, 1947 年又观察到多晶铁氧体的铁磁共振现象. 接着波尔德和候根在深入研究铁磁体的共振吸收和旋磁性的基础上, 发明了铁氧体的微波线性器件, 从而引起了微波技术的重大变革^[2]. 目前 YIG 单晶/多晶铁氧体材料与器件已广泛地使用在雷达、通信、电视、人造卫星、导弹系统、电子对抗系统及高能粒子加速器等民用和军事应用各个方面^[3], 我国已生产出膜厚 $320 \mu\text{m}$, $\Delta H = 0.04 \text{ kA/m}$ 的 YIG 单晶超薄膜材料^[4], 以及 YIG 梳谱式阻带可变滤波器、多路幅相一致带阻滤波器和开关滤波器, 不仅拓展了 YIG 调谐滤波器的功能, 而且改善了 YIG 器件扫速等固有的缺陷, 为 YIG 调谐带阻滤波器更为广泛的应用找到了新的思路和方向^[5]. 我校物理实验中心在近代物理实验室开展探究式实验教学, 组织学生自主选题, 设计并开展实验. 通过实验阐述 YIG 单晶铁氧体材料的性质, 测量 g 因子、旋磁比 γ 、共振线宽 ΔH 以及弛豫时间 τ ^[6].

1 实验

1.1 实验设备与材料

实验装置包括微波源、隔离器、直波导、频率

计、环行器、隔离器、检波器、双 T 匹配器、扭波导、谐振腔、短路活塞, 通过调节电压、电流、短路活塞以及频率计进行测量实验.

实验分别选取单晶以及多晶钇铁石榴石 (YIG) 作为实验样品, 此次实验中将 YIG 置于样品管内, 测试使用时将样品管插入谐振腔中.

1.2 实验原理和测量方法

1.2.1 测量微波波导波长 λ_g 以及谐振频率 f_0

截面为 $a \times b$ 、均匀且无限长的矩形波导如图 1 所示, 管壁为理想导体, 管内充以电容率为 ϵ 、磁导率为 μ 的介质, 则沿 z 方向传播的 TE_{10} 波的分量为

$$E_y = E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (1)$$

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu} E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (2)$$

$$H_z = i \frac{\pi}{\omega \mu a} E_0 \cos \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (3)$$

$$E_x = E_z = H_y = 0, \quad (4)$$

其中 $\omega = \beta / \sqrt{\mu \epsilon}$ 为电磁波的角频率, $\beta = 2\pi / \lambda_g$ 称为相位常量, 即

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2}}, \quad (5)$$

λ_g 称为波导波长, $\lambda_c = 2a$ 为截止或临界波长 (对微波电子自旋共振实验系统中 $a = 22.86 \text{ mm}$,

“第 9 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期: 2016-04-20; 修改日期: 2016-09-19

资助项目: 重庆大学教改项目 (No. 2014Y30)

作者简介: 杨东侠 (1990-), 男, 重庆人, 重庆大学物理学院 2014 级硕士研究生, 研究方向为凝聚态物理.

通讯作者: 刘安平 (1979-), 男, 重庆人, 重庆大学物理学院副教授, 博士, 从事近代物理实验教学.



$b=10.16\text{ mm}$), $\lambda=c/f$, f 为腔的谐振频率(可以记为 f_0)^[2].

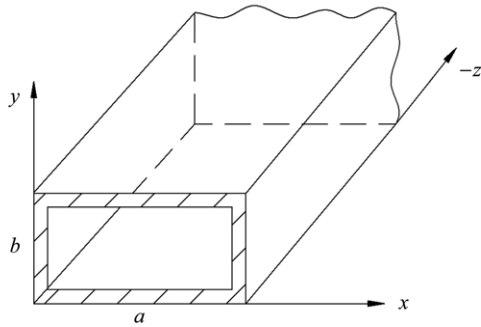


图1 矩形波导管

实验需选用 YIG 单晶样品, 先将样品放入仪器中, 接通示波器和磁铁扫描电源, 通过直接调节电流和电压来选定需要的磁场强度, 可获得均匀的共振信号, 在此基础上调节短路活塞发现共振信号的变化, 记录其中共振信号最大的 3 个点读数, 依据原理公式计算得出波导波长和谐振频率。

1.2.2 YIG 单晶各向异性 k_1 和 g 因子测量

铁磁性及亚铁磁性的单晶体是各向异性的, 即共振时外加直流磁场 H 的大小随晶体的取向而改变, 实验样品为 YIG 单晶小球, 属于立方晶系(见图 2), 忽略形状各向异性, H 在(110)晶面内与[001]轴夹角为 θ (见图 3), 则有

$$\begin{cases} H_{ax} = \left(1 - 2\sin^2 \theta - \frac{3}{8}\sin^2 2\theta\right) \frac{2k_1}{\mu_0 M_s}, \\ H_{ay} = (1 - 2\sin^2 \theta - 3\sin^2 2\theta) \frac{k_1}{\mu_0 M_s}. \end{cases} \quad (6)$$

略去高次磁晶各向异性 k_2, k_3, \dots 当 $\frac{k_1}{\mu_0 M_s} \ll H$ 时,

又可略去 $\frac{k_1}{\mu_0 M_s}$ 高次项, Kittel 铁磁共振公式可进一步简化为(一级近似)

$$\omega = \gamma \left[H + \left(2 - \frac{5}{2}\sin^2 \theta - \frac{15}{8}\sin^2 2\theta \right) \frac{k_1}{\mu_0 M_s} \right]. \quad (7)$$

将 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=\arcsin \sqrt{2/3} \approx 54^\circ 44'$ 分别代入式(6), 则得到(对于 $k_1 < 0$):

1) $H // [001]$ 轴时

$$\omega(\theta=0^\circ) = \gamma \left[H_{[001]} + \frac{2k_1}{\mu_0 M_s} \right], \quad (8)$$

2) $H // [111]$ 轴

$$\omega(\theta \approx 54^\circ 44') = \gamma \left[H_{[111]} - \frac{4k_1}{3\mu_0 M_s} \right]. \quad (9)$$

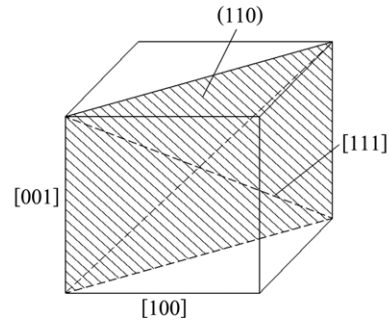


图2 YIG 单晶结构及(110)晶面

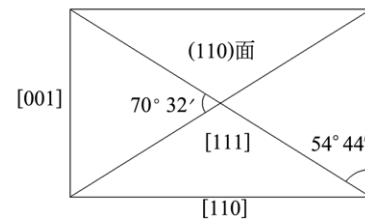


图3 (110)晶面内各晶轴及 H 的取向

取 $\omega = \omega_0$ (相应的共振磁场表示为 H_0), 联立式(7)~(9)求解得

$$\frac{k_1}{\mu_0 M_s} = -\frac{3}{10} (H_{0[001]} - H_{0[111]}), \quad (10)$$

$$g = \frac{10\omega_0}{\frac{\mu_0 e}{2m} (4H_{0[001]} + 6H_{0[111]})}. \quad (11)$$

放置 YIG 单晶于实验装置中, 选定磁场, 以 5° 为单位旋转样品 72 次, 完成 360° 下共振磁场的测量, 记录并绘表可得参量特性。

1.2.3 测量磁场强度与励磁电源电压的关系

实验中不需要使用 YIG 样品. 以霍尔效应为理论基础, 将高斯探头垂直插入谐振腔中心, 旋转, 同时调节励磁电流, 可以得到最大读数, 通过记录最大读数和对应的电压, 将多组数据以图表形式呈现, 可观察到磁场强度和励磁电源电压的正比关系。

1.2.4 描点法直接测量 YIG 多晶样品的共振曲线, 并计算 g 因子和旋磁比 γ

若磁矩 \mathbf{M} 按 $\mathbf{M} = m_{x,y} e^{i\omega_b t}$ 规律进动, 而恒磁场 $\mathbf{H} = H_0 \mathbf{i}_z$, 可以得到 $\omega_b = \gamma H_0$. 由 $\omega_b = \gamma H_0$ 可以得到 $\gamma = \frac{2\pi f_0}{H_0}$, 又因为 $\gamma = \frac{\mu_0 e}{2m} g$, 可得到 $g = \frac{2m\gamma}{\mu_0 e}$ ^[2].

实验中需放入 YIG 多晶样品, 为获得所求参量, 需调节好固定的微波频率, 实验所使用的器材已设置好此频率, 故只需接通检波器, 由小到大改

变励磁电压,记录微电流计突然变小的最小数值以及此时的电压值,计算并绘图得到共振曲线、g 因子和旋磁比 γ 。

1.2.5 铁磁共振线宽 ΔH 的测量

YIG 单晶小球放置在短路波导中,靠近短路壁波导断面正中心(微波磁场最大位置)^[7],当其发生铁磁共振时,可以把 YIG 单晶小球等效为和传输线耦合的铁磁谐振器,则其共振线宽 ΔH 为

$$\Delta H = \frac{\Delta H_L}{2} \left(1 + \frac{P_r}{P_0} \right) = \frac{\Delta H_L}{2} \left(1 + \frac{I_r}{I_0} \right). \quad (12)$$

使用半功率法可以准确得到共振线宽 ΔH 的数值. 具体方法为描点得到的 YIG 共振曲线,在其中寻找所需的半功率点,在此前提下得出 ΔH 值。

2 实验结果与分析

对于实验 1.2.1,测得数据: $L_1 = 10.931 \text{ mm}$, $L_2 = 32.303 \text{ mm}$, $L_3 = 54.767 \text{ mm}$,由 $\frac{\lambda_g}{2} = \frac{1}{2}(L_3 - L_1)$ 计算得出波导波长 $\lambda_g = 43.836 \text{ mm}$. 再根据(5)式可以得到谐振频率 $f_0 = \frac{\sqrt{\lambda_c^2 + \lambda_g^2}}{\lambda_g \lambda_c} c$,其中 $\lambda_c = 2a$, $a = 22.86 \text{ mm}$,计算得到 $f_0 = 9.481 \text{ GHz}$ 。

对于实验 1.2.2,根据实验数据作图如图 4 所示. 由测量曲线得到: $H_{0\max} = H_{0[001]} = 2.63 \times 10^5 \text{ A/m}$, $H_{0\min} = H_{0[111]} = 2.54 \times 10^5 \text{ A/m}$. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$,代入(11)式计算得到 $g = 2.07$. 根据(10)式可以得到: $k_1 = -\frac{3}{10} \mu_0 M_s (H_{0[001]} - H_{0[111]})$,其中 YIG 单晶样品饱和磁化强度取 $4\pi M_s = 170 \text{ mT}$,计算得到磁晶各向异性常量 $k_1 = -38.45 \text{ J/m}^3$ 。

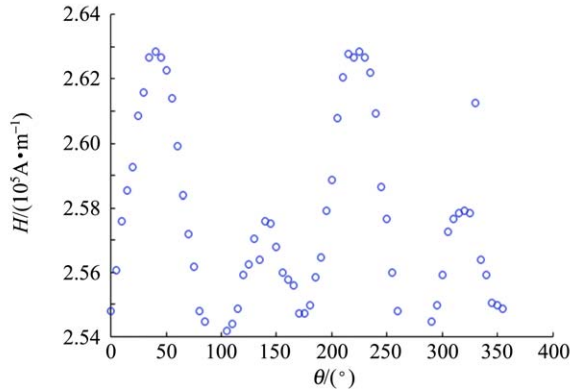


图 4 磁场强度与角度的关系

对于实验 1.2.3,根据实验数据作图如图 5 所示. 拟合得到 $H = 30.0U + 3188.3$, $r = 0.9937$. 从而可得到 H 与 U 成线性关系。

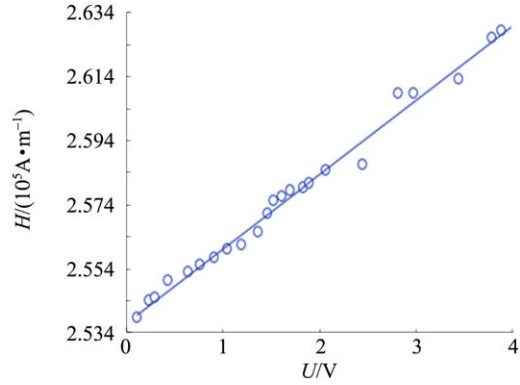


图 5 磁场强度与激励电源电压的关系

对于实验 1.2.4,通过拟合得到的 U 和 H 的线性关系,计算得到 I 与 H 的值作图如图 6 所示. 从曲线得到共振磁场 $H_0 = 2.58 \times 10^5 \text{ A/m}$,通过微波频率计得到微波频率为 $f_0 = 9.40 \text{ GHz}$,代入 $\gamma = \frac{2\pi f_0}{H_0}$ 计算得 $\gamma = 2.291 \times 10^5 \text{ m/(A} \cdot \text{s)}$,由 $g = \frac{2m\gamma}{u_0 e}$ 计算得到朗德因子 $g = 2.043$ 。

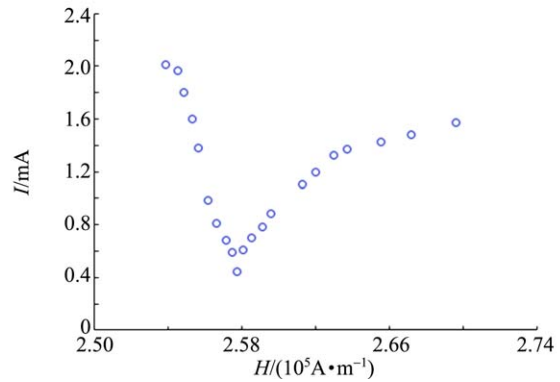


图 6 YIG 多晶共振曲线

实验 1.2.5 测得数据如下: $I_0 = 1.53 \text{ mA}$, $I_r = 0.33 \text{ mA}$ (说明:这里认为测量电流与微波功率成线性关系). 计算得到 $I_{\frac{1}{2}} = (I_0 + I_r)/2 = 0.93 \text{ mA}$. 对应电压 $U_1 = 0.78 \text{ V}$, $U_2 = 3.22 \text{ V}$. 根据测量得到的磁场强度与励磁电压的关系 $H = 30.0U + 3188.3$,其中励磁电压 U 单位为 V ,磁场强度 H 的单位为 A/m ,可得到对应磁场 $H_1 = 2.56 \times 10^5 \text{ A/m}$, $H_2 = 2.61 \times 10^5 \text{ A/m}$. 计算得到有载线宽 $\Delta H_L = H_2 - H_1 = 5825 \text{ A/m}$. 因为固

有线宽 $\Delta H = \frac{\Delta H_L}{2} \left(1 + \frac{I_r}{I_0} \right)$ (说明: 这里采用反射式谐振腔, 调节为欠耦合状态, $\beta < 1$), 所以可以计算得到 YIG 多晶小球样品共振线宽: $\Delta H = 3\ 540.4\ \text{A/m}$. 测量时注意防止频散效应的影响, 即首先在示波器上调出左右对称的共振信号.

说明: YIG 多晶共振线宽一般为单晶的几倍到几十倍, 本仪器所配 YIG 多晶样品共振线宽为 $397.885 \sim 3\ 978.85\ \text{A/m}$, 单晶样品共振线宽小于 $79.577\ \text{A/m}$. 根据 $\tau = \frac{2}{\gamma \Delta H}$, 可以计算出弛豫时间 $\tau = 2.46 \times 10^{-9}\ \text{s}$.

根据实验 1.2.3 可以得到 I 与 H 的关系曲线, 有突变性质, 又因为检波晶体管的检波电流 $i \propto P^{[8]}$, 故可以得到 YIG 单晶样品的磁场强度 H 与励磁电压 U 成正比关系, 励磁电流 I 与功率 P 之间成线性关系, 并且可通过电压 U 与电流 I 的关系得到 H 与 I 的关系, 即 $U \propto H \propto I \propto P$.

3 结论与讨论

学生实验测得在超高频微波场中磁损耗比其他任何品种的多晶、单晶铁氧体低 1 到几个数量级的 YIG 单晶、多晶的共振谱线, 并计算多晶样品的 g 因子、旋磁比 γ 、共振线宽 ΔH 以及弛豫时间 τ 以及单晶样品的 g 因子. 实验结果: YIG 晶体样品的磁场强度 H 与励磁电压 U 成正比, 励磁电流 I 与功率 P 之间成线性, 并通过电压 U 与

电流 I 的关系得到 H 与 I 的关系, 即 $U \propto H \propto I \propto P$. 通过探究式实验教学, 加深了学生运用微波铁磁共振实验研究微观物质结构及其潜在应用价值的理解, 锻炼了学生实验研究与创新能力.

参考文献:

- [1] 高铁军, 孟祥省, 王书运. 近代物理实验[M]. 北京: 科学出版, 2009: 179-180.
- [2] 重庆大学物理实验教学中心. 近代物理实验结课论文[EB/OL]. <http://www.docin.com/p-1005650713.html>. 2014.
- [3] 郑振中. 微波铁氧体材料的最新研究[J]. 中国陶瓷, 2010, 46(9): 6-7.
- [4] 余声明. 我国微波 YIG 铁氧体技术的发展[C]// 中国稀土学会第十届全国磁学和磁性材料会议论文集. 北京, 1999: 433-434.
- [5] 何卫国, 全海江, 陈劲松. YIG 调谐带阻滤波器的新应用[J]. 磁性材料及器, 2007(6): 29-33, 44.
- [6] 张有霆. 钇铁石榴石单晶薄膜在高功率下铁磁共振饱和现象和折叠效应[J]. 应用科学学报, 1989, 7(2): 95-100.
- [7] 王魁香. YIG 单晶体磁共振(FMR)[J]. 物理实验, 1987, 7(3): 101-104.
- [8] Fan W J, Qiu X P, Shi Z, et al. Correlation between isotropic ferromagnetic resonance field shift and rotatable anisotropy in polycrystalline NiFe/FeMn bilayers [J]. Thin Solid Films, 2010, 518(8): 2175-2178.

Study on YIG ferrite crystal materials based on microwave ferromagnetic resonance

YANG Dong-xia, LIU An-ping, HAN Zhong, HE Guang-hong,

XI Ming, ZHANG Hao-yi, NI Shu-yu

(College of Physics, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract: The resonance spectra of YIG crystals were measured in microwave magnetic field with ultra-high frequency, and some parameters were calculated, such as factor g of single crystal and polycrystal, gyromagnetic ratio, resonance line width, and relaxation time. The experimental results showed that a direct ratio relation laid between exciting voltage U and the magnetic field intensity H of YIG crystal. Meanwhile the exciting current I had a linear relation with power P , and the relation between H and I could be deduced by the relation between U and I ($U \propto H \propto I \propto P$).

Key words: ferromagnetic resonance; electron spin; YIG single crystal; resonance spectral line

[责任编辑:任德香]