微波电子自旋共振实验报告

【摘要】（先简述电子自旋共振在科研和实际中的应用，即说明本实验的意义，然后再简介实验内容和结果。）本实验包含两个子实验，分别对两组实验装置通以一定频率和功率的微波。一组使用反射式谐振腔得到电了子共振信号并测量了共振磁场大小等相关数据，一组使用透射式谐振腔观测了铁磁共振信号并测量了共振磁场、P-B曲线等相关数据，分别计算得出了样品的朗德因子、回磁比和共振线宽等值。

【关键词】 电子自旋共振，铁磁共振，谐振腔，微波

Microwave electron spin resonance

**Abstract:** This experiment contains two sub-experiments, respectively, for the two sets of experimental devices to use microwaves of a certain frequency and power. one group uses the reflective resonator to obtain the electrocution resonance signal and measures the resonance magnetic field size and other related data, and one group uses the transmission resonant cavity to observe the ferromagnetic resonance signal and measure the resonance magnetic field, P-B curve and other related data. and the values of the Roundle factor, remagnetization ratio and resonance linewidth of the sample are calculated respectively.

**Key words: Electron spin resonance, Ferromagnetic resonance , Resonator, Microwave**

1引言

上个世纪50年代，苏联和美国的科学家观测到了一系列的磁共振现象。从此，磁共振作为一种新兴的实验技术和研究手段，引起了化学、生物以及医学等多个领域的广泛关注。

电子自旋共振（ESR），也称电子顺磁共振。只有分子中含有未成对电子的物质才是ESR研究的对象。如今，ESR已成为对物质微观结构及运动状态进行分析和探索的现代实验技术，具有高灵敏度和分辨率，且不破坏样品结构的优点。铁磁共振的观察对象是铁磁物质中的未偶电子，因此可以说它是铁磁物质中的电子自旋共振。

2实验

本实验利用两组搭建的实验仪器装置，通以一定频率和功率的微波，分别使用反射式谐振腔得到电子自旋共振信号并测量了对应的磁场强度，使用透射式谐振腔测量了铁磁共振信号以及对应的磁场强度和曲线的数据，并分别利用数据计算了样品的朗德因子和回磁比、共振线宽等值。

2.1电子自旋共振的基本原理

忽略较小的原子核磁矩，原子的总磁矩由原子中各电子的轨道磁矩和自旋磁矩所决定。原子的总磁矩与总角动量之间满足如下关系：

（1）

式中，负号表示磁矩与角动量方向相反；为玻尔磁子；为回磁比，满足：

（2）

当具有未成对电子的物质在静磁场中，电子自旋磁矩与外磁场的相互作用能为：

（3）

沿磁场方向的相互作用能为：

（4）

在实际测量中呈现量子化的分布，即，不同磁量子数对应的电子具有不同的能量，因此而导致了塞曼能级分裂，共分裂为个子能级。

在顺磁物质中，由于电子受到外部电荷的作用，电子轨道平面会发生进动，电子的轨道角动量平均值为，一级近似中可将其认为是；电子的自旋角动量为，所以，能量会分裂为个子能级:，如图1所示，且这二者能级差为：

（5）

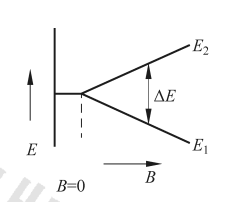


图 1外磁场下电子能级的分裂

此时，如果在垂直于原恒定磁场的方向上加一个角频率为的交变磁场，且使这个交变电磁场的能量正好等于电子两个能级之间的能量差，即：

（6）

（7）

那么处于低能级上的电子就会吸收交变电磁场的能量而跃迁到高能级，这就是所谓的磁偶极共振跃迁，或共振吸收。由于这个过程中磁矩主要由电子的自旋磁矩贡献，所以又叫做电子自旋共振或电子顺磁共振。

另外，之所以要选择垂直的交变磁场，是因为电子在塞曼能级间的跃迁同时也意味着电子磁矩取向的变化，只有交变场具有垂直于稳恒场的分量，才有可能改变电子的磁矩方向。

2.2共振吸收的维持

在恒定磁场中，当上述能级分裂达到平衡时，上下的粒子数应服从玻尔兹曼分布，即：

（8）

可见，当时，则，低能级上的粒子数将略大于高能级上的粒子总数。当产生共振吸收时，低能级上的粒子以光速跃迁到高能级上，然后两能级间的粒子数之差就会趋于零，共振信号就会消失。但在实际观察中，电子共振信号是稳态的，说明除了受激跃迁以外，还有其他相互作用的存在，使得体系从跃迁后的不平衡状态恢复到平衡状态。这个过程成为弛豫过程。

当满足共振条件时，低能级上的粒子吸收交变磁场的能量向高能级跃迁,而部分处在高能级的粒子则通过“自旋-晶格”相互作用把能量释放给晶格回到低能级,这样两能级上的粒子数分布就仍然满足玻尔兹曼分布，共振吸收就能持续进行下去, 所以可以观察到稳态的磁共振波谱。

2.3 布洛赫方程和弛豫过程

布洛赫在描述顺磁共振现象时，采用了磁化强度来处理。设 是样品的角动量密度则经典的运动方程为：

（9）

若不计自旋与劲歌的相互作用，则。若在垂直于的方向加上交变磁场，则运动方程为：

（10）

设在方向的稳恒磁场的作用下，顺磁晶体经过秒后达到平衡的磁化强度，体系势能为。为保持平衡，这些能量同样需要在的时间内交还给环境，即：

（11）

式中，为弛豫时间。晶格离子的热运动阻碍着电子自旋跟随外磁场的运动,因此在磁化过程中,自旋体系通过自旋-晶格的相互作用把能量交给晶格 ,纵向弛豫时间又称为自旋-晶格弛豫时间。

在晶体的磁矩绕静磁场进动时,在垂直磁场的平面上有旋转的横向磁矩,因而晶体中具有横向磁化强度分量和。这是自旋体系内部的相互作用阻碍着横向磁矩分量随交变磁场的运动,所以可以以表示横向弛豫时间,其来源是离子本征磁矩或自旋磁矩之间产生的磁场涨落,因此又称为自旋-自旋弛豫时间。

所以，在考虑了外部磁场和弛豫过程两者对次花千骨的影响后，即可导出布洛赫方程：

（12）

自旋体系内的弛豫机制影响着共振时谱线的线宽、线型和饱和。根据共振条件,电子自旋共振谱线应是一条无限窄的谱线,由于存在弛豫过程,实际测得的谱线将会有一定的宽度和形状。

2.4 微波在矩形波导管中的传输

由麦克斯韦方程组及其所导出的波动方程和边界条件，可知只有横电波（磁波，简称波或波）和横磁波（电波，简称波或波）能够在矩形波导中传输。实验中使用波。

2.4.1 型波

从电磁场基本方程组出发可以知道沿方向传播的具有以下特点：

波导波长为：

（13）

式中，为自由空间波长，为波导截面宽边的长度，在本实验中。

电磁场在波导的纵方向形成行波，和的分布规律相同。

2.4.2 谐振腔中电磁场的分布

在谐振腔内电磁场由于形成驻波，横向电场与横向磁场的最大值纵向相隔，即电场与磁场有相位差，波印廷矢量为零，能量只会储存或损耗在腔内。

2.5 铁磁共振

对于铁磁物质而言，磁导率是一个复数：。实部为铁磁物质在恒定磁场中的磁导率，决定了磁性材料中储存的磁能；虚部反映了交变磁能在磁性材料中的损耗。但交变磁场的频率满足：

（14）

可以达到最大值，这种现象就是铁磁共振。铁磁共振发生的原因，从宏观来看，铁氧体的磁矩在外加磁场的作用下进动，如果加上交变磁场，且的频率与的进动频率相等时，就会吸收微波的能量，克服阻尼运动维持进动，即发生共振吸收现象。从量子力学来看，与电子自旋共振部分相似。

通常将称为共振磁场值，而两点对应的磁场间隔称为共振线宽。是一个描述铁氧体材料性能的重要参数，标志着磁损耗的大小。

当磁场改变时，趋于平衡态过程中与平衡态偏差量减小到初始值的所经历的时间称为弛豫时间。在外磁场方向上的分量趋于平衡值所需的特征时间称为纵向弛豫时间。在垂直于外加磁场方向上的分量趋于平衡值的特征时间称为横向弛豫时间。在一般情况下,。为了方便,把 统称为弛豫时间,则有：

（15）

2.6 仪器工作原理

2.6.1 谐振式频率计

用于测量微波的频率。当电磁波的频率满足频率计空腔的谐振条件时，被吸收的能量将最大，从电流计测得的微波功率就会明显减小，此时即可通过频率计表面标尺读出频率。

需要注意的是，在测量完频率后，要将频率计调整为失谐状态，不然大多数能量都会滞留在频率计的空腔内。

2.6.2 反射式谐振腔

通过末端活塞改变谐振腔可以使谐振腔在给定的微波频率下谐振，从而使电磁场增强。谐振时，谐振腔长度应该为半个波导长的整数倍，此时能量大多储存在谐振腔内，所以检波器的读数会明显变小。同时需要通过机械传动装置改变样品位置以使样品处于微波磁场的最强处，即处于半波长的整数倍处，这是因为在谐振腔的端口处，加上了一个耦合片导体，导致此处横向电场为0，即横向磁场处于峰值处，在经过半波长的整数倍后，磁场仍能处于峰值处。

2.6.2 传输式谐振腔

谐振时，腔长应为半个波导长的整数倍。但由于是传输式，所以发生谐振时，检波器测到的功率应该增大。

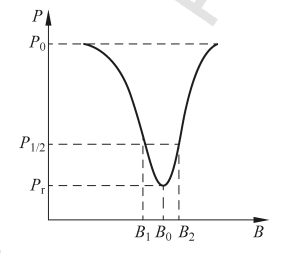
当固定微波频率和功率，磁场改变时，与腔体的输出功率之间存在着对应关系，因此可以将测量曲线求的问题转化为测量曲线来求。如图2所示

图 2 P-B曲线

图中为远离铁磁共振区域时谐振腔的输出功率，为共振时的输出功率，与对应，为半共振点，与对应。在考虑样品谐振腔的频散效应并进行修正后，可得：

（16）

3 实验结果与分析

3.1 电子自旋共振

利用直读频率计测量微波频率，得。

根据（13）式计算波导波长，得。

当扫描磁场电流大小取时，当能观察到共振信号时，稳恒磁场电流大小范围为：。最好给出不同扫场电流大小对应的稳恒磁场变化范围，再结合仪器结构分析扫场信号的影响

当稳恒磁场的电流在具有共振信号的范围内从小到大变化时，波谷从左一侧向右一侧移动。这是因为我们在稳恒磁场的基础上还加了扫场信号，当两个磁场的叠加能得到符合共振要求的磁场时，就能出现共振信号。由于扫场信号是一个正弦波，所以当波谷处于正中间时，扫场信号大小为零，稳恒磁场的大小即为共振磁场大小。

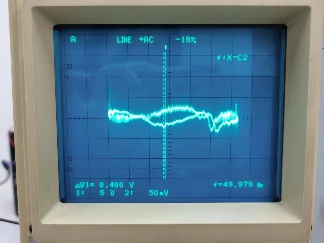
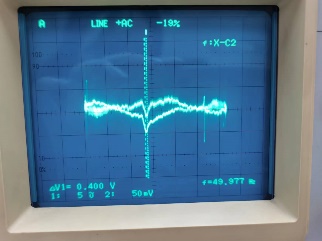
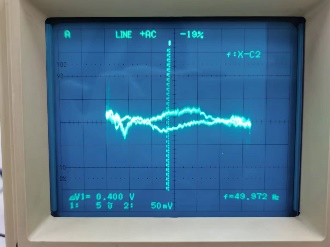


图 3 实验中所测的自旋共振信号

此时稳恒磁场的大小为：。

由实验室给出的磁场电流关系式：

可得稳恒磁场大小为。

由（7）式可得因子，。分析误差来源

当改变样品位置时，共振信号频率逐渐减小至零，这是因为样品距离磁场最强的位置越来越远，且此时谐振腔也不能完全将微波能量完全吸收，部分微波从谐振腔溢出而干扰了共振信号。当样品又移动到谐振位置时（波导半波长的整数倍），共振信号又变大变明显。

3.2 铁磁共振

测量谐振腔的长度，得。

腔长应为半波导长的整数倍，，即，可得。

用直读频率计测量得到微波频率为。

扫描磁场电流大小为，观察到共振信号的稳恒磁场信号范围。

共振磁场电流大小为。

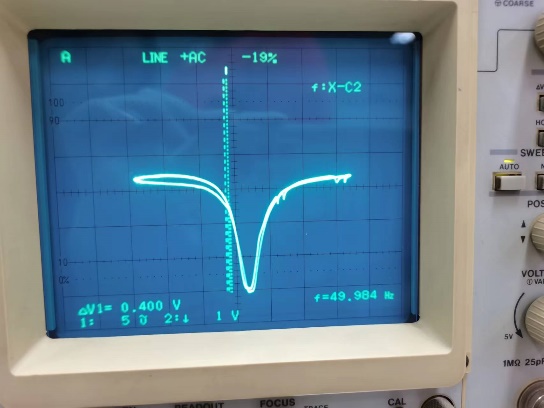


图 4 实验中所测的铁磁共振信号

与电子自旋共振信号相比，此信号要更大，波谷幅值约为前者的5倍。这是因为在观察铁磁共振信号时是在谐振情况下，检波器对应的值是增大而不是像电子自旋共振那样减小，所以铁磁共振信号更大。

由实验室给出的磁场电流关系式可得稳恒磁场大小为。

由（7）式可得因子，，也可得回磁比，。

当出现铁磁共振信号后，断开扫场，改变稳恒磁场大小，记录曲线数据：

表1 曲线数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 稳恒磁场电流（） |  |  |  |  |  |  |  |
| 检波器电流（） |  |  |  |  |  |  |  |
| 稳恒磁场电流（） |  |  |  |  |  |  |  |
| 检波器电流（） |  |  |  |  |  |  |  |
| 稳恒磁场电流（） |  |  |  |  |  |  |  |
| 检波器电流（） |  |  |  |  |  |  |  |

图 5 P-B曲线

由式（16），可得。

对应的稳恒磁场电流，共振线宽为。

由式（15），可计算出弛豫时间，。

4 结论与思考

本实验搭建了用于上述两个实验的仪器装置，使用示波器观察到了电子自旋共振和铁磁共振的信号，并测量了共振时的磁感应强度等相关数据，计算得出了样品的朗德因子和回磁比等数值。

以下是我对实验中一些问题的理解与思考。

4.1 扫场信号

我对扫场信号的理解是，随时间变化的扫描磁场可以将磁场变化映射到时间变化上，所以示波器可以以波的形式呈现出共振信号随磁场的变化。在本实验中，扫描磁场呈正弦形式。

前面已经提到，当扫描磁场和稳恒磁场的叠加能得到符合共振要求的磁场时，就能出现共振信号，当波谷处于正中间时，扫场信号大小为零，稳恒磁场的大小即为共振磁场大小。这说明，实验所测得的稳恒磁场大小范围实际上受扫描磁场大小的影响，当扫描磁场较大时，稳恒磁场的范围（即能观察到共振信号的范围）也将增大，反之则减小。

在测量曲线时，需要断开扫场，这是因为如果不断开，实际测到的磁场并不是稳恒磁场大小，而是其和扫场磁场的叠加值。

4.2 电子自旋共振与谐振的区别

共振是电子跃迁所吸收的频率和波频率相同，吸收振幅在波的作用下增加。谐振是是在谐振腔内，同频率波同相相干，波本身的幅度增强

参考文献

[1]张孔时，丁慎训.物理实验教程（近代物理实验部分）.北京：清华大学出版社，1991

[2]葛惟昆，王合英.近代物理实验.北京：清华大学出版社，2020

[3]王翠平，叶柳，谢安建，李广，李爱侠.电子顺磁共振技术应用及进展.实验室研究与探索，2013，32（05）

[4]王合英.孙文博，张慧云，茅卫红.电子自旋共振实验g因子的准确测量方法.物理实验，2007，（10）

