

有关微波电子自旋共振实验仪器调试的学习

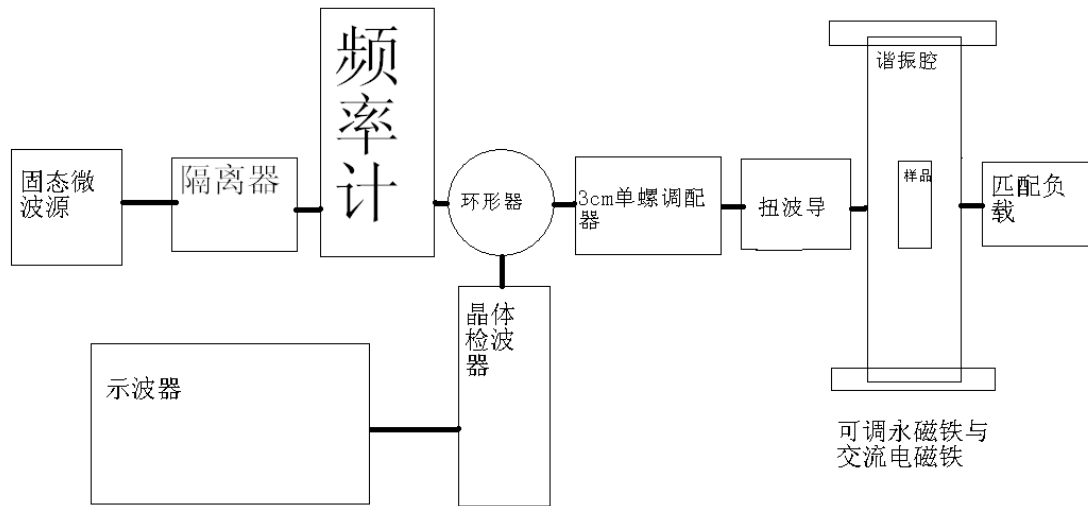
BY 曹卓 (0530049)

摘要: 结合实验现象调试仪器来了解实验中各仪器的作用, 并分析仪器的工作原理以及实验图像。

关键字: 微波技术、波导、电子自旋共振、吸收峰、色散峰。

引言: 微波电子自旋共振实验是近代物理中一个很重要的实验, 它涉及了微波技术和物质中电子自旋共振现象这两方面的知识, 了解各实验仪器的作用和从原理上解释所观察到的微波信号对仪器调试是很有帮助的, 而通过设置仪器的不同参数又可以深化对仪器工作原理和吸收信号、色散信号的认识。希望这篇文章能对以后的实验者起到一定的帮助作用。

正文: 实验仪器总的示意如下:



1、微波信号源。本实验要求具有足够功率电平和频率的微波信号, 同时要求一定的功率和频率的稳定度, 因此采用了固态微波源。在微波源后加隔离器是为了减少负载对信号的影响, 本实验中隔离器的隔离范围为 8.8GHz-9.5GHz, 刚好包含了微波源发射的微波频率, 因此起到了减少了负载对微波源的影响的作用。

2、微波的传输。微波的传输主要在波导中进行。波导由空心金属管构成, 为减少内壁损耗, 内壁有良好的光洁度, 并镀银以提高电导率。本实验采用了长边 $a=2.3\text{cm}$, 宽边 $b=1.0\text{cm}$ 的矩形波导管, 满足 $b=(0.4\sim 0.5)a$ 的关系, 因此波导只能传输 TE_{10} 波, 且波导中只能传输波长小于 $2a$ 的电磁波。本实验中的波导相当于一个高通滤波器, 因此才能够实现单模传输。特别对环形器和扭波导做下说明。

环形器: 环形输出的微波信号, 设计巧妙, 微波路径为口 1→口 2, 口 2→口 3, 口 3→口 1。实验中用环形器把微波能量耦合到谐振腔再把反射能量引出。

扭波导: 两端对应边相互垂直的 S 型波导, 可以改变传输波形的极化平面而保持波导的原方向不变。波导弯曲或扭转部分的截面略有形变就会是传播常数与未变形波导有所不同, 从而引起失配, 为使失配影响最小, 扭波导的长度选为半波长的整数倍。

3、微波与样品的做用。具有未成对电子的物质在静磁场 \vec{B}_z 中由于电子自旋共振与外加磁场互相作用导致电子基态塞曼能级分裂有 $\Delta E = g\mu_B \vec{B}$ ，当垂直磁场方向所加横向电磁波的量子能量满足 $\hbar\omega = \Delta E = g\mu_B \vec{B}$ ，即满足电子自旋共振条件，此时未成对电子会在塞曼能级之间跃迁。这里我还想说下关于谐振腔中样品及其位置的确定。理论上，永磁铁磁场的中央处磁场强度最大，但将谐振腔拆开可以发现样品的位置可能不在谐振腔中央处，因此调节永磁铁的位置使信号峰最尖、峰半高宽最小为最佳；实验用样品为矩形，垂直微波信号的两个面用铜片固定，以反射共振信号，实验中曾因为铜片松动而导致检波器探测到的共振信号十分微弱，因此，这也是实验者在仪器调试中应注意的一个问题。

4、微波探测设备及其调节。实验中使用的微波探测设备为晶体检波器，其核心部分是点接触微波二极管，其管轴沿 TE_{10} 波最大电场的方向，将微波信号转化成为电信号输出到示波器上。为使晶体检波器得到较好的测量灵敏度，将它单独进行调试，即采用方波信号发生器做源，微波探测器输出接示波器，通过对三个螺钉和短路活塞的调节使示波器上的输出信号幅度最大，此时晶体检波器的工作状态最灵敏。再将晶体检波器于环形器对接。

5、信号的调节。信号的调节操作可以说是整个实验中的一个难点，但结合仪器原理及电子自旋共振现象逐步进行操作则可以很顺利地解决问题。

首先来看永磁场强度的确定。查说固态微波源说明书可知其输出频率为 9.360GHz 左右；调节频率计发现在某处有信号的强烈突然跳变，说明此时入射微波频率满足发生电子自旋共振的频率要求，且频率计仅能通过读书所示频率的微波，而对于其他微波则其阻隔作用，所以此时频率计显示的读数即为入射频率 f_0 。理论上，根据

$$hf_0 = g\mu_B \vec{B}$$

即

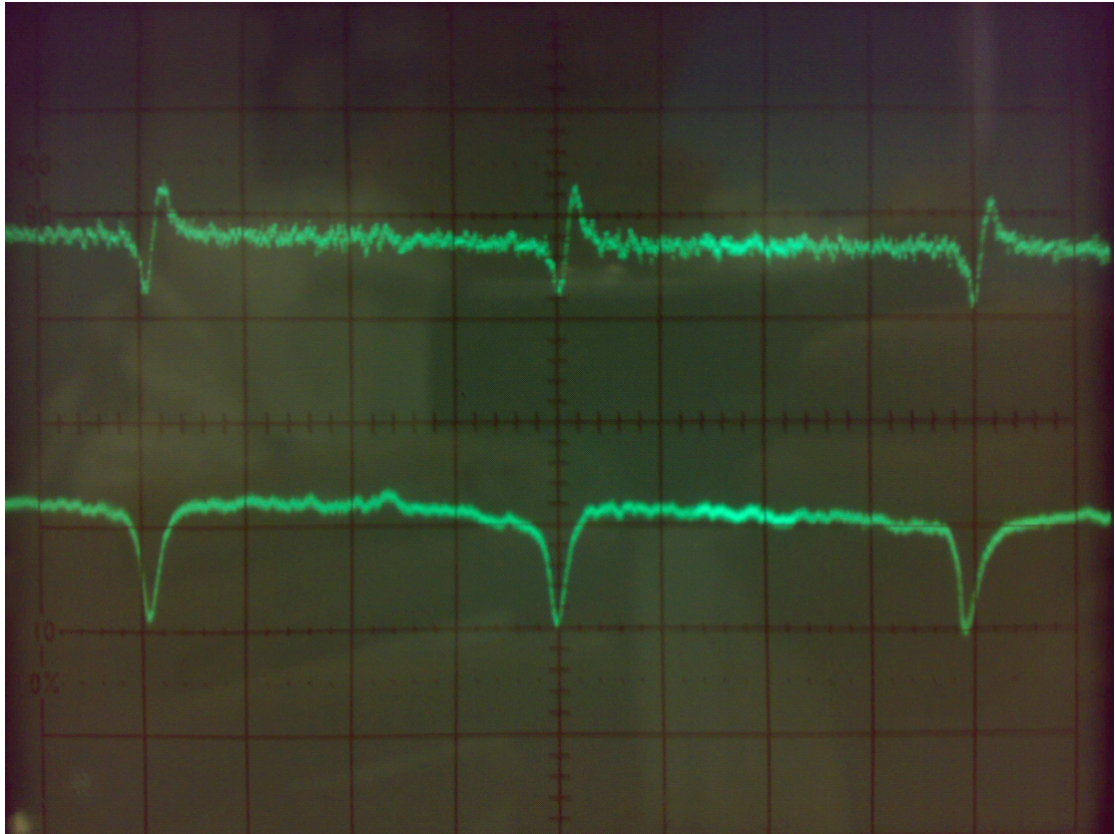
$$\vec{B} \approx 0.0352f_0$$

计算得 $B = 329mT$ ，将磁场调节至该值附近（使用特斯拉计进行测量）。

第二是单螺调配器位置和探针插入深度的调节。探针的作用是反射部分的入射微波，且探针插入越深，所反射的微波能量越多。另一部分微波使样品在谐振腔中发生共振，并由谐振腔后铜片将这部分微波信号经原路径反射。为了检测出共振信号，应该使这两部分微波信号相位相同，为此，可先略微深入探针，再调节旋钮左右挪动探针位置，如此反复几次，直到示波器上信号最大。

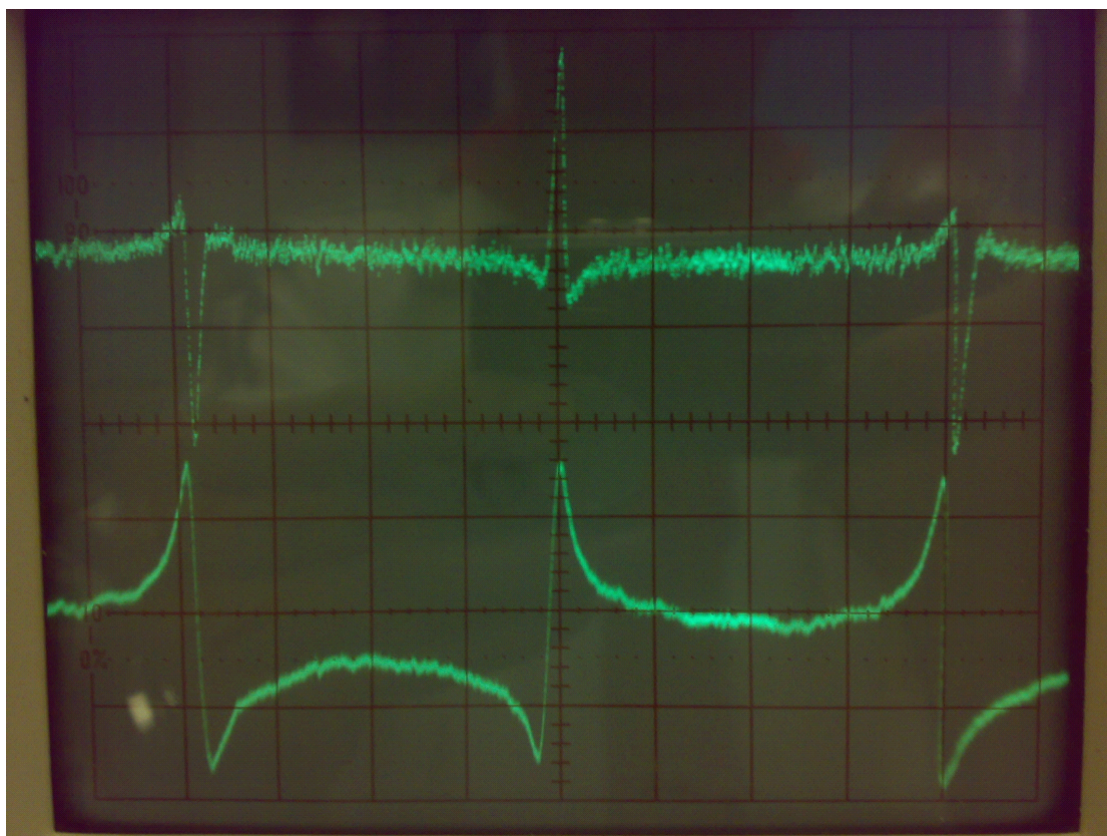
同时还可以对谐振腔和永磁铁间的相对位置进行调节使峰形最尖、信号最大。

6、信号的检测分析。调节样品至谐振腔微波磁场的最强处（即电场最若处，距腔的耦合孔为半个波导波长的整数倍位置），则当外磁场满足共振条件是，便会发生共振跃迁，利用扫场使外磁场在共振条件附近变化，在示波器上就能看到共振吸收信号了。从微观角度看，由于热平衡时电子遵循波尔兹曼统计分布，有较多的电子处于较低的能级上，共振的统计结果是较低能级上的电子从电磁波中吸收能量跃迁到较高能级上。吸收信号图如下，上面相应的一次微商信号。

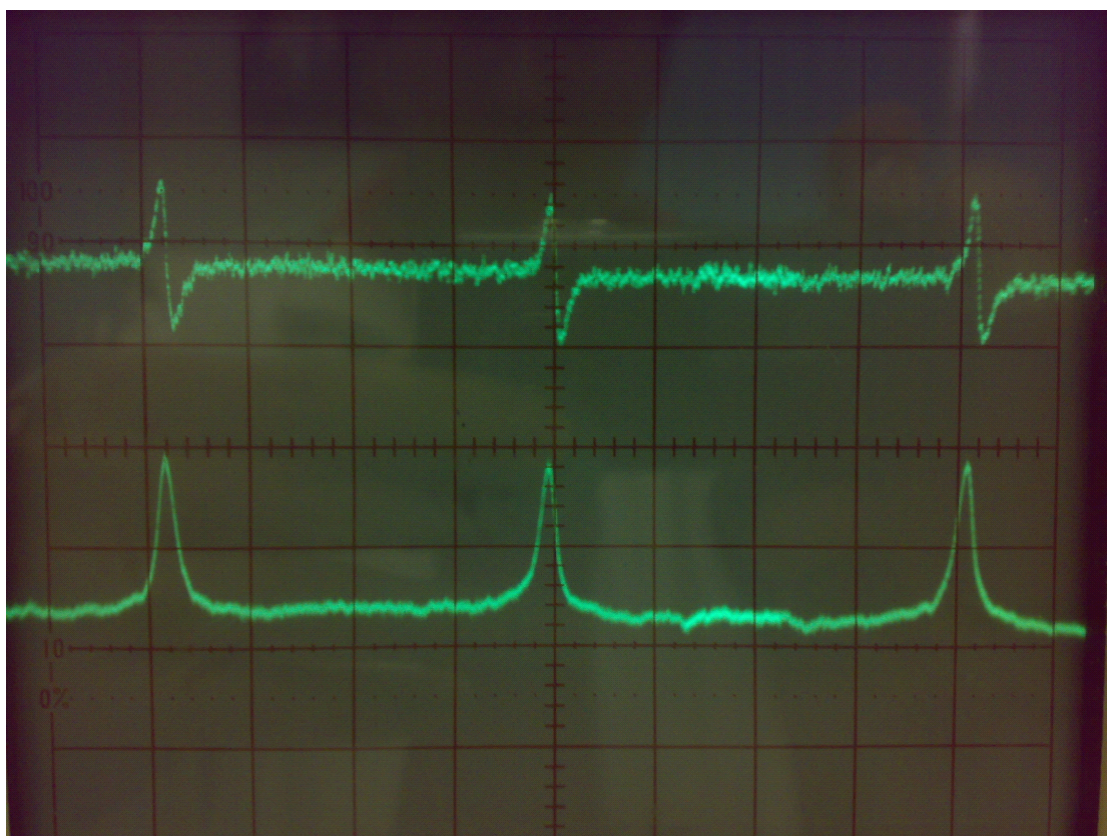


它实际上表示的是样品动态磁化率的虚分量，即吸收磁化率。动态磁化率的实分量称为色散分辨率。二者之间的区分来源于同样品发生共振前后的两列微波之间存在的相位差，它於顺磁物质的顺磁弛豫时间有关。由于在共振点吸收磁化率有最大值而色散磁化率为零，故而看到的是共振吸收信号。但若移动探针位置使探针反射的信号与腔反射的信号之间的位相差不是刚好同相，则在晶体检波器叠加得到微波信号相对于入射频率为 f_0 的微波信号将有一个相移，导致检测到的吸收信号变小，色散信号变大，因而在示波器上将看到共振色散信号。而所观察到的过饱和峰则是由于入射频率为 f_0 的微波与谐振腔经共振后反射的微波信号位相刚好完全相反时示波器所显示的信号。

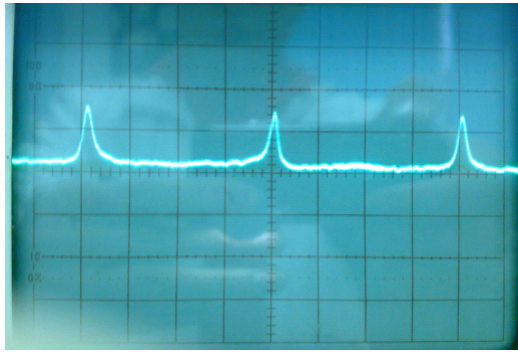
所得的色散峰和过饱和峰图像如下：



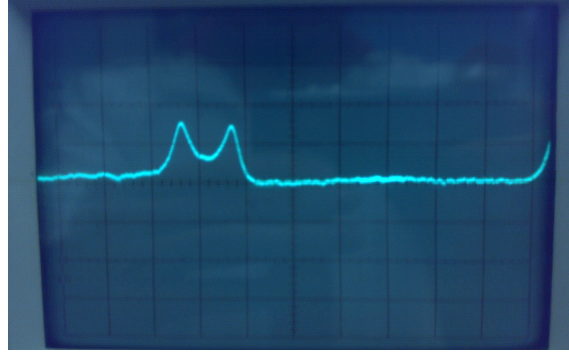
两图上方同样为相应的一次微分信号。



7、对于三峰等间距和两峰合一图像的解释。二者图像如下



三峰等间距



两峰合一

关于信号的说明：通过对永磁铁的调节，使永磁铁磁场 \vec{B}_z 满足 $\hbar\omega = g\mu_B\vec{B}$ ，因而在用磁场上所加的交变磁场 $2\vec{B}_1 \cos \omega t = 0$ 时才会出现共振信号。而交变磁场扫过 0 的时间是等间

隔的，为其周期的 $\frac{1}{2}$ ，即每隔 0.01s 出现一个信号。若改变 \vec{B}_z 大小，共振信号仍旧出现在合磁场 $\vec{B} = \hbar\omega / g\mu_B$ 处， $\vec{B} = \vec{B}_z + 2\vec{B}_1 \cos \omega t$ ， \vec{B}_z 减小，共振时 $2\vec{B}_1 \cos \omega t$ 增大，当 \vec{B}_z 减小至 $\hbar\omega / g\mu_B - 2\vec{B}_1$ 时，交变磁场在振幅为 $2\vec{B}_1$ 处出现共振信号，交变磁场每一个周期出现一次波峰，为 0.02s，此时对应示波器上二峰合一的图。

8、对实验仪器的一些改造。A、该实验中至于样品末端的匹配负载换成可变断路器，因为可变电阻器的调节也起到了改变谐振腔反射波位相的作用，且可变电阻器的读数为螺旋式，在测量精度上高出了 3cm 单螺调配器一个数量级，因此若采用可变断路器可大大提高实验精度。实验中的波长数据均使用的可变短路器调节得出。B、将匹配负载和可变短路器均取下，仍然可以得好良好的共振信号，且通过对单螺调配器的横向调节，也能够完成吸收、色散、过饱和峰的观察与半波长的测量，这点很好地说明了铜片对共振信号的反射作用。C、将单螺调配器的探针取出，谐振腔后加可调短路器，同样也能够完成实验。从样品处可以找到答案：此时样品两侧较接近微波源的铜片起到了探针的作用，但是无法实现探针反射微波量调节的功能。

小结：通过 8.B、8.C 中的现象可以发现样品两侧的铜片对于微波都在进行反射，但可变短路器的调节可以改变共振微波的相位，因此可以猜测铜片的反射并不是全部的。打开谐振腔观察铜片发现上面有一个圆形小孔验证了这个猜想。这也很好的说明了通过实验现象的分析可以帮助理解仪器功能这个道理。本实验只有将原理和具体操作紧密地结合起来，才能做到较熟练地将调处信号，通过微波电子自旋共振实验，可以非常好地印证理论指导实践，而反过来可以对理论起到一个检验作用这个道理。

致谢：感谢俞熹、汪人甫及实验室其他老师的指点，感谢同做实验的余贞兆同学同我一起进行讨论，同样感谢物理系图书馆老师提供的帮助。

引用文献：《微波技术》 范传立等 电子工业出版社 1994 年；

《微波技术基础知识》（下） 第四机械工业部 1978 年；

《电子自旋共振谱仪的调试》 浦天舒 东华大学 2002 年。