

全国高等医药院校配套教材
供医学影像学专业用

医学影像 物理学实验

主审 张泽宝

主编 仇惠 张瑞兰



45-35
54
02
7

 人民卫生出版社

全国高等医药院校配套教材

供医学影像学专业用

医学影像物理学实验

主 审 张泽宝

主 编 仇 惠 张瑞兰

编 者 (以姓氏笔画为序)

仇 惠 (牡丹江医学院)	张 岱 (锦州医学院)
甘 平 (重庆医科大学)	张瑞兰 (北华大学医学院)
刘迎九 (北华大学医学院)	胡继光 (北华大学医学院)
刘东华 (新乡医学院)	徐春环 (牡丹江医学院)
李维波 (昆明医学院)	童家明 (青岛大学医学院)
吴小玲 (南京医科大学)	

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

医学影像物理学实验/仇惠,张瑞兰主编.
北京:人民卫生出版社,2002
ISBN 7-117-05151-5

I. 医... II. ①仇... ②张... III. 影像-诊断-
医用物理学-实验 IV. R445-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第075113号

医学影像物理学实验

主 编:仇 惠 张瑞兰
出版发行:人民卫生出版社(中继线 67616688)
地 址:(100078)北京市丰台区方庄芳群园3区3号楼
网 址:<http://www.pmph.com>
E-mail: pmph@pmph.com
印 刷:北京市增富印刷有限责任公司(天运)
经 销:新华书店
开 本:787×1092 1/16 印张:7.25
字 数:168千字
版 次:2002年11月第1版 2002年11月第1版第1次印刷
标准书号:ISBN 7-117-05151-5/R·5152
定 价:11.00元

著作权所有,请勿擅自用本书制作各类出版物,违者必究
(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

前 言

本书是配合面向 21 世纪课程教材《医学影像物理学》而编写的配套实验教材。本书的编写是依据临床医学影像专业五年制本科生的培养目标，总结 10 年来医学影像专业的教学成果和经验而完成的。编写中充分注意了学科的现状和发展，其中若干实验是以计算机模拟形式给出。实验编写过程中注意了实验内容与理论讲授内容的有机结合，同时也强调了对学生实验仪器、计算机应用能力以及实验结果分析能力的培养。《医学影像物理学》主编张泽宝教授对本书的编写给予了充分的关心、指导和帮助，并同北华大学胡继光教授一起审阅了全部书稿，提出了修改意见。

参加本书编写的人员及分工：新乡医学院刘东华编写实验一；牡丹江医学院徐春环编写实验二、三；重庆医科大学甘平编写实验四；青岛大学医学院童家明编写实验五、六、七、十四；南京医科大学吴小玲编写实验八、十；牡丹江医学院仇惠编写实验九、十二、锦州医学院张岱编写实验七、十一；昆明医学院李维波编写实验十三；北华大学医学院胡继光、张瑞兰、刘迎九编写实验十五、十六、十七、十八、十九。

本书供临床医学影像专业使用，也可供相关专业参考选用。

由于编者水平有限，书中可能存在错误和不当之处，切望使用本书的读者提出宝贵意见。

仇 惠 张瑞兰

2002 年 8 月

目 录

实验一	光电效应及普朗克常数测定	1
实验二	磁共振	7
实验三	脉冲磁共振法测量弛豫时间常数	11
实验四	电子自旋共振	15
实验五	原子核衰变的统计规律	21
实验六	γ 射线的测量	27
实验七	β 射线的测量	30
实验八	放射性表面污染的测定	33
实验九	超声声速的测定——驻波法	35
实验十	A型超声波诊断仪的基本原理及其应用	41
实验十一	单源换能器辐射声场特性的研究及伪像识别	46
实验十二	B型超声波诊断仪的基本原理及其声像图观察	50
实验十三	电子束的聚集与偏转	54
实验十四	照相技术	60
实验十五	数字图像处理(一)	68
实验十六	数字图像处理(二)	75
实验十七	CT计算机模拟实验——图像重建	79
实验十八	CT计算机模拟实验——窗口技术	97
实验十九	CT计算机模拟实验——几种图像后处理技术比较	104

实验一 光电效应及普朗克常数测定

目的

1. 加深对光电效应和光的量子性的理解。
2. 学习验证爱因斯坦光电效应方程的实验方法,并测定普朗克常数。

器材

普朗克常数测定仪(套)。

原理

一、光电效应与爱因斯坦方程

以合适频率的光照射在金属表面上,有电子从表面逸出的现象称为光电效应。观察光电效应的实验如图 1-1 所示。GD 为光电管,K 为光电管阴极,A 为光电管阳极,G 为微电流计,V 为数字电压表,R 为滑线变阻器。调节 R 可使 A、K 之间获得从 $-U$ 到 0 到 $+U$ 连续变化的电压。当光照射光电管阴极时,阴极释放出的光电子在电场的作用下向阳极迁移,并且在回路中形成光电流。光电效应有如图 1-2 所示的实验规律:

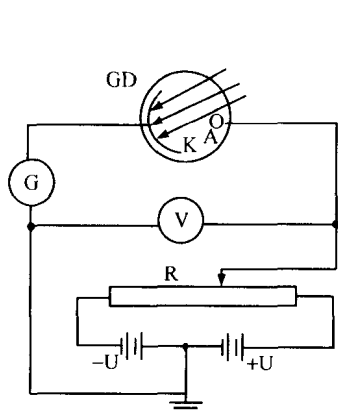


图 1-1 光电效应实验示意图

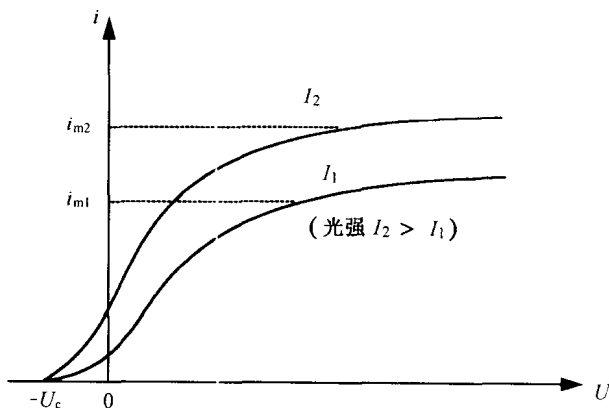


图 1-2 光电管伏安特性

1. 光强一定时,随着光电管两端电压增大,光电流趋于一个饱和值 i_m ,对不同的光强,饱和电流 i_m 与光强 I 成正比。
2. 当光电管两端加反向电压时,光电流迅速减小,但不立即降到零,直至反向电压达

到 U_c 时,光电流为零, U_c 称为截止电压。这表明此时具有最大动能的光电子被反向电场所阻挡,则有

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eU_c \quad (1-1)$$

实验表明光电子的最大动能与入射光强度无关,只与入射光频率有关。

3. 改变入射光频率 ν 时截止电压 U_c 随之改变, U_c 与 ν 成线性关系如图 1-3 所示。实验表明,无论光多么强,只有当入射光频率 ν 大于 ν_c 时才能发生光电效应, ν_c 称截止频率。对于不同金属的阴极, ν_c 的值也不同,但这些直线的斜率都相同。

4. 照射到光电阴极上的光无论怎么弱,几乎在开始照射的同时就有光电子产生,延迟时间最多不超过 10^{-9} s。

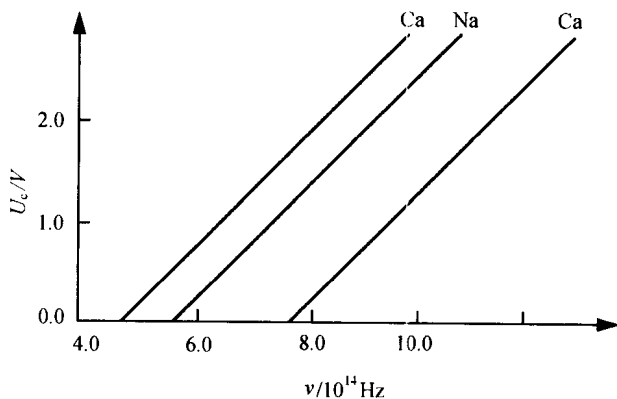


图 1-3 截止电压 U_c 与入射光频率 ν 关系曲线

上述光电效应的实验规律是光的波动理论所不能解释的。爱因斯坦光子假说成功地解释了这些实验规律。它假设光束是能量为 $h\nu$ 的粒子(称光子)组成的,其中 h 为普朗克常数,当光束照射金属时,以光粒子的形式射在表面上,金属中的电子要么不吸收能量,要么就吸收一个光子的全部能量 $h\nu$ 。只有当这能量大于电子摆脱金属表面约束所需要的逸出功 W 时,电子才会以一定的初动能逸出金属表面。根据能量守恒定律有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 + W \quad (1-2)$$

上式称为爱因斯坦光电效应方程。将(1-1)式代入(1-2)式,并且知 $\nu \geq W/h = \nu_c$,则爱因斯坦光电效应方程可写为

$$h\nu = eU_c + h\nu_c$$

$$U_c = \frac{h}{e}(\nu - \nu_c) \quad (1-3)$$

上式表明了 U_c 与 ν 成一直线关系,由直线斜率 k 可求 $h, h = ek$,由截距可求 ν_c 。这正是密立根验证爱因斯坦方程的实验思想。

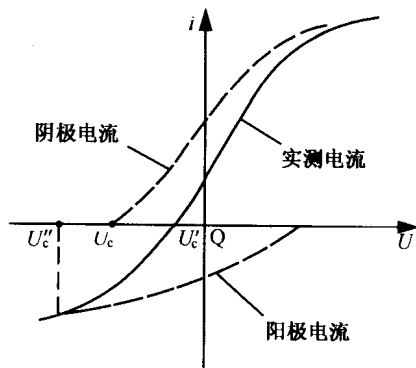


图 1-4 实际测量的光电管的 $I-U$ 曲线

二、实际测量中截止电压的确定

实际测量的光电管伏安特性如图 1-4 所示,它要比图 1-2 复杂。这是由于:

1. 存在暗电流和本底电流 在完全没有光照射光电管的情况下,由于阴极本身的热电子发射等原因所产生的电流称暗电流。本底电流则是由于外界各种漫反射光入射到光电管上所致。这两种电流属于实验中的系统误差,实验时须将它们测出,并在作图时消去其影响。

2. 存在反向电流 在制造光电管的过程中,阳极不可避免地被阴极材料所沾染,而且这种沾染在光电管使用过程中会日趋严重。在光的照射下,被沾染的阳极也会发射电子,形成阳极电流即反向电流。因此,实测电流是阴极电流与阳极电流的叠加结果。这就给确定截止电压 U_c 带来一定麻烦。若用交点 U' 来替代 U_c ,有误差;若用图中反向电流刚开始饱和时拐点 U'' 替代 U_c ,也有误差。究竟用哪种方法,应根据不同的光电管而定。本实验中所用的光电管正向电流上升很快,反向电流很小, U' 比 U'' 更接近 U_c ,故本实验中可用交点来确定截止电压 U_c 。

仪器介绍

仪器主要有光源(低压汞灯、光阑、限流器)、接收暗箱(干涉滤光片、成像物镜、光电管等)以及微电流放大器(机内装有供光电管用精密直流稳压电源)组成。光源与接收暗箱安装在带有刻度尺的导轨上,可以根据实验需要调节二者之间的距离,其结构原理如图 1-5 所示:

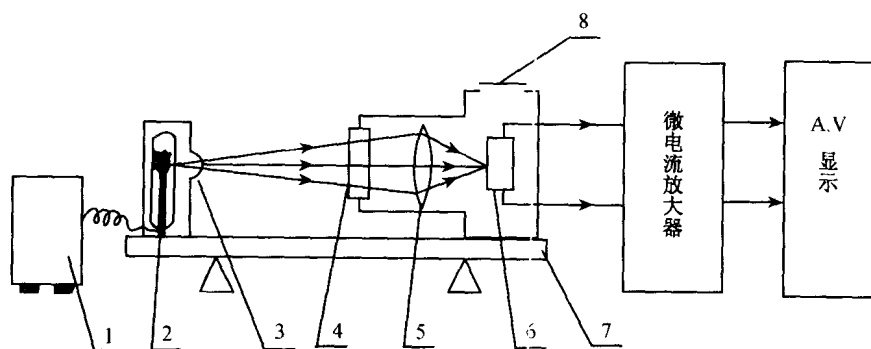


图 1-5 PC- II 普朗克常数测定仪结构图

1. 光源:采用 GP-20Hg 低压汞灯,光谱范围 320.3 ~ 872.0nm,可用谱线 365.0nm、404.7nm、435.8nm、491.6nm、546.1nm、577.0nm、579.0nm。汞灯安装在灯座上并用灯罩遮住。

2. 干涉滤光片:干涉滤光片的主要指标是半宽度和透射率,透过某种谱线的干涉滤光片不应允许其附近的谱线透过。本仪器选用 GP-20Hg 低压汞灯发出的可见光中强度较大的四种谱线,所以仪器配以四种干涉滤光片,透过谱线分别为 404.7nm、435.8nm、546.1nm、577.0nm。干涉滤光片全口径 ϕ 40mm,装在圆形镜框中,有效通光口径为 ϕ 37mm。使用时将它插入接收暗箱的进光口径内以得到所需要的单色光。

3. 物镜:采用专门为此测试仪设计的镜头,旋转接收暗箱前的进光筒。可调节物镜与光电管之间的距离,使汞灯成像在光电管阴极面上。

4. 光电管:采用1997型测 h 专用光电管,光谱响应范围320.0~670.0nm;最佳灵敏波长 $350.0 \pm 200\text{nm}$;577.0nm单色光照射时截止电压与404.7nm单色光照射时截止电压之差为0.960~0.875V,暗电流约 10^{-12}A ;反向饱和电流与正向饱和电流之比小于0.5%。

光电管安装在接收暗箱内。打开暗箱后侧板,松开光电管座螺钉,可调节光电管的左右位置;松开光电管上下紧固螺钉,可调节光电管的上下位置,使灯丝正好落在光电管阴极面中央。

实验时打开接收暗箱顶部观察窗盖板,可观察汞灯在光电管阴极面上的成像情况。安装光电管时,同时打开暗箱侧盖板与顶部观察窗盖,光电管阳极与管座内伸出的两根线(端头已焊在一起)同时焊接后将光电管插入管座,将带有鳄鱼夹的接线夹住光电管顶部的阴极出线。光电管安装好后应按上面介绍的方法调节其高低位置,左右位置一般在出厂时已调好。如图1-6所示。

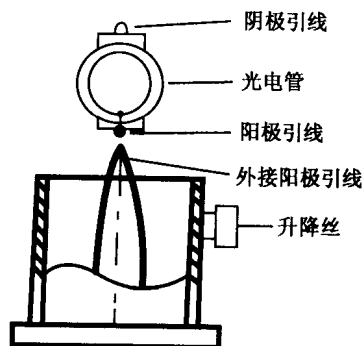


图1-6 安装示意图

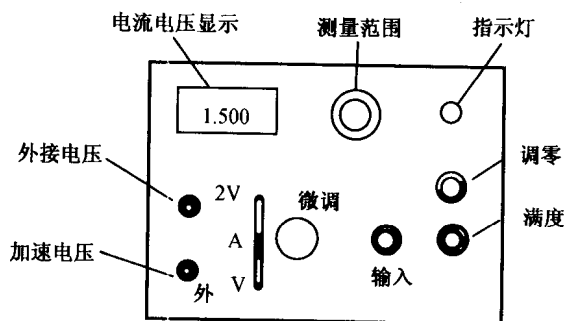


图1-7 微电流放大器

5. 数字式微电流放大器(包括 $-2\text{V} \sim +2\text{V}$ 光电管工作电源):这是一种数字显示式微电流测试仪器,如图1-7所示。电流测量范围 $10^{-8} \sim 10^{-13}\text{A}$,分六档十进变位。开机60分钟后8小时内测量档零点漂移不大于 $\pm 2\%$ 。电压量程为 $-2\text{V} \sim +2\text{V}$ 及 $-200\text{V} \sim +200\text{V}$ 两档;数显 $3\frac{1}{2}$ 位LED数字电表,利用功能选择键分别显示电压值和电流值;光电管工作电源 $-2\text{V} \sim +2\text{V}$,机内供给,精密可调,稳定度小于0.1%。如将外接电缆插入面板“外接电压”插孔,这时机内 $-2\text{V} \sim +2\text{V}$ 电源自动断开,外接电压直接加在电压调节器上,机外输入电压范围 $0 \sim +200\text{V}$ 。

机箱后设有X-Y函数记录仪接线柱,可以与记录仪配合使用,画出光电管 $I \sim U$ 特性曲线。

内容与步骤

一、准备

1. 用专用电缆将微电流仪输入端与接收暗箱输出端接口连接起来,将接收暗箱加速

电压输入端插座与放大器电压输出端插座连接起来,将汞灯座下侧电线与限流器连接好,将微电流仪与汞灯限流器接上电源,打开微电流仪的电源开关及汞灯限流器开关,充分预热(一般为20分钟左右)。

2. 将测量范围旋钮调到“短路”,除去遮光罩,打开观察窗盖,调整光源及物镜位置,使汞灯清晰地成像在光电管阳极圈中央部位。调整好后将遮光罩盖好。

3. 将功能键拨至“A”;旋转“调零”旋钮使放大器短路电流为“00.0”。将“测量范围”旋钮转至“满度”,旋转“满度”旋钮使电流值为“100.0”。然后将“测量范围”旋钮再转至“短路”,用调零电位器调整为“00.0”。

二、测量光电管的 $I \sim U$ 特性曲线、测定截止电压

1. 除去遮光罩,装上波长为404.7nm的滤光片,将电表功能键拨至“2V”,转动电压调节旋钮,使电表显示-2V。将电表功能键拨至“A”,转动“测量范围”旋钮至 10^{-12} 档,这时数字表显示的数值即为该电压下的电流值。

2. 按上述方法从-2V至0V到2V之间选出若干个,测得相对应的电流值,将数值分别填入表1-1。纵坐标以每厘米表示 10^{-12} A,横坐标以每厘米表示0.1V,在方格纸上作出 $I \sim U$ 特性曲线。

3. 由于本仪器所用光电管的暗电流、反向电流很小,一般使用时可近似地将 $I \sim U$ 特性曲线负值段忽略,因此在测试 U_c 时只要将电表功能键拨至“A”,测量范围旋钮拨至“ 10^{-12} ”档,缓慢调节加速电压,使光电流显示为“00.0”。然后将功能键拨至“2V”,这时显示的电压值即为此单色波长的截止电压 U_c 。将数据填入表1-2中。

4. 按上述方法依次换上435.8nm、546.1nm和577.0nm滤色片,分别测得各单色光的 $I \sim U$ 特性曲线和 U_c 值。将数据填入表1-1、1-2中。

表 1-1

470.4nm	$U(V)$						
	$I(\times 10^{-12}A)$						
435.8nm	$U(V)$						
	$I(\times 10^{-12}A)$						
546.1nm	$U(V)$						
	$I(\times 10^{-12}A)$						
577.0nm	$U(V)$						
	$I(\times 10^{-12}A)$						

表 1-2

$\lambda(nm)$	470.4	435.8	546.1	577.0	$k =$
$\nu(\times 10^{14}Hz)$					$h =$
$U_c(V)$					$E =$

三、求普朗克常数并计算实验误差

1. 作 $U_c \sim \nu$ 的实验曲线 在方格纸上以纵坐标表示 U_c , 每厘米代表 0.1V。以横坐标代表频率, 每厘米代表 10^{14} Hz, 作出 $U_c \sim \nu$ 的实验曲线, 它是一条直线。

2. 求普朗克常数并计算实验误差 在上述直线上取 ΔU_c 和相应的 $\Delta \nu$ 值, 求出直线的斜率 $k = \frac{\Delta U_c}{\Delta \nu}$, 由 $h = ek$ 即可求出 h 值。算出实验值与公认值 (6.626×10^{-34} Js) 之间的百分偏差, 将各数值填入表 1-2 中。

注意事项

1. 实验不必在暗室进行。但为了提高测试精度, 应尽量减少光照, 特别不应使光线直射光电管。如果测试环境湿度较大而影响测试精度, 可预先将光电管进行干燥处理。实验过程中应保持光源和光电管间的距离不变。

2. 为延长光电管使用寿命, 光孔应注意随时用遮光罩盖住, 并注意防潮。

3. 滤色片是较贵重的精密器件, 切勿用手或非镜头纸触摸、揩擦玻片和污染玻片。注意玻片不能松动, 务必平整放在窗口上。

4. 本仪器应注意防震、防尘、防潮。汞灯及光电管外壳和聚光镜如沾染尘埃应及时用药棉蘸酒精、乙醚混合液轻擦干净。仪器应置于通风干燥处, 平时应加防尘罩。

思考题

1. 实验时能否将干涉滤光片插到光源的光阑口上? 为什么?
2. 从截止电压 U_c 与入射光频率 ν 的关系曲线, 你能确定阴极材料的逸出功吗?
3. 测定普朗克常数的实验中有哪些误差来源? 实验中如何减少误差?

(刘东华)

实验二 磁 共 振

目的

1. 了解磁共振实验现象及原理。
2. 掌握测核磁旋比的方法。
3. 学会用磁共振精确测定磁场的方法。

器材

磁共振实验仪、射频边限振荡器、频率计、示波器、样品。

原理

自旋不为零的原子核处在恒定磁场 B_z 中时,在外磁场的作用下会发生能级分裂。当入射电磁波的光子能量与核能级分裂的裂距相等时,该原子核系统对这种电磁波的吸收最强,这种现象称为磁共振吸收。

对于氢原子核,即一个质子,如果原来的能级为 E_0 ,则该原子核放在 Z 方向的磁场 B_z 中时,能级分裂为 E_1 和 E_2 两个能级。磁场越大,裂距越大。

$$E_2 - E_1 = \Delta E = g\mu_N B_z \quad (2-1)$$

其中常数 $\mu_N = eh/4\pi m_p$ 称为核磁子, m_p 是质子的质量, e 是质子电荷量, g 是一个与原子核本性有关的无量纲常数,称为 g 因子,对于氢核 $g = 5.5855$ 。

若在垂直于 B_z 方向上加一个频率为 ν ($10 \sim 100\text{MHz}$) 的电磁场 $B_1 \cos 2\pi\nu t$ ($B_1 \ll B_z$), 则当它所对应的能量 $h\nu$ 与能级裂距 ΔE 正好相等时,可发生磁共振。即磁共振的条件为

$$\Delta E = g\mu_N B_z = h\nu \quad (2-2)$$

观察磁共振现象可有两种方法:一种是磁场 B_z 固定,让入射电磁场 B_1 的频率连续变化,当满足(2-2)式时,出现共振峰,称为扫频法;另一种是把频率 ν 固定,而让 B_0 连续变化,称为扫场法。本实验采用扫频法。

仪器介绍

实验装置由样品管、永磁铁、音频调制电源、射频边限振荡器、频率计、示波器等组成,如图 2-1 所示。

1. 样品放在塑料管内,置于永磁铁的磁场中。样品管外绕有线圈,构成边限振荡器振荡电路中的一个电感。

2. 永磁铁提供样品能级分裂所需要的强磁场,其磁感应强度为 B_0 ,在永磁铁上还加

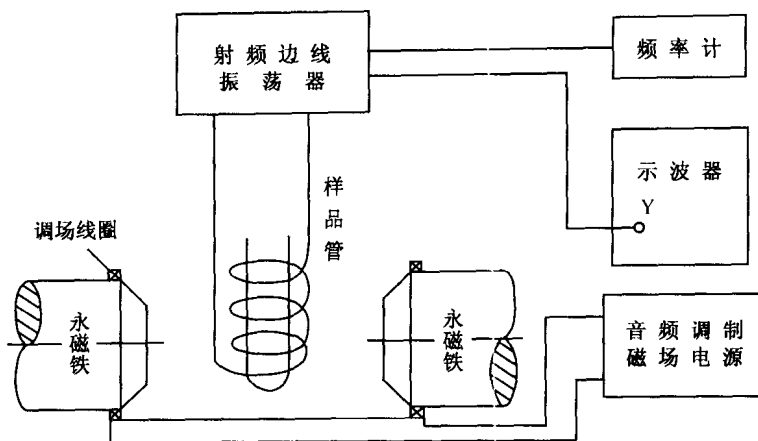


图 2-1 核磁共振实验装置

一个小的音频调制磁场,把 $B_m \sin 2\pi\nu_m t$ 的 50Hz 信号接在永磁铁的调场线圈上 ($B_m \ll B_0$), B_m 值可连续调节。因此磁场中样品处的实际磁感应强度为

$$B = B_0 + B_m \sin 2\pi\nu_m t \quad (2-3)$$

3. 射频边限振荡器因处于稳定振荡与非振荡的边缘状态而得名,它提供频率为 19MHz ~ 25MHz 的射频电磁波,其频率连续可调,并由频率计显示。当样品由于磁共振而吸收能量时,振荡器的输出幅度会明显降低。

4. 检波器与放大器把射频边限振荡器的输出信号进行检波与放大,将它的幅度变化信息输入示波器而显示出来。

根据(2-2)式,满足共振条件的边限振荡器的振荡频率应为

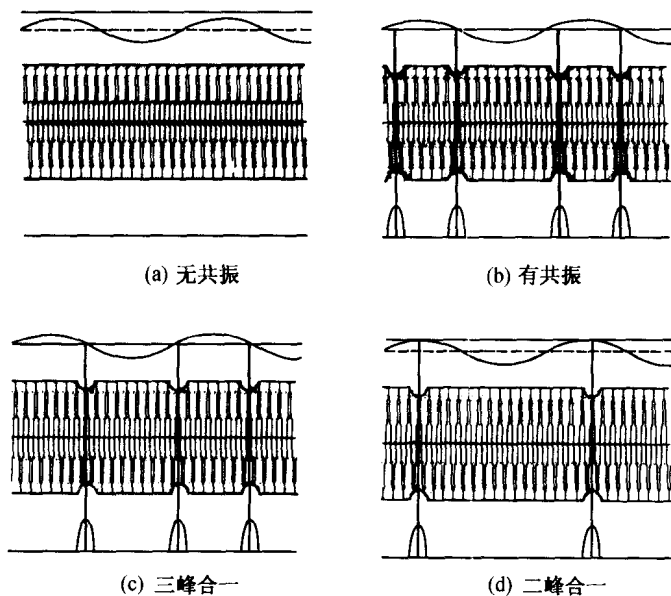


图 2-2 核磁共振实验中的四种不同情况

$$\nu_0 = g\mu_N B_0/h \quad (2-4)$$

如果边限振荡器的实际振荡频率 $\nu \gg \nu_0$, 则共振条件要求样品处在 $B \gg B_0$ 的磁场中。但因为 $B_m \ll B_0$, 故由(2-3)式可知, 实际磁场不可能满足上述条件, 即不可能出现共振, 边限振荡器的输出幅度无变化, 示波器显示的只是一条水平线, 如图 2-2(a) 所示。

若边限振荡器的实际频率 $\nu \approx \nu_0$ (设 $\nu \geq \nu_0$), 则共振条件要求 $B \approx B_0$ (且 $B \geq B_0$)。这可以在符合下式的某些时刻 t 得到满足: $B = B_z = B_0 + B_m \sin 2\pi\nu_m t$ 。在这些时刻, 会发生共振, 即在这些时刻, 边限振荡器的输出振幅下降, 示波器上显示出若干个吸收峰 (B_z 的一个周期内有 2 个), 如图 2-2(b) 所示。

若边限振荡器的实际振荡频率 $\nu = \nu_0$, 则共振条件要求 $B = B_0$ 。于是, 在 $t=0$ 的时刻得到满足。在这些时刻, 会发生共振, 即在这些时刻边限振荡器的输出振幅下降, 示波器上显示出吸收峰, 这些峰是等间隔的, 称为“三峰等间距”的波形, 如图 2-2(c) 所示。这时从频率计读出边限振荡器的频率, 即为 ν_0 , 于是, 可根据(2-4)式算出样品的 g 因子。

内容与步骤

1. 放入 CuSO_4 水溶液, 测量磁场强度(测磁感应强度)。

(1) 将被测样品放入永磁铁缝隙中, 使塑料管垂直在中心位置, 即轴线与稳恒磁场方向垂直。

(2) 调节“边限振荡器”使其振荡, 频率计有所显示。调节粗调与细调, 改变频率 ν , 扫描到共振点时, 共振吸收信号的相应位置发生变化, 出现“相对走动”的现象, 即发生了磁共振。记下此时的共振频率 ν 。

(3) 移动探测线圈在磁场前后位置, 观测信号的变化, 使信号调节在最佳位置。调节射频电流大小或改变扫场幅度, 观测信号与它们的联系。

(4) 按下式计算稳恒磁场的强度 B_0

$$B_0 = 2\pi\nu/\gamma \quad (2-5)$$

式中 γ 为质子 ^1H 的磁旋比, $\gamma = 2.675 \times 10^2 \text{ MHz/T}$ 。 B_0 为所测稳恒磁场值, ν 为射频频率(以 MHz 为单位)。测量磁场的准确程度取决于频率测量的精确性。

2. 用 HF 作样品, 分别观察 ^1H 、 ^{19}F 的共振信号, 并测 ^{19}F 的磁旋比。

完成内容 1 后, 换上 HF 样品。由于 ^{19}F 的磁共振信号比质子 ^1H 弱得多, 所以做实验时要特别细心, 缓慢地增加或降低射频频率, 找出等间隔的共振信号, 测出共振频率 ν_F 及此时的磁场强度 B_F , B_F 值的测定可采用质子 ^1H 磁共振的方法来确定。在找到共振信号后, 可以测出 ^{19}F 的共振频率 ν_F , 保持此时的稳恒磁场值不变, 换上质子 ^1H 样品, 然后缓慢增加射频频率, 找到质子 ^1H 的共振信号, 测出其共振频率 ν_H 。此时 ν_F 和 ν_H 是同一稳恒磁场下 ^{19}F 与 ^1H 的共振频率。根据(2-5)式可以计算出 B_F (即 B_0), 显然: $B_F = B_H = B_0$ 。

由磁共振的条件可知

$$\omega_H = \gamma B_H \quad \omega_F = \gamma B_F$$

则由(2-5)式可得:

$$\gamma_F = (\nu_F/\nu_H)\gamma_H \quad (2-6)$$

3. 观察甘油、血清、蛋白、蛋黄等样品的共振信号, 并画出图形, 比较线宽、高度、前后

尾波有几个。

注意事项

1. 永磁铁提供的稳恒磁场不能任意搬动。
2. 边限振荡器的调节必须缓慢进行。

思考题

1. 什么是磁共振现象？产生磁共振的条件是什么？
2. 为什么要加调制场？

(徐春环)

实验三 脉冲磁共振法测量弛豫时间常数

目的

1. 观察核磁矩在射频脉冲作用下的共振现象。
2. 利用不同的脉冲序列测量弛豫时间 T_1 、 T_2 常数。

器材

脉冲磁共振仪、示波器、样品。

原理

1. NMR 中的弛豫过程及 MR 信号 处于恒定磁场 B_0 中的核自旋系统在射频脉冲的作用下,其宏观磁化强度矢量 M 偏离 B_0 成 θ 角。若脉冲宽度为 t_p ($t_p \ll T_1, T_2$), 则 M 转过的角度与脉冲宽度成正比,常用的射频脉冲有 90° 和 180° 。

以 90° 脉冲激励样品,在弛豫过程中,在接收线圈中得到一个与进动频率相同,其幅值按指数衰减的自由感应衰减(FID)信号,经检波滤去射频后,观察到的 FID 信号是指数衰减的包络线,如图 3-1。由于实验中恒定磁场不可能绝对均匀,则横向弛豫时间常数不是 T_2 而是 T_2^* 。

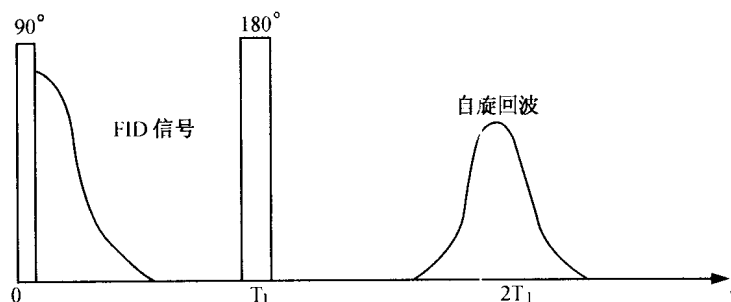


图 3-1 核磁矩对自旋回波序列的响应

在实际应用中,为消除磁场不均匀性对信号测量的影响,常采用两个或多个射频脉冲组成脉冲序列,周期性地作用于核自旋系统。常用的有自旋回波序列、反转恢复序列等。这些脉冲序列的脉宽 t_p 和脉冲间隔时间 T_I 应满足下列条件

$$\begin{aligned} t_p &\ll T_1, T_2, T_I \\ T_2^* &< T_I < T_1, T_2 \end{aligned}$$

使用自旋回波序列后,在 $t = 2T_1$ 处将观察到自旋回波(SE)信号,如图 3-1 所示,由于横向弛豫作用,SE 信号幅度小于 FID 信号幅度,而且脉冲间隔 T_1 越大,SE 幅值越小。

2. 弛豫时间的测量

(1) T_2 的测量:采用 90° — 180° 自旋回波序列,它可以克服磁场不均匀性的影响。

由自旋回波的形成过程可知, T_2 可由回波的峰值与脉冲间隔 T_1 的函数曲线求出,但测量工作量是很大的。在实际应用中,可以采用两个脉冲序列来确定 T_2 。

$$M_y = M_{y_0} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (3-1)$$

根据 T_2 的定义:

由于回波峰值正比于 M_y ,令 $2T_{11} = t_1$,对应的回波峰值为 A_1 ; $2T_{12} = t_2$,对应的回波峰值为 A_2 ,则

$$A_1 = A_0 e^{-\frac{t_1}{T_2}}$$

$$A_2 = A_0 e^{-\frac{t_2}{T_2}}$$

如果选取 t_2 对应的回波峰值满足 $A_2 = A_{1/2}$,对上式两边取对数,整理得:

$$T_2 = \frac{t_2 - t_1}{\ln 2} = 1.44(t_2 - t_1) \quad (3-2)$$

(2) T_1 的测量:采用 180° — 90° 反转恢复序列。首先用 180° 射频脉冲把磁化强度 M 从 z' 轴翻转到 $-z'$ 轴,这时 $M_z = -M_0$, $M_y = 0$,可见在这个状态中,只有纵向弛豫过程而无横向弛豫过程,即没有 FID 信号。当 180° 脉冲过后经 t 时间, M 已恢复到 M_1 的状态,此时在 x' 方向再加一个 90° 脉冲,使 M_1 转到 $-y'$ 轴。在这个 90° 脉冲过后瞬间所观察到的 FID 信号的幅度则与 M_1 成正比且为负值。此后,待恢复到平衡状态时,再不断改变 T_1 值,重复上面的实验,可观察到 FID 的幅度随 T_1 的变化,可正可负。从而得到核磁化强度的幅度和方向与时间 T_1 的关系曲线。它描述了纵向磁化强度的弛豫过程。

由 M_z 的定义及 180° 脉冲后的初始条件: $t = 0$ 时, $M_z = -M_0$,得:

$$M_z = M_0(1 - 2e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (3-3)$$

实验中,总可以找到合适的 T_1 值,使 $t = T_1$ 时, M_z 恰好为零,并由上式求得 $T_1 = T_1 \ln 2$,故

$$T_1 = \frac{T_1}{\ln 2} \quad (3-4)$$

实验中,为减小误差应多次测量 T_1 值。

仪器介绍

自旋回波实验装置如图 3-2 所示,发射机产生的射频振荡频率 ω 要满足样品在外磁场中的共振条件,即 $\omega = \gamma B_0$ 。发射机受脉冲程序器控制,使输入探头回路不是连续的射频振荡,最基本的脉冲程序器要能提供双脉冲序列,可产生 90° — 180° 脉冲序列和 180° — 90° 脉冲序列,其中脉宽 t_p 、脉距 T_1 和脉冲重复周期 T 均可连续调节。 T 比 T_1 和 T_2 大得多,使下一次的脉冲序列施加到样品时,样品中的总磁矩已恢复到热平衡状态。如果脉冲程序器可提供三脉冲序列和多脉冲序列,便可为测 T_1 和 T_2 设计出多种实验方案。探头回路的样品线圈,既是发射机的发射线圈又是接收机的接收线圈,它把脉冲射频