

选做实验内容参考实验中心网站或选做补充讲义

<http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=course:modern>

| 课题 | 教材/资料 | 实验室 |
|--|-----------------------------|-------------------------|
| 夫兰克-赫兹实验 | 《近代物理实验》戴乐山 | 161 |
| 四极杆质谱实验的 SimION 电子光学模拟 | 网上资料 | 146 |
| X 光衍射系列实验扩展内容 | 网上资料 | 145 |
| 光泵磁共振实验扩展内容 | 网上资料 | 157 |
| G-M 计数器特性研究 | 选做补充讲义 | 145 |
| 冉绍尔-汤森效应 | 《近代物理实验》戴乐山 | 161 |
| 氢氘光谱与类氢光谱实验 | 《近代物理实验》戴乐山 | 149 |
| 拉曼光谱 | 选做补充讲义 | 149 |
| 法拉第效应（磁致旋光效应）实验 | 选做补充讲义 | 154 |
| 脉冲 NRM 和 MRI 实验扩展内容 | 网上资料 | 153 |
| Labviews 实验室 | 选做补充讲义/网上资料 | 328 |
| 等离子体物理实验 | 网上资料 | 152 |
| 非线性物理——混沌扩展内容 | 网上资料 | 158 |
| μ 子综合实验 | 网上资料 | 158 |
| Arduino 单片机基础及应用开发 | 网上资料 | 328 |
| X 荧光分析实验 | 网上资料 | 145 |
| 锁相放大器实验 | 网上资料 | 365 |
| 高温超导转变温度测量及样品制备 | 选做补充讲义/网上资料 | 152/161 |
| 热电子能量分布实验 | 网上资料 | 157 |
| 液晶盒制备和表征实验 | 网上资料 | 166 |
| 新能源实验 | 网上资料 | 607 |

目 录

| | |
|-----------------------|----|
| 拉曼光谱实验..... | 2 |
| 法拉第效应实验..... | 15 |
| 超导转变温度的测量..... | 22 |
| GM 计数器和核衰变的统计规律..... | 32 |
| LabVIEW 计算机实测与控制..... | 40 |
| 等离子体实验..... | 45 |
| Arduino 单片机基础..... | 45 |

Raman 光谱实验

实验目的

1. 对拉曼散射的基本原理和实验方法有一个初步了解;
2. 测量 CCl_4 的分子的振动拉曼谱, 对其结构和对称性作分析。

实验原理及仪器介绍

第一部分: 拉曼色散的原理

1 拉曼散射的经典理论

在经典理论中, 光是一种电磁波, 当光入射到物体上时, 光场使得物体的分子或原子产生一个分子偶极矩。其极化强度与电场的关系为

$$P = \alpha E$$

α 被称为分子极化率。它是一个 3×3 的张量。在一级近似中 α 被认为应由两部分组成: 一部分是一个常数 α_0 , 另一部分是分子振动对 α 贡献的总和, 这些简正频率的贡献应随时间做周期性变化, 所以

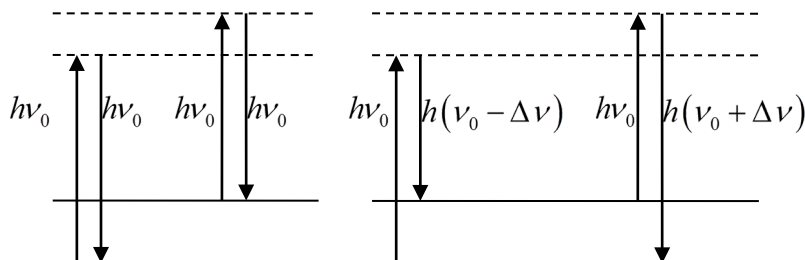
$$\alpha = \alpha_0 + \sum \alpha_n \cos \omega t$$

P 和 E 的方向相同。设入射光是频率为 ω 的单色光, 其电场强度 $E = E_0 \cos \omega t$, 则

$$\begin{aligned} P &= E_0 \alpha_0 \cos \omega t + E_0 \sum \alpha_n \cos \omega_n t \cdot \cos \omega t \\ &= E_0 \alpha_0 \cos 2\pi \nu t + \frac{1}{2} E_0 \sum \alpha_n [\cos 2\pi(\nu - \nu_n)t + \cos 2\pi(\nu + \nu_n)t] \end{aligned}$$

可以看出上式第一项产生的辐射与入射光具有相同的频率 ν , 是瑞利散射光; 第二项为其散射频率分别为 $(\nu - \nu_n)$ 和 $(\nu + \nu_n)$, 前者为斯托克斯拉曼线, 后者为反斯托克斯拉曼线。

利用经典的电磁波理论, 可能得到三条散射光, 但是并不能计算出三条光的强度, 要得到强度要依靠量子力学。



2 拉曼散射的量子力学描述

量子力学中, 能量与光频率的关系为

$$E = h\nu$$

在量子理论中, 将光看成光子。当入射的光子与分子进行弹性碰撞时, 光子与分子均没有能量交换, 于是它的频率保持恒定, 这叫瑞利散射; 同时光子会与分子进行非弹性碰撞, 光子会与分子有能量交换, 分子因此而会产生能级跃迁。如果光子使分子从基态跃迁到激发态, 那么会激发斯托克斯线, 反之就会产生反斯托克斯线。

假如物质是处于温度为 T 的平衡状态, 则分子处在各能态的分布遵循玻尔兹曼统计分布, 所以处于激发态的分子数 N_1 与基态的分子数 N_0 的比为:

$$N_1/N_0 = (g_1/g_0) \exp(- (E_1 - E_0) / kT)$$

其中, g_1 和 g_0 分别为激发态和基态的简并度 $g_1 = g_0 = 1$, 反斯托克斯线强度 I_1 与斯托克斯线的强度 I_0 的比为:

$$I_1/I_0 = (\nu + \nu_0) / (\nu - \nu_0) \exp(- (E_1 - E_0) / kT)$$

3 拉曼散射的偏振态和退偏度

许多物质的分子通常有确定的空间取向, 因此对某一分子而言入射光为偏振光引起的拉曼散射光也是偏振光, 但其偏振方向与入射光的偏振方向不一定一致, 他们之间的关系由微商极化率张量决定。因此对拉曼散射偏振状态的测量, 可以确定分子结构的类型及其相应的振动方式的对称性。对一个多分子体系, 各个分子的空间取向不同, 且无规则分布, 因此即使入射的是平面偏振光, 整体散射光却是非完全偏振的, 这一现象称为散射光的“退偏”。“退偏度”就是描述退偏程度的物理量。

定义散射组态: $G_1(G_2G_3)G_4$, G_1 和 G_4 分别表示入射光和散射光的传播方向, G_2G_3 分别表示入射光的偏振方向和观察散射光时所取的偏振方向, G_1G_4 构成的平面称为散射平面, 它往往作为一个基准面使用, 在测量偏振拉曼光谱时, 用下列符号标记散射光强度时就是以散射平面作为基准面的:

$${}^i I_s(\theta)$$

i 和 s 分别表示入射光和散射光的偏振方向相对于散射平面的取向, 有垂直于散射平面的记作 \perp , 平行于散射平面记作 \parallel , 自然光记作 n , θ 是散射光观察方向和入射光传播方向的夹角。

散射光的退偏度是利用不同散射组态下测得的散射光强度定义的, 自然光入射, 退偏度用 $\rho_n(\theta)$ 表示: 平面偏振光入射时, 退偏度用 $\rho_{\perp}(\theta)$ 和 $\rho_s(\theta)$ 表示, 具体定义分别为:

$$\rho_n(\theta) = \frac{{}^n I_{\parallel}(\theta)}{{}^n I_{\perp}(\theta)}, \quad \rho_{\perp}(\theta) = \frac{{}^{\perp} I_{\parallel}(\theta)}{{}^{\perp} I_{\perp}(\theta)}, \quad \rho_s(\theta) = \frac{{}^{\parallel} I_{\perp}(\theta)}{{}^{\perp} I_{\perp}(\theta)}$$

用微商极化率表示的退偏度为

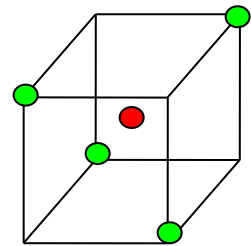
$$\rho_n\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{6\gamma^2}{45\alpha^2 + 7\gamma^2}, \quad \rho_{\perp}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{3\gamma^2}{45\alpha^2 + 4\gamma^2}, \quad \rho_s\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{3\gamma^2}{45\alpha^2 + 4\gamma^2}$$

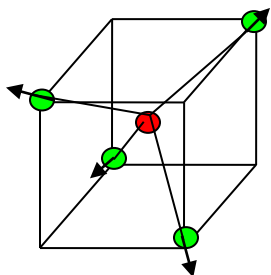
退偏度的测量可以直接判断散射光的偏振状态和振动的对称性。例如, 当退偏度 $\rho_n\left(\frac{\pi}{2}\right) = \rho_{\perp}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \rho_s\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$ 时, 说明各向异性率 γ 等于零, 此时的散射光是完全偏振的; 当 $\rho_{\perp}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \rho_s\left(\frac{\pi}{2}\right) = 3/4$ 和 $\rho_n\left(\frac{\pi}{2}\right) = 6/7$ 时, 说明平均极化率必为零, 这时散射光是完全退偏的; 当退偏度 $\rho_{\perp}\left(\frac{\pi}{2}\right)$ 和 $\rho_s\left(\frac{\pi}{2}\right)$ 取值在 0 和 3/4 之间及 $\rho_n\left(\frac{\pi}{2}\right)$ 取值在 0 和 6/7 之间时, 散射光就是部分偏振光。由于退偏度与微商极化率相联系, 而微商极化率的具体形式又由分子及其对称性质决定, 因此退偏度也反映了分子振动的对称性, 测量退偏度是区分振动对称性质的有力方法。

4 CCl₄ 分子的对称结构及振动模式

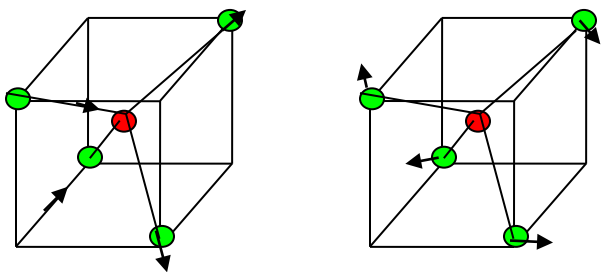
CCl₄ 分子由一个碳原子和四个氯原子构成正四面体结构, 碳原子位于正四面体中心, 四个氯原子位于正四面体的四个顶点。CCl₄ 具有 9 个简正振动方式, 根据分子的对称性, 这 9 个简正振动可归成下列四类, 在同一类中的各振动分子具有相同的能量, 他们是简并的。

- (1) ν_1 或记作 A_1 C 原子不动, 四个 Cl 原子沿 C-Cl 做同相位“呼吸式”振动; 单重简并;

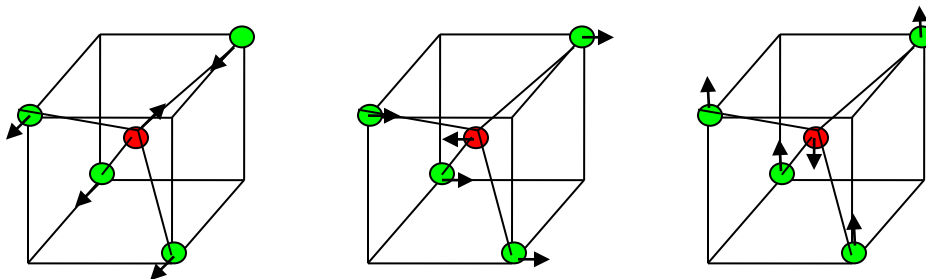




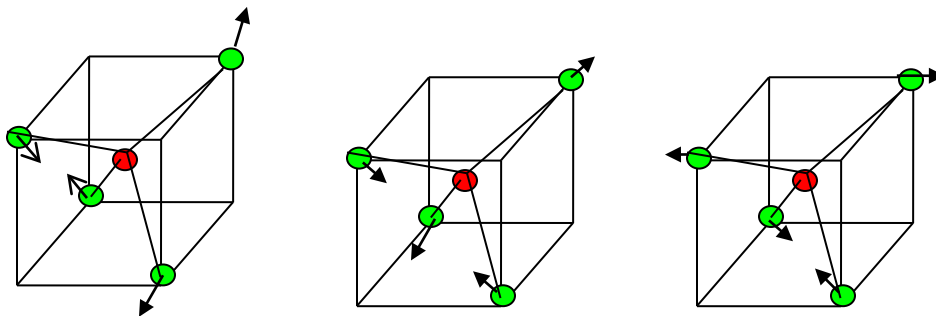
(2) ν_2 或记作 E C 原子不动, 一种是相邻两对 Cl 原子在与 C 原子连线方向上做相反振动, 一种是在与该连线垂直平面上作相反振动, 故是二重简并的;



(3) ν_3 或记作 T_1 C 原子平行于正方体一边运动, 四个 Cl 原子均做与 C 原子反向运动, 由于是三维空间, 故是三重简并的;



(4) ν_4 或记作 T_2 C 原子不动, 两个 Cl 原子沿立方体面对角线做伸缩运动, 另两个在对面作与之位相相反的运动, 三重简并。



每一类简并对应一条拉曼谱线, 故 CCl_4 分子振动拉曼光谱有四条基频谱线, 考虑到振动之

间的相互耦合引起的微扰，有的谱线分裂成两条。根据实验，测得它们的强度依次为 $\nu_1 > \nu_4 > \nu_2$ ， ν_3 。

与 CCl_4 分子结构类似的 AB_4 类分子，由于它们具有相同的空间结构和对称性，故拉曼光谱的基本面貌与特征，包括光谱线数目、强度、退偏度都具有类似性。因而可以利用这种类似性，将一种结构未知的分子的拉曼光谱与结构已知的分子拉曼光谱进行比对，以确定该分子的结构及其对称性。

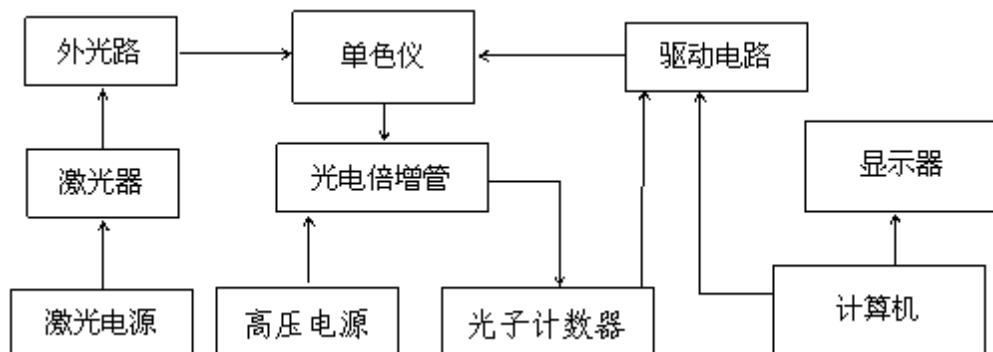
第二部分：激光拉曼实验的光路调节

1 实验仪器

本实验用的是天津市港东科技发展有限公司的生产的 LRS-III 型激光拉曼。其主要技术指标为：

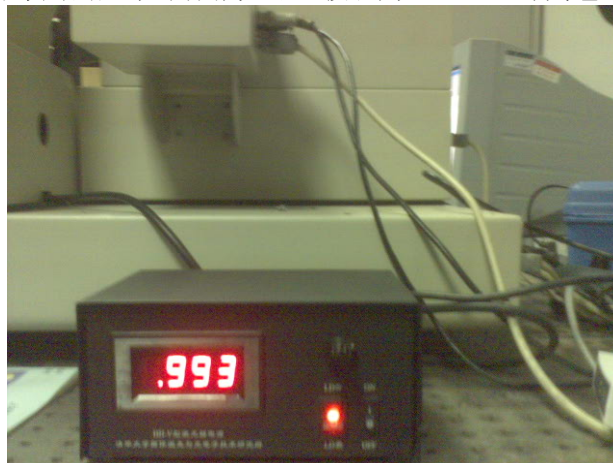
波长范围：200—800 nm（单色仪）
 波长精确度： ≤ 0.4 nm
 波长重复性： ≤ 0.2 nm
 谱线半宽度： ≤ 0.2 nm

2 实验仪器的结构

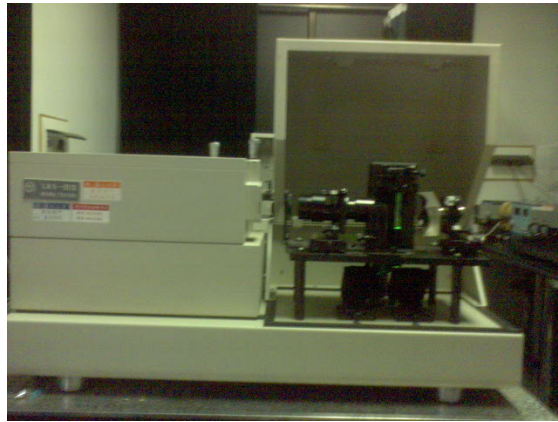
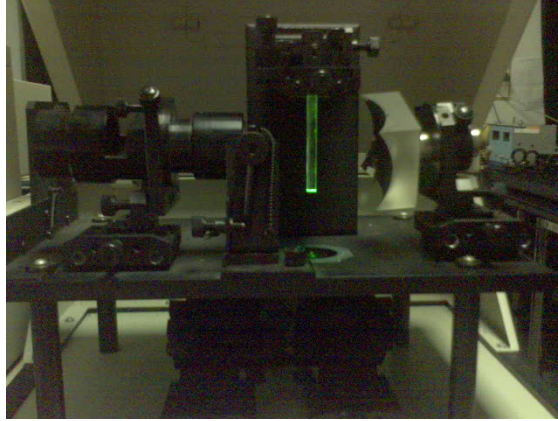


1) 激光器和激光电源

拉曼光谱仪的光源采用的是半导体激光器，波长为 532 nm，功率 ≥ 40 mW



2) 外光路系统

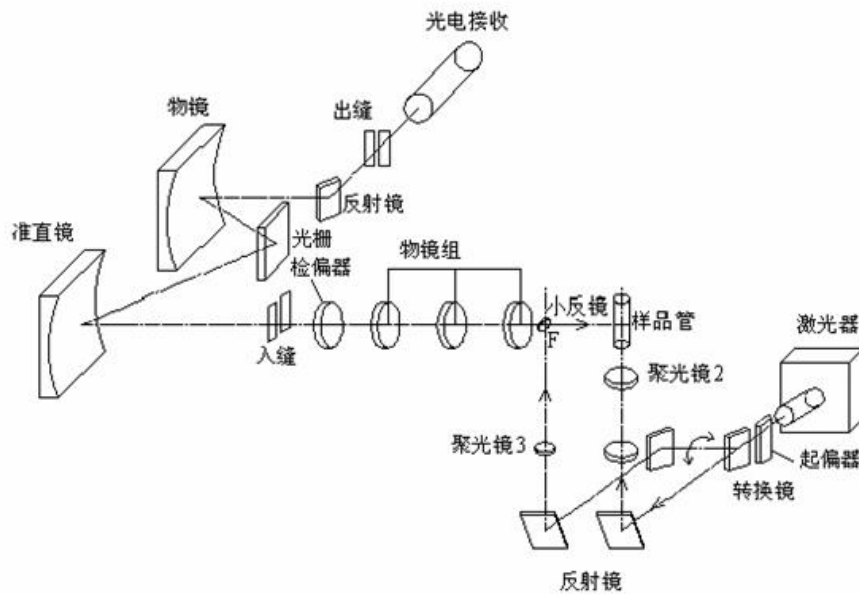


3) 内光路系统

内光路系统包括单色仪，光电倍增管，高压电源，光子计数器等设备。内光路系统在仪器出厂时已经调整完好并密封好，在实验中并不需要调节内光路系统。

2 仪器的调节

一. 光路原理图



二. 激光器电源的调节

LRS-III 型激光拉曼仪的激光器电源详见前面激光器和激光电源图，其主要有激光器电源开关，激光器强度设置，和 LD 开关，其步骤为：

1. 开电源开关；
2. 开 LD 开关；
3. 调整电流旋钮使电流表读数为所需数值（最大电流 $\leq 1.0\text{ A}$ ）。

激光器在开机 5 分钟后输出基本稳定。

LRS-II 型激光拉曼仪的激光器电源只有电源开关，实验中不可以调节激光器输出的强度，开始实验时，打开电源开关即可。

三. 外光路系统的调节

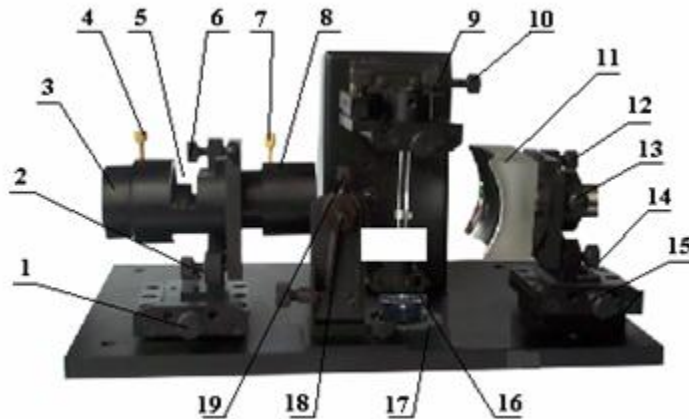


图 3 外光路结构图 I

- | | | |
|------------|--------------|-------------|
| 1、调节螺钉 1； | 2、调节螺钉 2； | 3、聚光镜 1； |
| 4、螺钉 1； | 5、陷波滤波片安装位置； | 6、调节螺钉 3； |
| 7、螺钉 2； | 8、物镜 1； | 9、试管支架； |
| 10、调节螺钉 4； | 11、物镜 2； | 12、调节螺钉 5； |
| 13、螺钉 3； | 14、调节螺钉 6； | 15、调节螺钉 7； |
| 16、波片 | 17、聚光镜 2 | 18、背入射小反射镜； |
| | | 19、螺钉 4； |

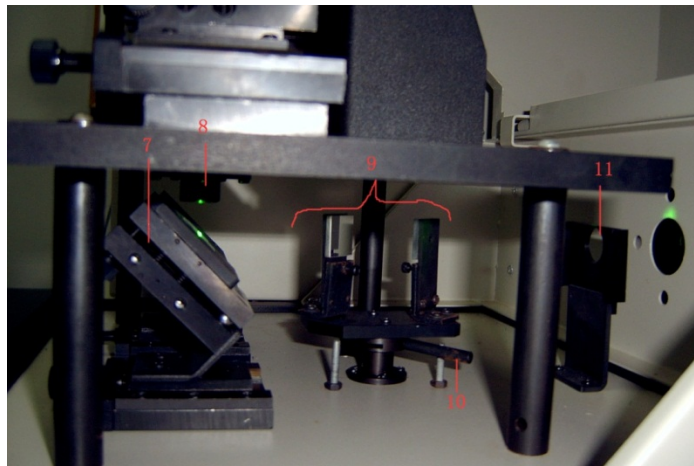


图 4 外光路结构图 II

- | | | | | |
|-----------|----------|---------|--------|----------|
| 7、正入射反射镜； | 8、聚光镜 2； | 9、转换镜组； | 10、扳手； | 11、起偏器架； |
|-----------|----------|---------|--------|----------|

外光路包括聚光、集光、样品架、偏振等部件。外光路中所有部件依靠螺钉调节与固定。

注意：仪器调试过程中应避免激光束直接射入眼中，以免眼睛可能受到的伤害

1. 粗调（等高共轴）

a. 调节螺钉 2, 6, 12, 13, 14 使聚光镜 3—3 (3—3 表示图 3 序号 3, 下同) 轴线、物镜 1 (3—8), 物镜 2 (3—11) 轴线与主机底面外沿线平行, 即使这三条线平行。

b. 调节螺钉 1 和 15, 前后平移物镜筒和物镜 2, 使其轴线与单色仪入射缝的中心在同一直线上。

2. 聚光部分的调整

聚光部件是为了增强样品上入射光的强度。聚光部分的调节根据不同的方法分为一正入射法, 二背入射法。

一、正入射法（测液体）

1) 使用图 4 中的搬手 (4—10), 推动搬手向里面推, 直到推不动, 使得激光能够正入射到 试管架;

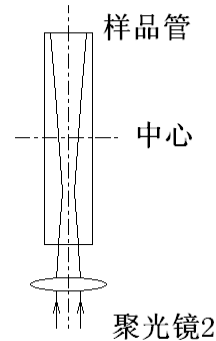
2) 调节正入射反射镜 4—7, 使得激光能垂直射入聚光镜 2 (3—17)。判断光束垂直的方法有:

A. 放一小张白纸在试管支架 3—9 上方, 如果光斑是在圆孔的中心, 则表示垂直入射;

B. 轻吹激光束, 就可以看到激光的路径, 依此判断是否垂直入射。

3) 将样品管装满待测液体后放入试管架之中, 观察激光是否射入液体中心。如果有偏移, 则调节试管架上的四个螺钉直到激光射入液体中心。

4) 为了使激光散射达到最大, 希望激光束的最细部分正好位于样品管中心, 如果发现不是, 可以调节聚光镜 2。在实验时, 因为本来激光束很细, 所以如果没有发现特别的头重脚轻现象, 此步骤可以省去。



二、背入射法（测固体）

1) 使用图 4 中的搬手 (4—10), 推动搬手向外推, 直到推不动。此时, 转换镜组拦截激光, 将激光反射到背入射光路小反射镜中心(图 3-18)。

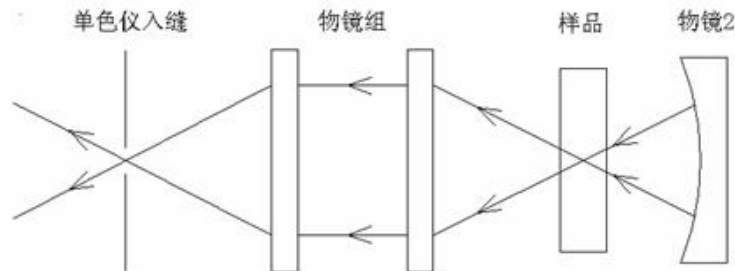
2) 调整背光路反射镜的镜架, 使反射激光束垂直仪器底面并通过聚光镜 3 (图 4—8) 的中心。

3) 将背入射小反射镜插入背入射小反射镜镜架中, 调整位置使激光束打在小反射镜中心且反射光束入射到样品上。调整小反射镜的倾斜角使样品反射回的激光束与入射到样品上的激光束重合。

注意“背入射小反射镜”在做正入射实验时, 必须放置在光路外, 以免影响能量。

3. 集光部分的调节

拉曼散射光比原先瑞利光弱很多, 集光部分的目的是增加收集拉曼光。其主要示意图为



1. 物镜组的调节。首先调节样品散射的光通过物镜组在单色仪入射缝处可以清晰成像。具体方法为将样品管取下, 用纸片挡住物镜 2, 用一个光源如手机放在激光处, 调节透镜组 (聚光镜 1 和物镜 1 可以前后伸缩, 还可以调节螺丝 3—2, 3—6), 使得光源在单色仪入口处清晰成像。这里要注意的是仪器的单色仪缝入口与真正的理论入口还有一段距离, 注意调节的时候不要最

清晰即可。

2. 将样品管重新放在试管架上，如果激光强度很强，应该在入缝口看到三条绿色的直条纹，其中一条较强，两条较弱，使用调节螺丝 3—1 使得较强的那条条纹入射单色仪的入口，如果激光强度不是很强，那么只能看到一条直条纹，直接将其调入单色仪入口即可。这时可能出现一些情况。

1) 条纹上下高度与单色仪不一致，这很多时候是因为物镜组的轴线不水平造成，这时可以调节螺丝 3—6，也可能由于样品架调节不好造成，可以微调样品架的四个调节螺丝，注意只能是微调。如果都不行，那么是前面几步没有调节好造成的，请重新调节整个系统。

2) 看不到直条纹。只是可以微调样品架的四个调节螺丝，但是更多的时候是前面几步没有调节好造成的，请重新调节整个系统。

3. 将挡光的纸片从物镜 2 前拿开，调节物镜 2 会出现另外的三条直条纹(激光弱时只有一条)，使用调节螺丝 3—15，继续调节其中最亮的条纹与原先最亮的重合。

四. 其它部分的调节

1. 单色仪入缝、出缝的调节

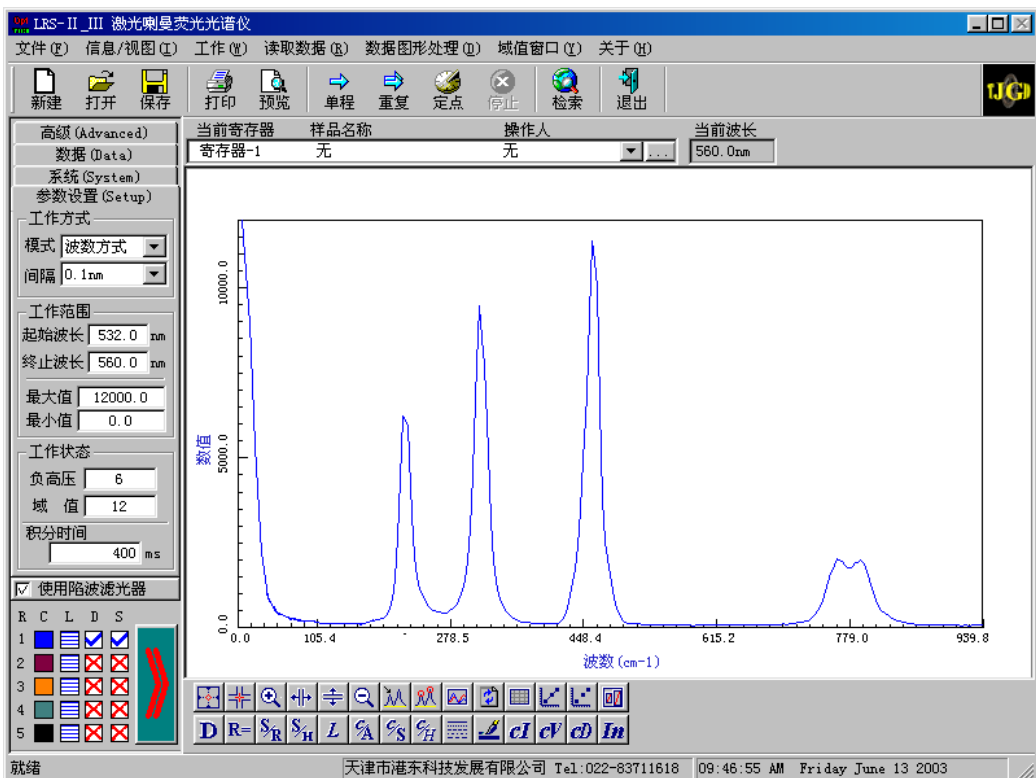
单色仪的入/出缝的宽度由单色仪旋钮控制。狭缝宽度范围为 0-2 mm 连续可调，示值精度 0.01 mm/格。读数方法与螺旋测微仪相同。宽度与样品的激光透过率有关。如果透光率高的，缝可以小一些。如果透光率小，则缝宽相对的大一些，以此减小杂光的影响。如果一开始不知道透光率如何，那么先调一个中等的宽度，看实验的数据再调整。

2. 532 nm 波长陷波滤波片

532 nm 波长陷波滤波片对实验的数据没有太大的影响，但是因为 532 nm 的激光强度很强，它可以保护单色仪。安放位置为 3—5。

第三部分：辅助计算机软件的设置与应用

打开“LRS-X 拉曼荧光光谱仪”软件。在数据测量时，必须先检验光路系统是否调节正确，最好的办法就是测量一下数据图形是否跟理论的图形一致，其实如果光路调节得完好，数据的测量就非常的简单。而实验的重点和难点就在光路的调节，所以需要频繁地检验光路系统。为了保证质量的前提下提高效率，所以检验设置的参数与正式测量记录数据时的参数会有一些不同。



具体的步骤：（以下的数据以 CCL4 为例）

- 1) 重新初始化，在打开软件后会弹出提示对话框，按“取消”重新初始化波长数据；
- 2) 在软件的左侧有“高级”、“数据”、“系统”和“参数设置”几项，一般需要我们设置的是在“参数设置”里面。包括：
 - A. 模式。模式有波数方式和波长方式；
 - B. 间隔。有 1.0 nm、0.5 nm、0.2 nm 和 0.1 nm。检验光路调节是否完好时，一般用 0.5nm、0.2 nm。在正式测量时一般用 0.1 nm 来提高精度；
 - C. 起始波长，终止波长。在检验时，起始波长一般设置为 532 nm，而终止波长为 550 nm~560 nm。主要是检验 532 nm 主峰的右侧是否与理论的相符。在正式测量数据时，以 532 nm 为中心，前后间隔 20~30 nm。
 - D. 最大值，最小值。最小值一般设置为 0，最大值视情况而定。如果激光的光强较强要设定高一些，激光弱要设低一些。具体的如果第一次测量的数据的峰较矮，则将最大值设定小一些。如果测量出来的数据都比最大值大，可以先保存，再打开图形，用下方的工具截取数据，来确定最大值的设定，原则是除 532 nm 主峰外，其它的峰尽可能的清晰显示；
 - E. 负高压。提供给光电倍增管的工作高压，大小设 1~8 档。实验时，一般设置为 7/8；
 - F. 域值。范围为 1~256 档。一般需要在“阈值窗口”中测定。
 - G. 积分时间。积分时间用来设置采样时的曝光时间。设置的大小会影响数据采集的时间，参数设置大则数据采集的时间长。一般为 300 ms 左右。
- 3) 数据采集

在参数设置完毕后，利用“单程扫描”进行数据的采集。下拉菜单：工作一>单程扫描或者工具栏：主工具栏一>单程。测出的数据可能出现以下几种情况。

- 1) 数据与理论的图形相差很大，没有任何拉曼散射峰。这可能是两种情况造成的：
 - A. 光路系统没有调整好。这时需要重新调整整个光路系统；
 - B. 532 nm 偏移较大。单色仪在使用一定时间后，532 nm 的主峰会有一定的偏移。这时加

大起始波长和终止波长再重新进行测量。但是需要指出的是，一般主峰的偏移非常小，不会大到使散射峰偏移出测量区域。所以遇到观察不到拉曼散射峰的情况，首先检查的原因是光路系统没有调节好

2) 数据跟理论的相差不大，这时利用“定点扫描”对光路系统进行微调。

4. 定点扫描

下拉菜单：工作—>定波长扫描

工具栏：主工具栏—>定点

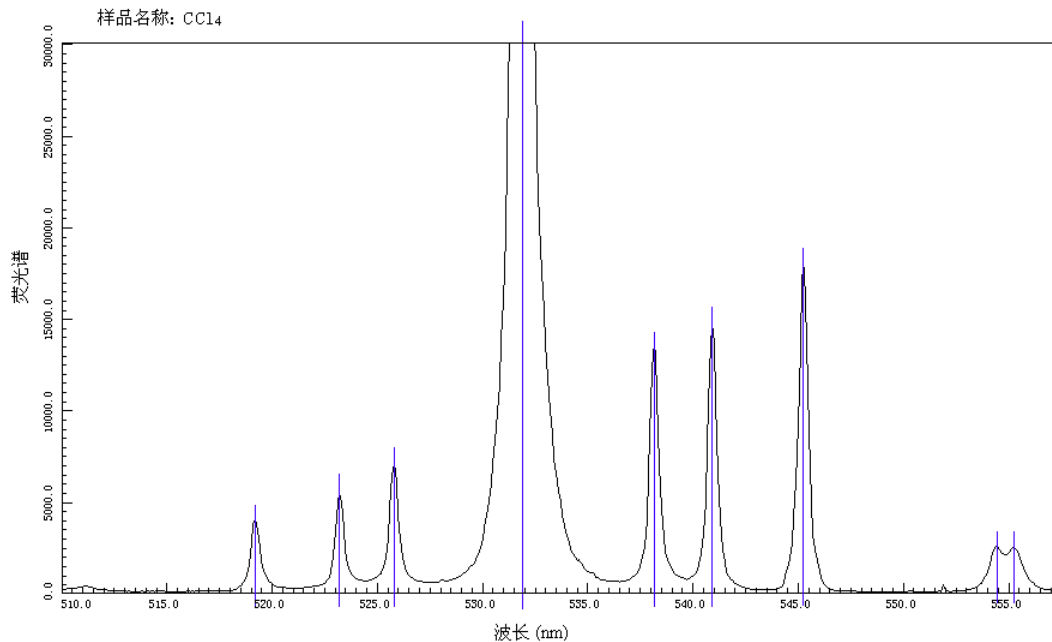
定点扫描是对同一波长下对入射光的强度进行扫描。如果在检验后发现数据图形跟理论图形差不多，那么说明光路系统调节的基本可以。这时可以利用“定点扫描”对光路进行微调，来测量更好的实验数据。具体是用软件下方的数据点采集工具读取其中一个散射峰的波长，以此作为定点扫描的波长，然后逐个调节光路（主要是调节螺丝）来确定入射的激光强度最强。

完成了以上的几步，就可以得到良好的实验数据了。

如果要测量的样本不知道怎么设置，也不清楚他的理论的图形，那么只要观察在定点扫描前的检验图样有没有一些峰，如果有，就说明光路系统调节基本正确，因为一般如果光路没调整好，只会出现 532 nm 的主峰而没有其它峰。然后再进行定点扫描即可。

第四部分：一些文献的数据图形

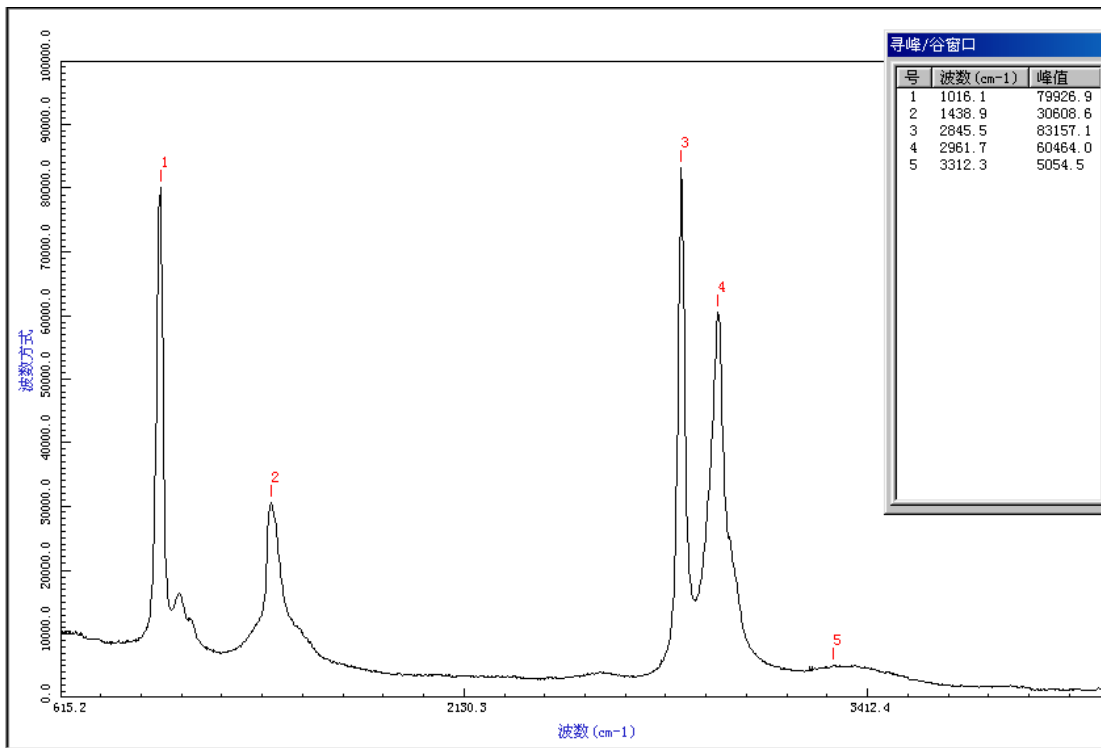
CCl₄ 的振动拉曼谱



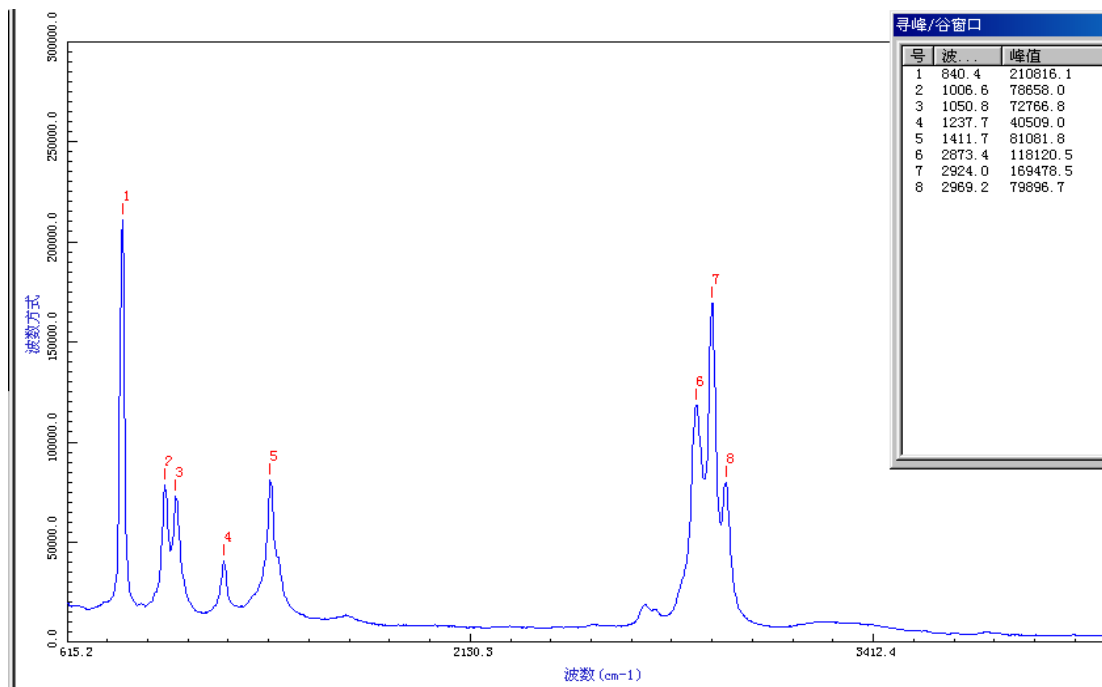
波长标度模式下，采用的域值为 24（阈值窗口测量值），积分时间 300 ms，单色仪入射缝、出射缝均为 0.15 mm 宽，负高压 7。

乙醇和甲醇混合液的拉曼光谱研究

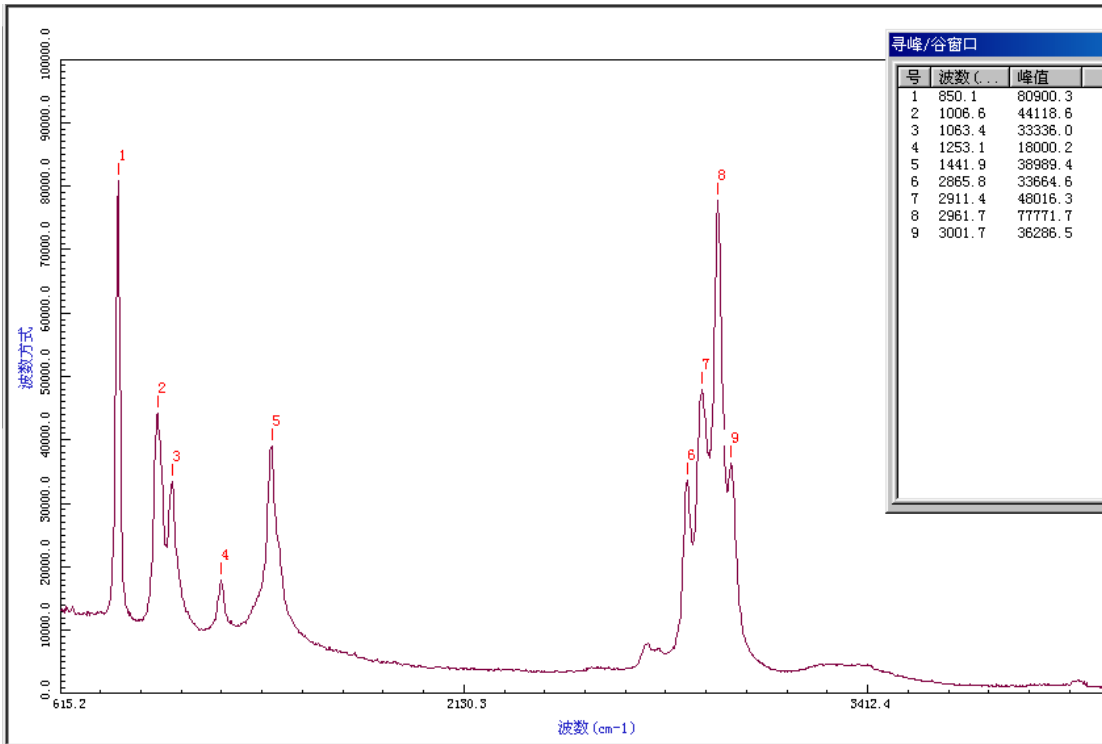
参数设置为狭缝宽度为 0.10 mm，积分时间为 600 ms，间隔 0.1 nm，域值 24（阈值窗口测量值），负高压 7。



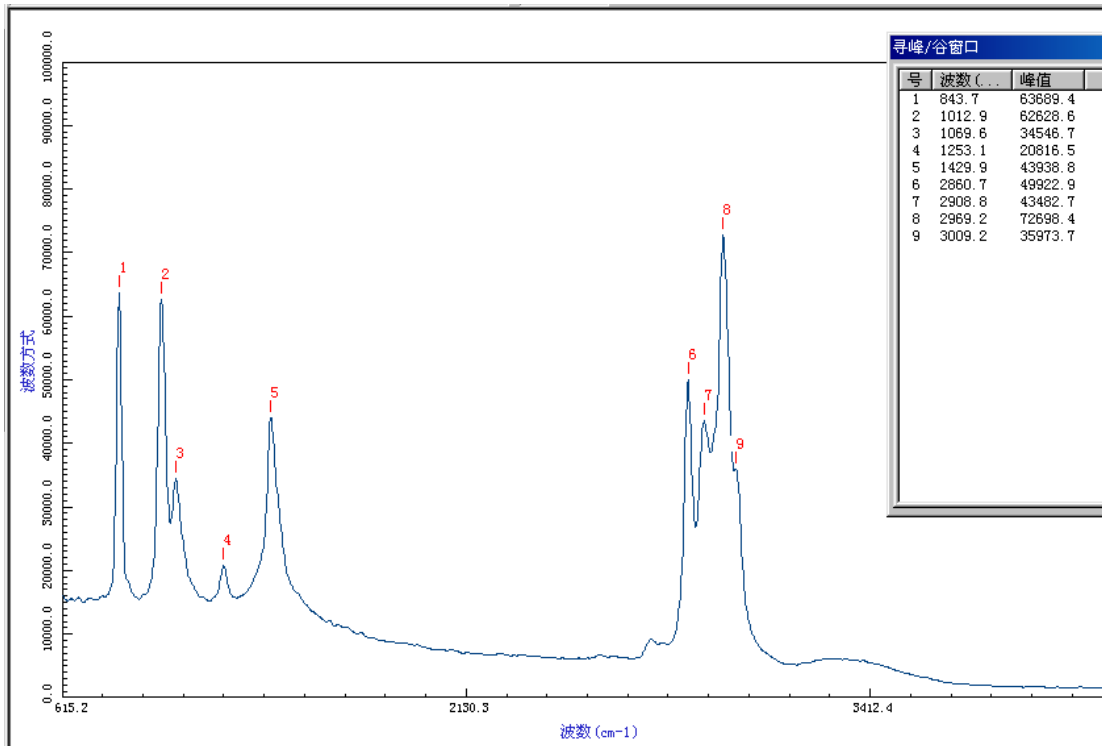
纯甲醇的拉曼光谱



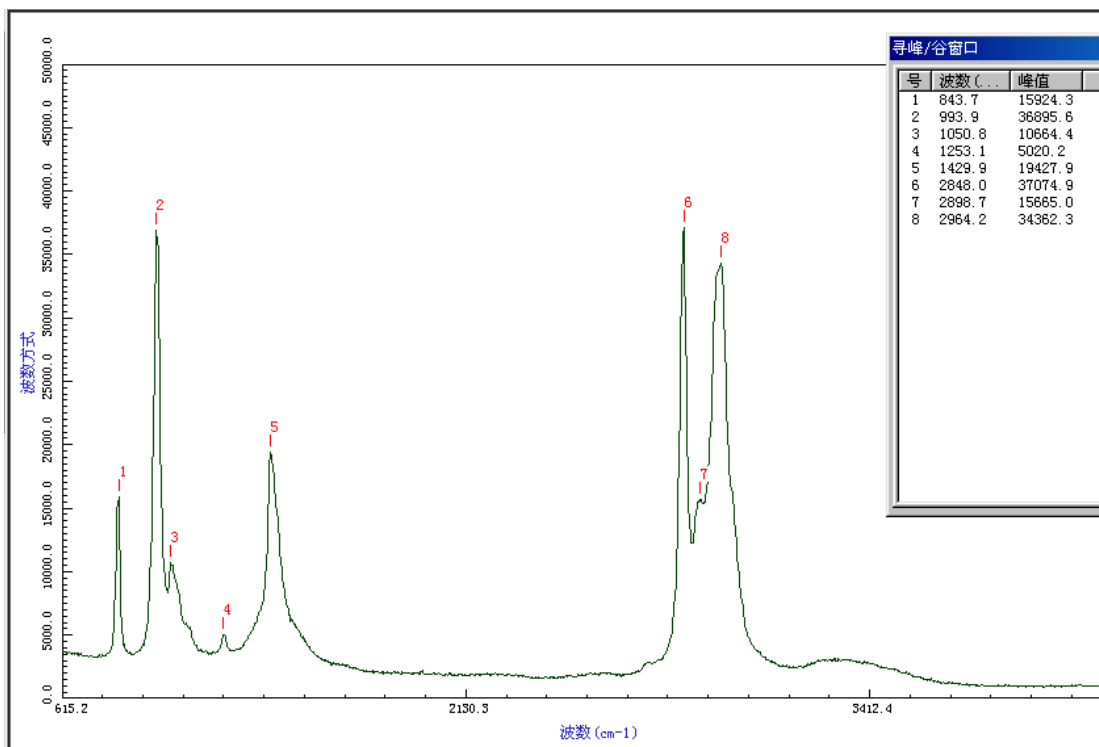
纯无水乙醇的拉曼光谱



25%浓度的甲醇溶液



50%浓度的甲醇溶液



75%浓度的甲醇溶液

实验内容

1. 测量 CCl_4 分子的振动拉曼散射谱，要求完整记录包括瑞利线，斯托克斯线和反斯托克斯线；
2. 测量 CCl_4 分子偏振拉曼谱，用退偏度分析振动的对称性质；
3. （选作）测量无水乙醇，甲醇的拉曼谱。

参考文献

1. 吴思诚等. 《近代物理实验》(第三版): 北京大学物理系近代物理实验室, 高等教育出版社.
2. 王海燕, 张仲秋, 赵迎春, 王明辉. 拉曼光谱偏振特性的研究, 大学物理, 2003年11期.
3. 苏汝铿. 《量子力学》(第二版), 高教出版社.
4. 谭红琳、李志东等. 乙醇、甲醇、食用酒及工业酒精的拉曼光谱测定, 云南工业大学学报, 1999年02期.

法拉第效应

光与电磁的相互作用是一类重要的物理现象，即磁光效应。磁光效应具有下面几种现象：

1. 塞曼效应：把具有光辐射的介质原子放在磁场中，原子光谱发生分裂。
2. 佛埃特效应：在磁场作用下，平面偏振光沿着垂直于磁场方向通过置于磁场中的透明介质，产生光的双折射现象。
3. 法拉第效应：在磁场的作用下，平面偏振光沿着磁场方向通过置于磁场中的透明介质，光的偏振面发生旋转。

法拉第效应属于磁光效应中的一种。法拉第效应有着多方面的应用，如物质分析，电工测量技术中的电流、磁场的测量，激光技术中的光波隔离器以及激光通信、雷达技术中的光频环形器，调制器等。

一、实验原理

1845年，英国科学家法拉第（M. Faraday）在研究光学现象与电磁现象之间的联系时，发现当一束平面偏振光沿磁场方向穿过磁场中的透明介质时，光的偏振面发生了旋转，其旋转的角度正比于磁感应强度及光波通过物质的路程。这种现象叫做磁致旋光效应或法拉第效应。这个发现在物理学史上有着重要的意义，这是光学过程与电磁过程有密切联系的最早证据。之后费尔德（Verdet）对许多介质的磁致旋光进行了研究，发现了法拉第效应在固体、液体和气体中都存在。

1、在磁场作用下介质的旋光作用

在磁场作用下，处于磁场中的物质呈现各项异性，其光轴方向为沿着磁场的方向。当一束平面偏振光沿着磁场方向通过磁场中介质的时候，便会产生如图1所示的情形：

图中 E 表示平面偏振光的电矢量， ϕ 表示旋转角， D 表示介质厚度。

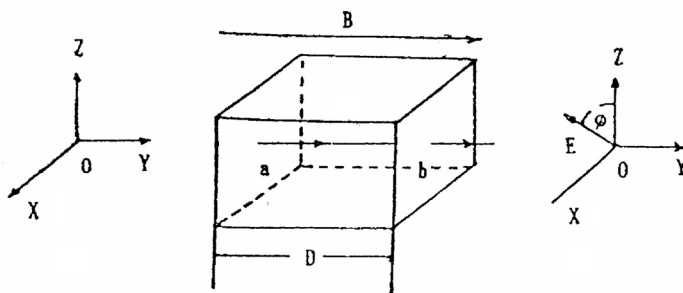


图1 平面偏振光沿磁场 B 通过介质

设平面偏振光的电矢量为 E ，角频率为 ω ，研究问题时我们可以把 E 看成两个圆偏振光成份（左旋圆偏振光 E_L 和右旋圆偏振光 E_R ）的矢量合成。在磁场 B 作用下通过介质时，我们可以认为 E_R 传播速度比 E_L 慢，那么通过介质后 E_R 和 E_L 之间将产生相位差 θ ，合成矢量则旋转一个角度 ϕ ：

$$\phi = \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

这就是说，在磁场 B 的作用下，一束平面偏振光沿着磁场方向通过介质后，它的电矢量的振动方向旋转了一个角度，也就是该平面偏振光的偏振面旋转了一个角度。

设介质的厚度为 D ， E_L 的传播速度为 v_L ， E_R 的传播速度为 v_R 则有：

$$\theta = \omega(t_R - t_L) = \omega \left(\frac{D}{v_R} - \frac{D}{v_L} \right) = \frac{\omega D}{c} (n_R - n_L)$$

$$\phi = \frac{\omega D}{2c} (n_R - n_L) \quad (2)$$

其中 n_R 为在磁场 \mathbf{B} 作用下，右旋圆偏振光通过介质的折射率， n_L 左旋圆偏振光通过介质的折射率， c 为真空的光速。

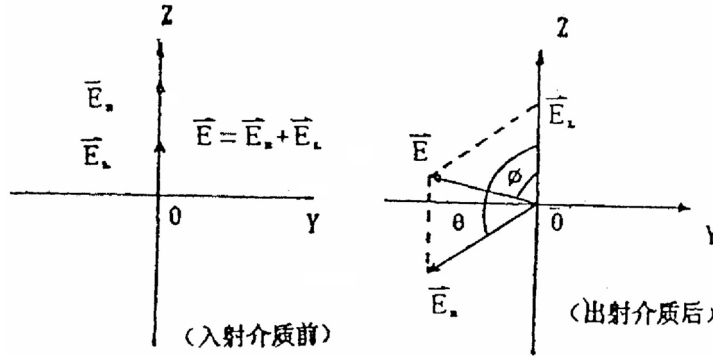


图2 在波振面内平面偏振光电矢量的旋转

2、法拉第旋光角的计算：

由量子理论知道，介质中原子的轨道电子具有磁偶极矩 μ ：

$$\mu = -\frac{e}{2m} L \quad (3)$$

其中 e 为电子电荷， m 为电子质量， L 为电子轨道角动量。

在磁场 \mathbf{B} 作用下，一个电子磁矩具有势能 V ：

$$V = -\mu \cdot B = \frac{e}{2m} L \cdot B = \frac{eB}{2m} L_{\text{轴}} \quad (4)$$

其中 $L_{\text{轴}}$ 为电子轨道角动量的轴向分量。

在磁场 \mathbf{B} 作用下，当平面偏振光通过介质时，光子与轨道电子发生交互作用，使轨道电子发生能级跃迁，跃迁时轨道电子吸收角动量 $\Delta L = \Delta L_{\text{轴}} = \pm \hbar$ ，跃迁后轨道电子动能不变，而势能则增加了 ΔV ：

$$\Delta V = \frac{eB}{2m} \Delta L_{\text{轴}} = \pm \frac{eB}{2m} \hbar \quad (5)$$

当左旋光子参与交互作用时：

$$\Delta V_L = \frac{eB}{2m} \hbar \quad (6)$$

当右旋光子参与交互作用时：

$$\Delta V_R = -\frac{eB}{2m} \hbar \quad (7)$$

我们知道，介质对光的折射率是光子能量 ($\hbar \omega$) 的函数：

$$n = n(\hbar \omega) \quad (8)$$

其函数形式取决于介质的轨道电子能级结构。

可以认为，在磁场作用下，具有能量为 ($\hbar \omega$) 的左旋光子所遇到的轨道电子能级结构，等

价于不加磁场时能量为 $(\hbar\omega - \Delta V_L)$ 的左旋光子所遇到的轨道电子能级结构。因此有:

$$n_L(\hbar\omega) = n(\hbar\omega - \Delta V_L)$$

或

$$n_L(\omega) = n\left(\omega - \frac{\Delta V_L}{\hbar}\right) \approx n(\omega) - \frac{dn}{d\omega} \cdot \frac{\Delta V_L}{\hbar} = n(\omega) - \frac{eB}{2m} \cdot \frac{dn}{d\omega} \quad (9)$$

同理:

$$n_R(\hbar\omega) = n(\hbar\omega - \Delta V_R)$$

或

$$n_R(\omega) = n\left(\omega - \frac{\Delta V_R}{\hbar}\right) \approx n(\omega) - \frac{dn}{d\omega} \cdot \frac{\Delta V_R}{\hbar} = n(\omega) + \frac{eB}{2m} \cdot \frac{dn}{d\omega} \quad (10)$$

把 (9) 和 (10) 代入 (2) 得到:

$$\phi = \frac{DBe}{2mc} \cdot \omega \cdot \frac{dn}{d\omega} \quad (11)$$

因为 $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$, 代入 (11) 得,

$$\phi = -\frac{DBe}{2mc} \cdot \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (12)$$

或

$$\phi = V(\lambda) \cdot D \cdot B \quad (13)$$

$$V(\lambda) = -\frac{e}{2mc} \cdot \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (14)$$

$V(\lambda)$ 称费尔德常数, 它反映了介质材料的一种特性。

公式 (12) 和 (14) 适用于 MKS 制, B 的单位为韦伯/米², 1 韦伯/米²=10000 高斯。

对于 CGS 制, 则有

$$\phi = -\frac{DBe}{2mc^2} \cdot \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (15)$$

$$V(\lambda) = -\frac{e}{2mc^2} \cdot \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (16)$$

公式 (12) 和 (15) 就是法拉第效应旋光角的计算公式。它表示法拉第旋光角的大小和介质厚度成正比, 并且和入射光的波长及介质的色散有密切关系。

表 1 几种材料的费尔德常数 (单位:弧分/特斯拉·厘米)

| 物质 | T/°C | λ / nm | $V / [(\text{')}\cdot\text{T}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}]$ |
|-------|------|----------------|---|
| 空气 | 0 | 580 | 6.27×10^{-2} |
| 一氧化氮 | 0 | 580 | 5.8×10^{-2} |
| 水 | 20 | 580 | 1.3×10^2 |
| 甲醇 | 20 | 580 | 0.9×10^2 |
| 水晶 | 20 | 580 | 1.7×10^2 (垂直 c 轴) |
| 重火石玻璃 | 20 | 580 | $(0.8-1.0) \times 10^3$ |

3. 法拉第效应的特性:

法拉第效应的旋光现象与晶体或溶液的旋光现象有明显的区别。对于旋光性的晶体或溶液, 当平面偏振光通过介质后被反射回来沿相反方向再度通过该介质, 其出射光的偏振面仍为原入射

介质前的偏振状态，旋光角相消为零。

对于法拉第效应，情况就不同了。当偏振光沿磁场方向通过介质后被反射回来沿相反方向再度通过该介质，其出射光的偏振面旋转角度却增加一倍。这就是法拉第效应的特性。利用这一特性，可以使光线在介质中往返数次，从而使旋转角度加大。这一性质使得磁光晶体在激光技术、光纤通信技术中获得重要应用。

表 2 若干旋光玻璃的旋光特性

| 玻 璃 | 波 长 $\lambda/\mu\text{m}$ | 温 度 T/K | 费尔德常数 $V/^\circ\cdot\text{T}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ | 吸收系数 α/cm^{-1} | 可用波段 μm |
|---------------------|------------------------------|---------------------|--|---------------------------------|-----------------------|
| 特重铅玻璃 | 0.7 | 300 | 7.1×10^3 | 0.01 | 0.54—2.0 |
| Schott SFS-6 | 1.0 | 300 | 3.2×10^3 | 0.006 | |
| 特重铅玻璃 | 0.633 | 300 | 5.3×10^3 | <0.01 | 0.45—2.0 |
| Schott SF-6 | | | | | |
| 铈磷酸盐玻璃 | 0.5 | 300 | -0.326×10^4 | | 0.4—2.0 |
| | | 24 | -2.57×10^4 | | |
| Ce ³⁺ -P | 0.7 | 300 | -0.132×10^4 | | |
| 铌钽硅酸盐玻璃 | 0.633 | 300 | -0.251×10^4 | 0.029 | 0.55—2.0 |
| | HOYA FR-5 | 1.06 | -0.083×10^4 | 0.009 | |

二、实验装置

1、实验装置简介

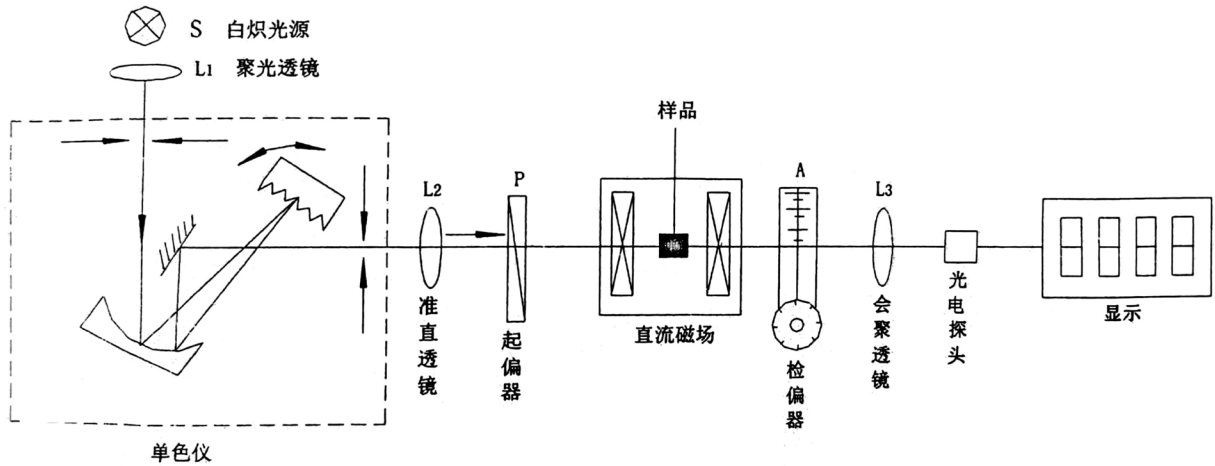


图 3 法拉第效应实验装置图

图 3 所示为实验装置示意图。LMG-II 型晶体磁光效应仪由光栅单色仪、电磁铁、光源、透镜、样品、起偏器、测角仪（包括检偏器）、光电接收、电源、特斯拉计、导轨、支架等组成。

2、各部分功能及主要技术参数

- (1)光栅单色仪：波长范围：200-800 nm，狭缝：0.15 mm 和 0.3 mm 可调等；
- (2)电磁铁：采用电工纯铁做成磁路，磁极柱直径 $\Phi 40$ mm，磁路中通光孔直径为 4 mm，以保证入射光的光轴方向与磁场 B 的方向一致。磁极间距为 9 mm。给其励磁电流，产生相应的磁感应强度。磁场强度由配套的特斯拉计测量；
- (3) 样品介质有两种。一种为铅玻璃 ZF₇， $\Phi 6 \times 8$ mm（在 1 T 磁场下，红光~6.5 nm 的旋光角约为 5° ）；一种为进口的磁旋光高性能玻璃 MR3-2， $\Phi 5 \times 8$ mm（在 1 T 磁场下，红光~6.5 nm 的旋光角约为 15° ）。样品固定在样品架上；
- (4)起偏器：360° 刻度值，1° 分辨率；
- (5)测角仪：具有刻度值的检偏器，360° 的刻度值，附有 2' 的游标；
- (6)光电接收：接收透过检偏器的光强。光电二极管响应时间小于 10^{-7} /s，光谱范围 0.4-1.1 μm ；
- (7)电源：具有四个功能，一、为电磁铁提供励磁电流，输出电流连续可调。二、为光电接收提供直流电源，并把接收到的光强信号转换为相应的电压值。三、光源供电。四、特斯拉计：测量磁极之间的磁感应强度，量程 0- ± 2 T，分辨率为 0.0001 T。

3、实验装置的调整

(1) 光源系统

光源 S，通过聚光透镜 L1 进入光栅单色仪后，从出射缝可获得 400 nm-800 nm 的准单色光，出射光波波长可从单色仪上直接读出，出射光经准直透镜 L2 后变为准平行光，再经过起偏器 P 后成为平面偏振单色光。

(2) 旋光角的检测系统

旋光角的检测系统用来测量旋光角度，由检偏器 A、会聚透镜 L3、光电二极管 D 及数字显示组成。旋光角由检偏器 A 读数，分辨率为 2'。光强测量由光电二极管 D 接收后转换为电压，送至数显表上以监测透射光的相对强度。

(3) 具体调节步骤如下：

- a、预热，接通仪器后面板上的电源及光源电源，预热几分钟；
- b、调节单色仪的波长鼓轮，使其输出可见光；
- c、放置准直透镜 L2，使单色仪出射光为准平行光；
- d、调整电磁铁、导轨和单色仪的位置，使光通过磁路中的通光孔后放入样品；
- e、放置起偏器 P、检偏器 A、会聚透镜 L3 及接收光电二极管 D；
- f、把电源前面板上的功能开关置于基准位置，并将检偏器的读数调为零，旋转起偏器 P，使透过 A 的光强最小，此时电压表的显示值最小，表示 P、A 的透振方向相互垂直，再将 P 旋转 45° ；
- g、测量旋光角

由马吕斯定律知，透过检偏器的光强为 $I = I_0 \cos^2 \alpha$ ，不加磁场时，当 $\alpha = 45^\circ$ 时， $I = 0.5 I_0$ ，当施加磁场后因偏振面旋转了一个角度 θ ，此时透过检偏器的光强为 $I = I_0 \cos^2 (\theta + \alpha) \neq 0.5 I_0$ 。为了使 $I = 0.5 I_0$ ，检偏器 A 必须同时旋转 θ 角，才能使透射光强为 $0.5 I_0$ ，此时检偏器 A 旋转的角度就是此磁场此波长下的旋转角。为了测量方便将光电二极管接收到的光强转换为电压送入数显表的同相输入端，反相输入端设置了一个由调零电位器调节的共模电压，即功能开关置于测量位置。当 P、A 透光方向为 45° 时不加磁场，调节调零电位器使数显表显示为零。施加磁场后，因透过 A 的光强发生了变化，数显表的显示不为零，这时需旋转 A 使数显表的显示为零。检偏器 A 所旋转过的角度即是旋光角。

h、由于单色仪出射的光强及光电探测器对不同波长的相对光谱响应不同，因此仪器设置了灵敏度开关，可根据电压表的显示值大小选择灵敏度的高低。

三、实验内容

1、测量 $I \sim B$ 曲线，激磁电流应有小到大单一方向变化，测试过程中，不可逆向变化电流的大小。磁感应强度 B 由高斯计读取。建议测量范围为 $0 \sim 3.0 \text{ A}$ ，间隔 $0.2\text{-}0.5 \text{ A}$ 测量。

2、测量数据

可以选定一个波长，改变磁场来测旋光角。磁场改变范围可以从 2000 到 6000 高斯。建议选择 8 组波长，波长范围可以在 $460 \sim 600 \text{ nm}$ 之间选择。

a、固定波长 λ ，测 θ 和 B 的关系。

b、固定 B ，测量 θ 和 λ 的关系。

3、测量样品介质的 λ 和 $\frac{dn}{d\lambda}$ 对应关系，计算电子荷质比 e/m 。

把样品放在分光仪上，采用单色仪（或者汞灯、钠灯）作光源，用最小偏向角测量法，测出 λ 和最小偏向角 δ_D 的对应关系，然后利用公式：

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_D}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

A 为正三棱柱形状样品介质的顶角。求出样品介质的波长 λ 和介质折射率 n 的对应关系。最后再由 $\lambda \sim n$ 的关系进一步求出样品介质的波长 λ 和 $\frac{dn}{d\lambda}$ 的对应关系。

4、数据处理：

在实验测量各对应关系的范围内，适当选择相对应的 ϕ 、 B 、 λ 及 $\frac{dn}{d\lambda}$ 的值，利用公式

$$\frac{e}{m} = \frac{-2c\phi}{DB\lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)} \quad (20)$$

计算电子的荷质比，并与经典值相比较，计算实验相对误差。

四、实验结果处理

1、取 $\lambda \approx 500 \text{ nm}$ 作出关系曲线。

2、取 $B \approx 4000 \text{ Gs}$ 作出关系曲线。

3、根据公式 $V(\lambda) = \frac{\phi(\lambda)}{D \cdot B}$ ，利用实验测量结果，计算出样品介质的各波长的费尔德常数。

4、作出 $\lambda \sim V(\lambda)$ 旋光色散曲线。

五、分析与思考

1、本实验中，引起误差的主要来源有哪几个因素？如何减少这些因素的影响？

2、试设计一个观测法拉第效应特性的实验方案。

[注意事项]

1. 因电磁铁的电感量很大，严禁在通有励磁电流的状态下断开励磁电流的连线。否则会因电磁铁产生的反电动势而遭电击；

2. 防止杂散光的干扰；

3. 单色仪可能会因运输的原因发生机械的转移，故输出的单色光的中心波长与鼓轮读数发生位

移，如需精确测量时可用已知波长的单色光调准。

附录 最小偏向角、折射率与Cauchy经验公式

如图4，对顶角为 A 的三棱镜，当光线以入射角 i_1 入射到棱镜AB面上，以出射角 i_4 从AC面出射， δ 为两光线夹角，称为偏向角。用微商计算可以证明，当入射角 i_1 等于出射角 i_4 时，偏向角有最小值，称为最小偏向角，用 δ_D 表示。则棱镜的折射率

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_D}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

对其求导即可得折射率的色散关系

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{\cos \frac{A + \delta_D}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d\delta_D}{d\lambda}}{\sin \frac{A}{2}}$$

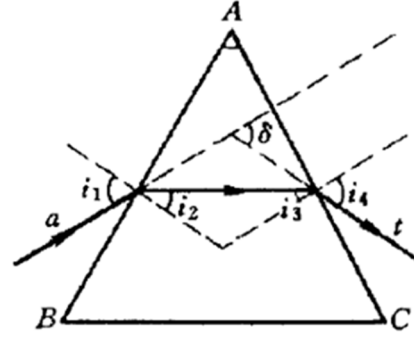


图4 最小偏向角的示意图

材料色散现象的实质是光与物质中的原子或分子相互作用的宏观表现，其微观过程可用量子理论描述，可以推导出描述正常色散现象的Cauchy经验公式：

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

式中A、B和C是表征材料特性的常数，对应的色散率可以通过求导求得。

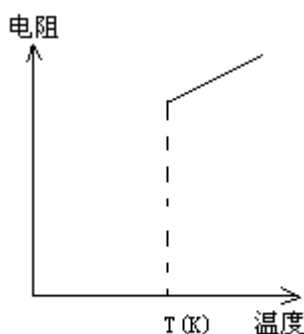
由于光学材料的色散特性对波长的依赖关系比较复杂，因而还存在其他多种色散方程。如Sellmeir公式：

$$n_{\lambda}^2 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

超导转变温度测量实验

引言

超导电性发现于 1911 年，荷兰科学家海克·卡末林·昂内斯（Heike Kamerlingh Onnes, 1853~1926）在实现了氦（ ^4He ）气液化之后不久，利用液氦（LHe）所能达到的极低温条件，指导其学生 Gilles Holst 进行金属在低温下电阻率的研究，发现在温度稍低于 4.2K 时水银（Hg）的电阻率突然下降到一个很小值（图一）。后来有人估计，电阻率的下限为 $3.6 \times 10^{-23} \Omega \cdot \text{cm}$ ，而迄今



图一 汞的零电阻现象

正常金属的最低电阻率大约为 $10^{-13} \Omega \cdot \text{cm}$ 。与此相比，可以认为汞进入了电阻完全消失的新状态——超导态。我们定义超导体开始失去电阻时的温度为超导转变温度或超导临界温度，通常用 T_c 表示。一些金属（如 Pb, $T_c=7.2\text{K}$ ）、合金（如 NbTi, $T_c=11\text{K}$ ）、金属间化合物（如 A15 结构的 Nb_3Ge , $T_c=23.2\text{K}$ ）等上千种材料具有超导电性。

在超导现象发现以后，实验和理论研究以及应用都有很大发展，但是临界温度的提高一直很缓慢。1986 年以前，经过 75 年的努力，临界温度只达到 23.2K，这一记录保持了差不多 12 年。此外，在 1986 年以前，超导现象的研究和应用主要依赖于液氦作为致冷剂。由于氦气昂贵、液化氦的设备复杂，条件苛刻，加上 4.2K 的液氦温度是接近于绝对零度的极低温区等因素都大大限制了超导的应用。为此，探索高临界温度超导材料成为人们多年来梦寐以求的目标。

1983 年，瑞士科学家缪勒（K.A. Müller）开始从事氧化物超导体的探索性研究。他与他的合作者柏诺兹（J. Bednorz）于 1986 年初开始在 Ba-La-Cu-O 系统中作实验。他们是基于双极化子导致超导电性的考虑着手实验研究的，尽管这种理论并未被认定，但在探索中确实揭示了一条新的线索。1986 年 4 月他们首先发现了 35K 的超导迹象，并确定了相应于这种超导相为 K_2NiF_4 结构。从此一条新的道路打开了。

1987 年初液氮温区超导体的发现震动了整个世界，人们称之为 20 世纪最重大的科学技术突破之一，它预示着一场新的技术革命，同时也为凝聚态物理学提出了新的课题。

1987年2月中美两国科学家独立地发现在Y-Ba-Ca-O体系中具有LN₂温区的超导性。1988年3月，美日中科学家在法国科学家Ravue工作基础上，在T₁-Ba-Ca-Cu-O体系中又将超导体的临界温度提高到了天然气液化的温区即高于110K。目前最高的超导转变温度为125K (Tl₂B₂Ca₂Cu₃Q_y)。短短两年把超导转变温度提高了100K，这是科学史上的奇迹！

为了使高温超导体尽快得以应用，必须要使材料的性能稳定，当前遇到的是使材料成材的困难、韧性差、电流密度低（只有10⁴-10⁵A/cm²）。尽管在准单晶薄膜样品中，其临界电流密度已达10⁶A/cm²，但绝大部分是多晶材料，由于晶界的影响不能很好用于实际。最近B₁和Tl化合物的发现，它们的性能稳定使超导电子学和半导体工业相结合的综合应用的可能性大大增加了，如用于计算机芯体的连线。总之高温超导体在低温超导体所能应用方面都显出其潜在的应用价值。

一、原理

超导体的许多特性，其中最主要的电磁性质是：

1、零电阻现象当把某种金属或合金冷却到某一确定温度 T_c 以下，其直流电阻突然降到零，把这种在低温下发生的零电阻现象称为物质的超导电性，具有超导电性的材料称为超导体。电阻突然消失的某一确定温度 T_c 叫做超导体的临界温度。在 T_c 以上，超导体和正常金属都具有有限的电阻值，这种超导体处于正常态。由正常态向超导态的过渡是在一个有限的温度间隔里完成的，即有一个转变宽度 ΔT_c ，它取决于材料的纯度和晶格的完整性。理想样品的 $\Delta T \leq 10^{-3} K$ 。基于这种电阻变化，可以通过电测量来确定 T_c ，通常是把样品的电阻降到转变前正常态电阻值一半时的温度定义为超导体的临界温度 T_c 。

超导体的零电阻特性在实验上是很难观察的，一个观测的最好办法是超导环中持续电流实验。它是将一超导环先置于磁场中，然后冷却使之转变为超导态，然后撤去外场，这时在超导态的环中感生出一电流：

$$I(t) = I(0)\exp(-t/\tau)$$

其中 $\tau \equiv L/R$ 是电流衰减时间常数， L 是环的自感， R 为电阻。对于正常金属 τ 值很少，环内电流很快衰减为零；对超导环则情况不同，电流衰减非常慢。这一衰减可通过精密的核磁共振方法来测量超导电流形成的磁场的微小变化，从而推出衰减时间。在Nb_{0.75}Zr_{0.25}超导环中得到的结果是衰减时间大于10万年，因此可以看成是零电阻。

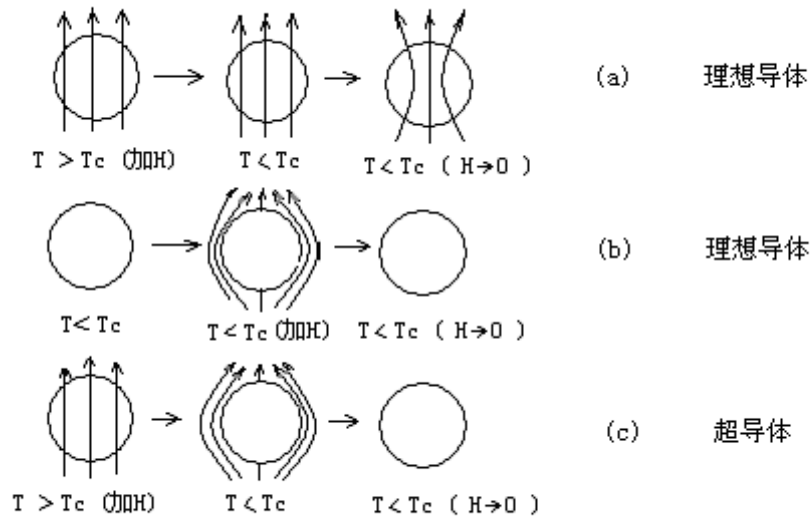
本实验是基于零电阻特性，用电测法测量超导转变温度 T_c ，从而对零电阻现象有一感性认识。具体做法是使样品通一恒定电流，测量其阻值随温度变化，当温度降到 T_c 时阻值突然降到仪器分辨率不能检测的情况，从而定出 T_c 。

2、完全抗磁性当把超导体置于外加磁场时，磁通不能穿透超导体，而使体内的磁感应强度

始终保持为零 ($B \equiv 0$), 超导体的这个特性又称为迈斯纳 (Meissner) 效应。

超导体的这两个特性既相互独立又有紧密的联系, 完全抗磁性不能由零电阻特性派生出来, 但是零电阻特性却是迈斯纳效应的必要条件。

为了和超导体加以区分, 我们把仅仅没有电阻的假想金属称做理想导体。图二示出了它们的磁化过程。电阻为零的导体内部是不可能存在电场的 ($E \equiv 0$), 根据麦克斯韦方程, 它又必须满足 $\dot{B} = -rotE = 0$, 这就意味着理想导体内的磁通不应随时间而变 (图二 (a))。如果对理想导体采取不同于图二 (a) 的另一过程, 即先降温再加磁场, 由电磁感应定律可以知道, 当加外磁场时, 在导体表面必然诱导出衰减的感应电流而把磁场排斥在体外, 保持体内的磁通不变 (图二 (b))。比较这两种途径可以看到, 对理想导体, 它在磁场中的行为是不可逆的, 在给定的条件下, 它的状态不唯一, 它依赖于降温 and 加外磁场的具体过程。1933 年迈斯纳在实验上发现, 如果把处于外加磁场中的正常体冷却到超导态时, 磁场分布发生了变化, 已渗透到样品内部的磁通将完全被排斥出来, 其内部的磁感应强度恒等于零 (图二 (c))。对于超导体, 它在磁场中的行为仅仅取决于外加磁场和温度的具体数值, 而与它如何达到这些值的过程无关。就是说, 超导态是确定的热力学状态, 无论是先降温还是先加磁场, 磁场都不能透入超导体内部¹。



图二 超导体的完全抗磁性

所以, 完全抗磁性是独立于零电阻特性的另一个基本属性。超导体的完全抗磁性是由于表面屏

¹在超导体一定厚度的表面层里, 按照 $B=B_0e^{-x/\lambda}$ 的关系把磁场逐步屏蔽掉, 其中 B_0 是外磁场, x 是表面下的深度, λ 是常数, 叫作穿透深度, 具体数值依材料而定, 一般在 $10^{-6}10^{-5}cm$ 之间。

蔽电流（也称迈斯纳电流）产生的磁通密度在导体内部完全抵消了由外场引起的磁通密度，使其净磁通密度为零，它的状态是唯一确定的。从超导态到正常态的转变是可逆的。

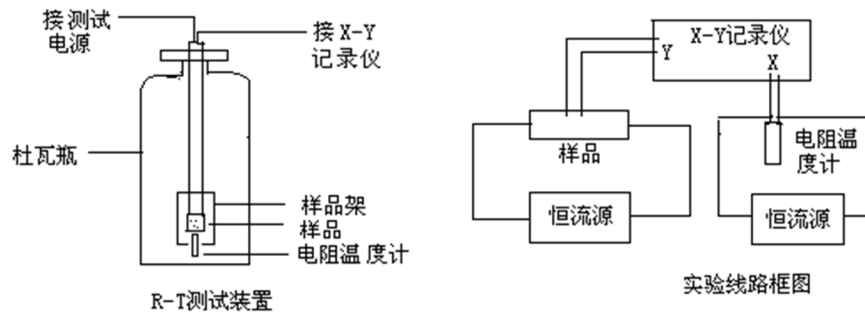
迈斯纳效应可以通过磁悬浮实验直观演示：当一个小的永久磁体放置到超导样品表面附近时，由于永久磁体的磁通线不能进入超导体，在永久磁体与超导体之间存在的斥力可以克服磁体的重力，而使小磁体悬浮在超导表面一定的高度。但高温超导体样品特征决定了它们具有非完全抗磁性。迈斯纳效应是个直流效应，用磁悬浮实验可直观形象描述超导体的这种抗磁特性，因此磁悬浮是个很好的演示实验，但它较难给出定量结果。为了知道一个样品是否具有抗磁性需要测量该样品的磁化强度 M （或磁化率 X ）随温度的变化关系。测量方法很多，有磁秤法、振动样品磁强计及 SQUID 磁强计等，这些都是测量直流磁化率 X_{DC} 的方法，它们要求高，装置复杂。²

二、实验目的

- 1、了解超导体的最基本特性以及判定超导态的基本方法
- 2、掌握用测量超导体电阻—温度关系测定转变温度的基本方法
- 3、了解获得液氮温区温度的基本方法

三、实验装置及测量线路

包括用伏安法测试超导样品的电阻随温度变化（ $R-T$ 关系曲线）的测试装置和定性观察超导磁悬浮（抗磁性显示）装置两部分。



图三 图四

1、本试验用的超导体 $R-T$ 测试装置示意图见图三。包括超导样品架、液氮杜瓦瓶、电阻温度计、电源、X-Y 记录仪等部分。通常称样品架连同整根德银管为探棒，超导样品和温度计装在样品架上。样品架置在探棒的可拆卸的圆铜套内，铜套阻挡了 LN_2 直接接触超导样品，冷量由外壁紫铜端通过紫铜块传到样品上。紫铜块从纵向打 $\Phi 1.8\text{mm}$ 的孔插入—铂电阻温度计(型

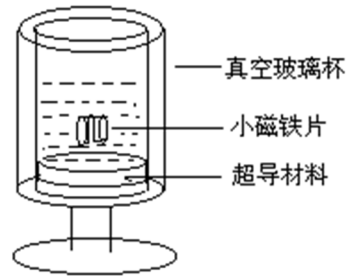
²以上资料摘自“近代物理实验”第二版，吴思诚等编著，北京大学出版社出版。

号 PZT-100) 其间涂以低温热导脂。超导样品用强力胶粘于导热性良好的微晶片上 (也可用环氧板), 载片与紫铜块间也涂以热导脂。超导样品和铂电阻温度计的电阻测量均采用四端引线, 两根电流线, 两根电压线, 以减少测量误差。超导样品和温度计的供电电源分别由室温的测试电源提供, 铂温度计的工作电流恒定为 1.00 mA, 样品电流为 1 mA 到 10 mA 由仪器面板的电位器调节。图四为实验接线框图。

本实验装置用的低温容器是不锈钢制做的液氮储罐, (型号 YDS-3) 容量为 3 升, (或玻璃保暖瓶) 实验时液氮不要灌得太满, 每次灌液氮 1 升左右即可。

2、R-T 测试电源

此处 R-T 测试电源提供两路相互绝缘的独立恒流源, 供温度计的恒流电源为 1.00 mA - 5.00 mA, 供超导样品的电流为 1-10 mA 可调。测试电源面板上的数显表可指示它们的读数, 表下面的拨动开关控制电流表的切换。向左拨动时指示的是样品电流值, 向右拨动时显示铂电阻温度计的电流值。本电源采用场效应管恒流供电。其输出阻抗很高, 当铂电阻或超导样品电阻变化时电流读数保持不变。电路中的场效应管经



图五

过挑选, 勿任意调换。当环境温度变化很大时, 恒流数值可能略有变化, 温度计的恒流电路中有一微调电位器可借此作电流微调。

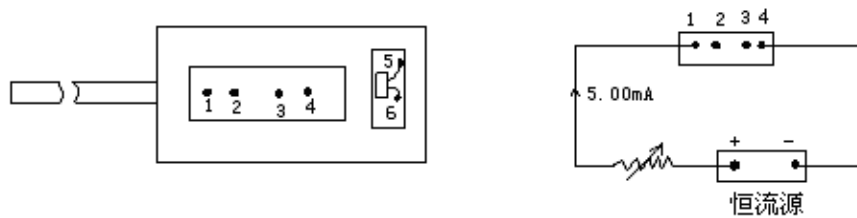
2、抗磁性实验的磁悬浮装置如图五所示。超导样品也是 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7.8}$ 需通过熔融结构处理, 此是将 Y 系 123 相超导体材料再加热至 $1030-1100^{\circ}C$ 使之分解成富 Cu 的液相和 Y_2BaCuO (211 相), 然后按一定规程逐渐降温, 并通氧处理, 经这样处理的样品可有较大的通电流能力, 其磁悬浮能力也因之显著加强。

本实验采用的是小超导样品及 $\phi 28\text{ mm}$, 厚 4 mm 的钕铁硼磁钢片。

四、实验内容, 方法及步骤

1、超导样品制作

如果教学环节中有较充足的实验时间, 那么可以让学生自己制作样品以训练动手能力, 所谓制作样品主要是制作电极, 而样品材料由实验室提供。



图六 样品架及样品电流

-
- ① 首先带好白手套，用镊子把尺寸大约为 $20 \times 5 \times 2$ cm 的钇钡铜氧超导块材，从干燥缸内取出；
 - ② 用 0.8 或 1 mm 的钻头在样品表面上打 4 个浅穴（千万别打穿！）
 - ③ 酒精擦干表面尘粒
 - ④ 细银丝或漆包铜丝（ $\phi 0.05$ mm），作为引线，用钢粒，把引线头压在浅穴上，并用镊子柄轻轻压紧。
 - ⑤ 再用小锉刀在 2-3 中间轻轻锉去一层，让它尽量变薄，但不能锉断，再用酒精擦去表面尘粒。
 - ⑥ 把样品胶粘在与样品差不多大小的胶木板上（可用强力粘合胶），以增加牢固度。
 - ⑦ 把带有样品的胶木板放在探测头样品架上，并用烙铁把样品引线的另一端焊到样品架的铆钉上。这样，完成了样品制作及连接线焊接。
 - ⑧ 如果样品引线不用钢粒压紧，也可用导电胶把引线一端胶粘在浅穴上，然后放在 220°C 烘箱内保持 3 个小时，把它固化。操作过程中需认真细心，注意粘点要小，不能让引线翘起来，没有细心态度是做不好的。

如果实验课时数不够，学生不必动手做样品，而用实验室提供做好的现成样品，学生只要把样品从干燥缸取出来后，把 4 根引线焊接到样品架相应的铆钉焊点上。

⑨ 把铂电阻温度计放在探测头样品架紫铜块内样品附近，并把温度计的二个引线焊到样品架的 5、6 二铆钉接点上。最后把探测头的套筒装上并旋紧。

2、样品与测量仪器用连接线连接起来（见使用说明书）。

3、测量

本实验的目的测量超导材料的转变温度 T_C ，也就是在常气压环境下超导体从非超导态变为超导态时的温度。由于超导材料在超导状态时电阻为零，因此我们可用检测其电阻随温度变化的方法来判定其转变温度。实验中要测电阻及温度二个量。样品的电阻用四端法测量，通以恒定电流，测量 2、3 二端的电压信号，由于电流恒定，电压信号的变化即是电阻的变化。

温度用铂电阻温度计测量，它的电阻会随温度变化而变化，比较稳定，线性也较好，实验时通以恒定的 1.00 mA 电流，测量温度计两端电压随温度变化情况，从表中可查到其对应的温度。

温度的变化是利用液氮杜瓦瓶空间的温度梯度来获得。样品及温度计的电压信号，可从数字显示表中读得，也可用 X-Y 记录仪记录。

具体操作方法：

1、用数字显示表，逐点测量

① 样品连线连接好以后，开启电流，调节样品电流， $i_S = 5.0$ mA 温度计电流 $i_T = 1.00$ mA。

②调节 V_S 放大的旋钮，使样品电压信号适中，一般希望能有几十毫伏的信号，因室温时处在最高温度，这时信号是最大值，如果调节不到几十 mV，说明有问题，需要检查接线、电流供给、样品断线否等，排除问题后再作下一步实验。

③小心地把探测头浸入杜瓦瓶内，待样品温度达到液氮温度后（一般等待 10-15 分钟），观察此时样品出现信号是否处于零附近（因此时温度最低，电阻应为 0，但因放大器噪声也被放大，会存在本底信号）注意此时不能再改变放大倍数，放大倍数档位置应与高温时一致。如果此时电压信号仍很大，与高温时一样，则属不正常，需检查原因。如电阻信号小，与高温时的电阻信号相差大，则可进行数据测量了。

④测量方法

样品温度达到稳定到液氮温度时，记下此时的样品电压 V_S 及温度电压 V_T 值，然后把探测头小心地从液氮瓶内提拉至液面上方，温度会慢慢升高，在这变化过程中，温度计的电压信号及样品的电阻信号会同时变化，同时记录这二数值，记下 20-30 个数据。作 V_S - V_T 图即可求得转变温度。在过程中要耐心观察，特别在转变温度附近，最好多测些数据。

⑤如时间允许可从高温到低温再测量一次，观察二条曲线是否重合，解析原因。

2、用 X-Y 记录仪记录

(1) X-Y 记录仪的 x、y 轴应校准。

(2) 接好连接线，样品电流为 $i_S=5.00$ mA，温度计电流 $i_T=1.00$ mA，样品的电阻（即电压）信号接到 x-y 记录仪的 y 轴，温度计信号接到 x 轴。先看在室温下 X-Y 记录仪的笔处于哪个位置。室温下 x 及 y 均应处于最大值，记录笔应在记录仪的右上方，如太大或太小，应调节它的量程档，使之合适，如发现此时记录笔不处在右上方，那肯定有问题，应该检查样品、温度计及记录仪电流是否接通，X-Y 记录仪量程是否选得合适等等。排除问题后再做下一步实验。

(3) 如果正常我们可以暂时关闭样品及 X-Y 记录仪的电源，而把探测头缓慢地放到杜瓦瓶内（注意小心轻放，别碰坏玻璃杜瓦瓶。）样品达到液氮温度后（由于样品罩内有空气，样品要达到液氮温度需要一个传递过程，一般要等候 10-15 分钟），再开启电源。此时 X-Y 记录仪的笔应处在最小位置，即在记录仪的左下方，如果不是，则可以为样品未处于超导态（或样品失超了），则应再等一会（或调换样品）。

达到液氮温度后，小心地把探头从瓶内提出到液氮面上部，样品处温度会慢慢升高变化，与此同时记录仪的笔会根据温度变化规律画出样品电压信号的变化曲线。如果变化太慢，可把探测头再从液氮面提出放在实验台上，此时温度变化较快，能较快画出样品电阻随温度的变化曲线，注意在提纯拉探测头过程中，仪器处于工作状态，因此应小心操作，以防接线松脱。在这实验过程中，如果温度变化太快或太慢，可通过控制探测头在液氮面上部的位置及停留的时间加以调节。

这样画出的样品电压（或电阻）变化曲线是从低温到高温的变化。然后，可再画一条从高温到低温的变化曲线。（注意：放入液氮前，如样品在空气中受了潮，一定要用热风吹干）。这两条曲线应重合在一起，但事实上并不如此。什么原因，请实验者思考。计算 T_c 的话应该采用从低温到高温变化所画出的那条曲线的的数据。

3、实验结束工作：

①实验结束后关掉仪器电流，用热吹风把探测头吹干。

②旋开探测头的外罩，把样品吹干，使其表面干燥无水气。

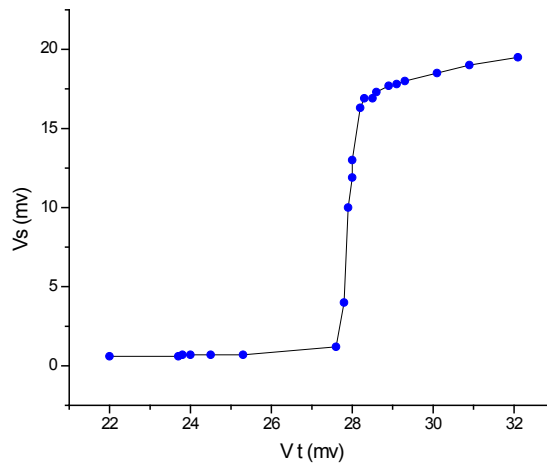
③用烙铁把样品与样品架连接的四个焊点焊开，取出样品，用滤纸包好，放回干燥箱内，以备下组实验者使用。

4、如时间许可、定性观察超导的磁悬浮现象

实验方法：①把一个 $\phi 30\text{ mm}$ 磁铁放在真空玻璃杯内（注意要缓慢放下，防止把杯子碰裂），然后向杯内倒入液氮，因起初杯子是室温，最好先倒入一点，让杯子预冷，待会再倒一点，充分预冷后，再倒入半杯的液氮，过程中可看到液面在沸腾，这是冷却过程。

②从干燥缸内取出一小碎片超导材料，用竹夹子把它慢慢地放入液氮近磁钢表面上，此时可看到它会浮在磁钢上方。这就是磁悬浮现象（如图五所示）。

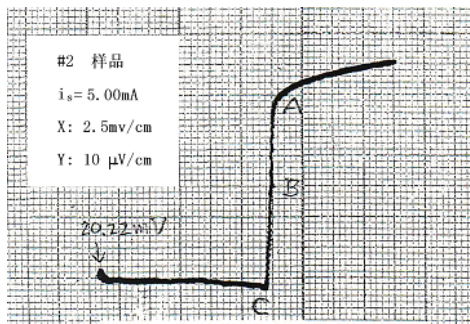
五、实验结果及讨论



图七 点测实验结果图

3、X、Y 记录仪记录的曲线数据处理

图八为用 X、Y 记录仪画的超导样品的 R-T 关系实验曲线。从图中可看到偏离线性时的点 A，对应的温度为起始转变温度。超导电阻为零的 C 点对应温度为 T_{c0} ，中间点 B 为 T_{c50} ，转变温度宽度 ΔT 为 $90\%R_0$ 与 $10\%R_0$ 之间的温度差， $50\%R_0$ 对应为转变温度。从 x 轴标度为液氮点时的值可计算出本次所测的样品的转变温度 $T_c =$



图八 XY 记录仪画的曲线

4、低温的获得

低温的获得利用低温液体（如 LN_2 、 LHe 等）作致冷剂冷却待测样品，是实验室获得低温最常用的方法。由于低温液体的沸点很低，汽化潜热很小，所以低温液体要存放在绝热性能好的低温容器——杜瓦瓶中。 LN_2 的正常沸点为 77.4 K， LHe 为 4.2 K，降低蒸气压还能进一步降温， LN_2 可降到其三相点 63.15 K， LHe 可达 1 K 左右。

变温控温 实验中根据测温范围及控温精度，常用几种探温方法，本实验电阻测量中主要采用漏热法来达到从 150 K-77.4 K 之间的变温目的，所谓漏热法是指控制漏到样品恒温块上的热量来达到控温目的。中心德银管可以上下移动，以改变恒温器和液氮面之间的距离。通过铜片来传递冷量达到恒温块变温的目的。

为使温度计能真实反映样品处温度，安装时两者要尽量接近，不然会带来误差。同时在测量时，同时记录两者热稳定后的数据，尽量减少误差。

六、实验注意事项

- 1、实验操作过程中不要用手直接接触样品表面，要带好手套，以免沾污样品表面。
- 2、样品探头放进液氮杜瓦瓶时应小心地慢慢进行，以免碰坏容器、皮肤不要接触液氮，以免冻伤。万一容器瓶损坏，液氮溢出瓶外室内充满雾气，这时也不要紧张，这是液氮在汽化蒸发，只要不接到皮肤，就不会冻伤。过了一会挥发完就好了。
- 3、实验时样品电流 i_s 选在 10 mA 以内，不要太大，以免失超。
- 4、灌倒液氮时要小心，不要泼在手上、脚上，其严重灼伤皮肤程度比开水更甚！，在磁悬浮实验中更要注意！，在液氮面未平稳时眼睛不要太靠近玻璃杯，以防万一！玻璃真空杯夹层系低真空，尚有一定的导热作用，倒入液氮后会结水汽。可用棉花蘸无水酒精揩擦。
- 5、超导样品 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 不宜长期接触水汽，水汽会使结构破坏、成份分解，导致超导性能丧失。故做完实验后宜从低温处取出，用热吹风烘干表面潮气，置于有干燥剂的密封容器中保存，待实验时再取出。

七、思考题

- 1、什么叫超导现象？超导材料有什么主要特性？从你的电阻测量实验中如何判断样品进入

超导态了？

2、如何能测准超导样品的温度？

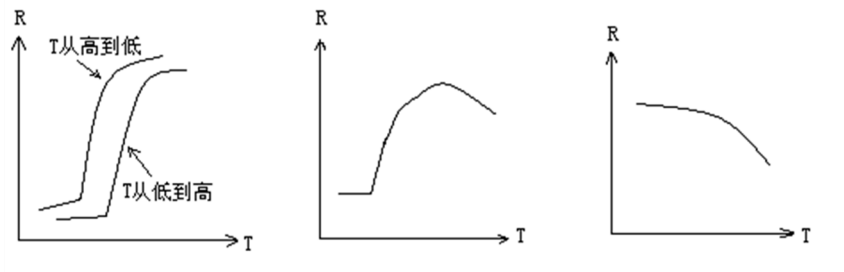
3、测定超导样品的电阻为什么要用四引线法？

4、下面（图①）是二条实验曲线，一条是样品温度从高温到低温变化，另一条是从低温到高温变化。它们不重合在一起，从此测到的 T_c 也有差别，试解释原因。

5、下面（图②）是对另一样品画的 R-T 曲线

试解释为什么有一段是类似半圆形的曲线，而不是一根直线。

6、图③是另一样品 R-T 曲线，试解释它的原因。



图①

图②

图③

图九 思考题附图

7、样品电流应调节多大，为什么？

8、为什么样品必须保持干燥？如何保存样品？

9、从超导材料进入超导态时 $R=0$ ，你能想象出它有什么应用价值？

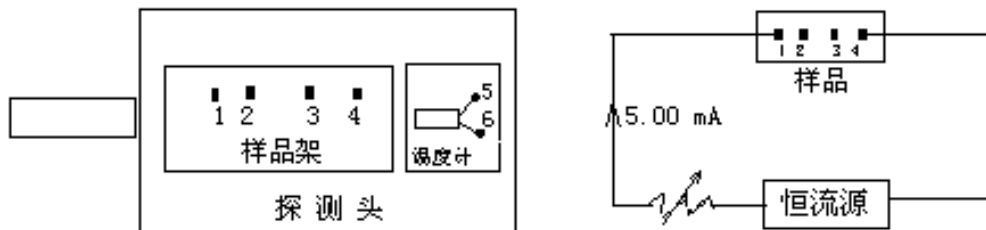
八、参考文章

1、章立源、张金龙、超导物理、电子工业出版社（1987）

2、物理实验，总第 129 期，2001.5 P7-12

3、近代物理实验（第二版），吴思诚、王祖铨主编，北京大学出版社，P418-P425

附补充图：超导样品制作、安装及连接



图十样品架及样品电流

盖革 - 弥勒计数器和核衰变的统计规律

盖革-弥勒计数器简称为 G-M 计数器，是核辐射探测仪器的一种，它本身只能用于测定辐射粒子的数目。

本实验的目的要求是：

1. 掌握的工作原理及使用；
2. 验证核衰变的统计规律；
3. 学习放射性测量结果的统计误差的表示方法和检验测量数据的分布类型。

实验原理

(一) G-M 计数器的结构与工作原理

G-M 计数器由 G-M 计数管、高压电源和定标器构成。G-M 计数管有各种不同的结构，常见的有钟罩形 β 计数管和长圆形 γ 计数管两种。它们都是由圆筒状的阴极和装在轴上的阳极丝密封在玻璃管内而构成。管内充以一定量的气体(主要是惰性气体如氩、氖等)，气压比大气压低，例如 100 mmHg。因为 β 计数管需要一层薄窗(用云母片制成)，使 β 射线容易进入。而 γ 计数管则不必，因为 γ 射线贯穿本领强。

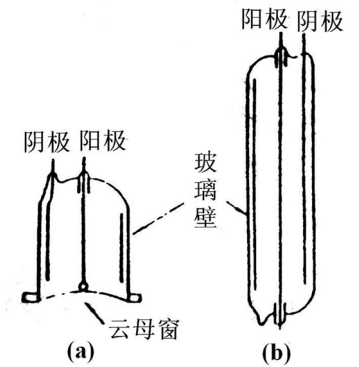


图 1 (a) β 计数管 (b) γ 计数管

G-M 计数器工作时，高压由高压电源经过电阻 R 加到计数管的阳极上，于是在计数管内产生一柱状对称的电场。辐射粒子使电极间气体电离，生成的电子和正离子在电场作用下漂移，最后收到电极上。

G-M 计数管中负脉冲的形成过程如下：当射线进入计数管后，引起管内的气体电离，所产生的负离子（实际上是即电子）在电场加速下向阳极运动，在到达阳极之前与气体分子发生多次碰撞，打出很多次级电子，这些电子也在电场加速下向阳极运动，也与气体分子发生碰撞打出更多的次级电子，这样就引起了所谓“雪崩放电”。在雪崩过程中，由于受激原子的退激和正负离子的复合发射大量光子，在充有猝灭气体的计数管中，这些光子将主要为猝灭气体所吸收，同时使雪崩区沿着丝极向两端扩展而导致全管放电，最后就有大量的电子到达阳极。由于计数管内电场是柱状对称的，所以在阳极附近电场最强，极大多数的次级电子都是在阳极附近产生的。当电子很快到达阳极后，由于正离子质量较大，运动速度很慢，于是就在阳极周围形成“正离子鞘”，阳极附近的电场随着正离子鞘的形成而逐渐减弱，以致是新电子无法再增殖，放电便

终止了。此后正离子鞘在电场的作用下漫漫一向阴极，最后到达阴极并被中和。计数管可以看作一个电容器，放电前加了高压，于是在两极上就带有一定量的电荷，放电后电子和正离子中和掉极上一部分电荷，是阳极电位降低，于是电源电压就通过高电阻 R 向计数管充电，使阳极电位逐渐恢复，在阳极上就得到一个负的电压脉冲，波形如图 2 所示。负脉冲的幅度与电源电压及电阻 R 大小有关，电压高则负脉冲的幅度高，电阻大，负脉冲的宽度较大，幅度也高。

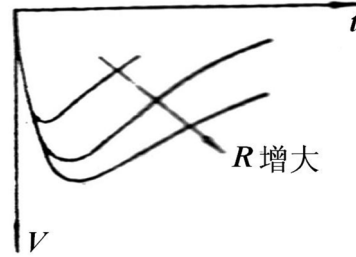


图 2 G-M 计数管输出脉冲波形

因为放电后正离子打到阴极上会打出电子来，被打出的电子经过电场加速又会引起计数管放电。这样，

只要有一个放射性粒子进入，就会引起计数管连续不断的放电。为了使一个放射性粒子引起放电后只计一次数，必须设法使放电猝灭。通常的办法是在计数管内除充惰性气体外，还加入少量能使放电猝灭的气体，此种计数管称作自灭计数管。自灭计数管按其充猝灭气体的性质，可以分为充有机气体（如酒精蒸汽、乙醚蒸汽等）的有机管和充卤素气体（如溴蒸汽）的卤素管两类。

（二）G-M 计数器的性能

1. 坪特性——阈电压、坪长度和坪坡度

在进入计数管的放射性粒子不变的情况下，改变加在计数管电极上的电压，由定标器记录

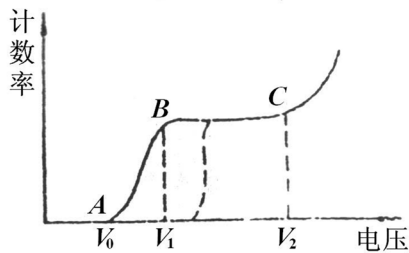


图 3 G-M 计数器的坪特性曲线

相应的计数率（单位时间的计数次数）得到如图 3 的曲线，由于此曲线有很平（计数率随电压改变很小）的一段（BC 段），因此把此曲线称为坪特性曲线。而把 BC 段称为坪区。 V_0 称为起始电压， V_1 称为阈电压， $\Delta V = V_2 - V_1$ 称为坪长度，坪坡度是指在坪区内电压每升高 1V 时计数率增加的百分数。坪特性曲线是衡量 G-M 计数管性能的重要标志，在使用计数管之前必须测量它，以鉴定计数管的质量并

确定工作电压。

坪特性曲线的形状可以解释如下：电压较低时，放电只在计数管内局部地区发生，因此产生的负脉冲较小，且其幅度与粒子产生的原始粒子对有关。电压低于 V_0 时，由于脉冲幅度过小不能触发定标器计数，因此计数率为零；在 V_0 到 V_1 区间内，只有一部分产生原始粒子对数较多的粒子，引起负脉冲较大，能触发定标器计数，因此计数率仍较小。但随着电压升高，脉冲幅度增大，因此计数率也增大。电压超过 V_1 后，放电进入盖革区，此时只要产生一对离子就会

引起全管放电，脉冲幅度只决定于电压而与原始粒子对数无关，所以此时所有产生电离的粒子都被定标器记录下来。此后再增加电压，只是增加脉冲的幅度而不增加脉冲个数，所以计数率保持不变，即为坪区。但坪区仍有一定大小的坪坡度，即随着电压的增加计数率有少量的增加，这主要是由于多次计数（即一个粒子引起二个以上的计数）的增加和计数管灵敏体积的增大（末端效应）。电压超过 V_2 后，计数率随电压剧烈增加，这是因为电压较高时，每次放电产生的离子数目非常大，正离子到达阴极打出次级电子再一次放电的几率亦增大，此几率达到 1 时就进入连续放电区。

如果定标器灵敏度不够高（即需要较大幅度的脉冲才能触发），则坪特新曲线可能出现如图 3 中的虚线所示的情况，即使起始电压升高，坪区缩短。为此在使用时要应用灵敏度足够高的定标器或增加一个前级放大器。

2. 死时间、恢复时间和分辨时间

在前面讨论脉冲产生过程时讲到过，放电后在阳极附近产生一个正离子鞘，由于正离子的存在减弱了阳极附近的电场，此时若有粒子射入，不能引起放电，也就不能引起定标计数。随着正离子鞘向阴极运动，阳极附近的电场逐渐恢复。当正离子鞘到达某半径 r_0 时，阳极附近的电场刚刚恢复到可以发生放电，这段时间 t_d 称为死时间。正离子从 r_0 到阴极的一段时间称为恢复时间 t_r 。在 t_r 时间内，由于电场没有完全恢复，所以粒子入射后虽能引起放电，但脉冲幅度较小，若小于定标器的灵敏度，仍不能被定标器纪录下来。但随着电场的恢复，产生的脉冲幅度也随着增高，如果在时间 τ 以后出现的脉冲能被定标器纪录下来，则 τ 称为分辨时间。若定标器的灵敏度足够高，分辨时间 τ 与死时间 t_d 可以很接近。分辨时间还与计数管上所加的电压和负载电阻 R 的大小有关。

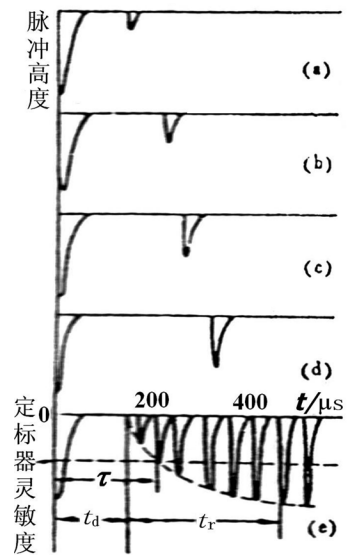


图 4 G-M 计数器分辨时间

计数管放电后的恢复情况及死时间可以用示波器观察测量，将计数管阳极经过耐高压的电容联到脉冲示波器的纵输入端，每一次扫描得到如图 4 的 (a),(b),(c),(d) 等图形，实际看到的是如图 4(e) 的图形，它是多次扫描重叠的结果，从许多小脉冲的包迹可以看出脉冲的恢复，由脉冲示波器的时标或扫描速度可以测量死时间 t_d 和恢复时间 t_r 的大小，若知道定标器的灵敏度，也可以求得分辨时间 τ 的大小。

由于分辨时间 τ 的存在，在一次计数后的时间内进入的辐射粒子就会被漏记，影响了测量的准确性。对此漏记可以修正，若单位时间一共记了 m 次，每次计数后有一段时间 τ 要产生漏记，

则单位时间内共有 $m\tau$ 时间要产生漏记，如果没有漏记时单位时间内的计数应该是 n 次，则在 $m\tau$ 时间内应该记 $nm\tau$ 次，这恰好应等于漏记数 $n - m$ 。

$$n - m = nm\tau$$

于是得到修正计数率的公式：

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

分辨时间 τ 是计数管的一个重要特性，在 $m\tau \ll 1$ 的条件下， τ 是常数；分辨时间除用示波器观测外，也可以用双源法测量。测量 A 和 B 两个放射源分别照射下的计数率 m_A 和 m_B 以及同时照射下的计数率 m_{AB} ，由计数率修正公式得

$$n_A = \frac{m_A}{1 - m_A\tau}, n_B = \frac{m_B}{1 - m_B\tau}$$

$$n_{AB} = n_A + n_B = \frac{m_{AB}}{1 - m_{AB}\tau}$$

由上式消去 n_A ， n_B 和 n_{AB} 并略去 τ^2 项，便得

$$\tau = \frac{m_A + m_B - m_{AB}}{2m_A m_B}$$

在上式的推导中假设了 τ 是常数，所以必须满足 $m\tau \ll 1$ 的条件。此外，由于用了 $n_{AB} = n_A + n_B$ 的条件，A 源和 B 源在单独测量时和同时测量时几何位置和周围环境都应相同。从上式还可以看出，双源法是由两个大数的小的差额来求得值的，因为 $m_A + m_B - m_{AB}$ 比 m_A ， m_B 和小得多，所以要得到相对误差不大的 τ 值，必须相当准确地测定 m_A ， m_B 和 m_{AB} 。

测量过程中必须十分注意保护计数管避免连续放电，因为一次连续放电可能将猝灭气体耗尽使管子损坏。升高电压时应特别注意计数情况，如发现计数率有突然升高的趋势，应立即降低电压，切忌将电压加高到超出坪区以外道的范围。

（三）放射性测量数据分布规律的检验

由于放射性衰变存在统计涨落，当我们作重复的放射性测量时，即使保持相同的实验条件，每次测量的结果并不相同，而是围绕某一平均值上下涨落，有时甚至有很大的差别。通过检验可以帮助检查仪器的工作是否正常和测量条件是否稳定，从而帮助分析和判断在测量中除放射性测量的统计误差外，是否还有其他条件的系统误差和偶然误差因素。

放射性测量数据检验的基本做法是比较测量数据应有的一种理论分别和实测数据之间的差异，然后从某个概率的意义上说明这种差异是否显著，差异显著，则否定原来的理论分布，说明测得的数据存在问题，反之，则接受理论分布，认为测量数据是正常的。

1. χ^2 检验法

对于具有 k 个测量值的一组数据 $n_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 对它们分组，分组的序号用 j 来表示， $j = 1, 2, \dots, r$ 。统计每个分组区间中实际观测到的次数，用 f_j 表示。若测量值服从高斯

分布或泊松分布，则可计算每个分组区间中按理论分布应有的出现次数，用 f'_j 表示。理论出现的次数，可以根据高斯分布或泊松分布曲线下的面积函数算出各区间的面积 P_j ，然后再乘以总次数 k 得到（曲线下总面积为1，各区间的 P_j 即测量值按理论分布落在该区间中的概率），即

$$f'_j = k \cdot p_j \quad j = 1, 2, \dots, r$$

可以证明统计量

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^r \frac{(f_j - f'_j)^2}{f'_j} = \sum_{j=1}^r \frac{(f_j - kp_j)^2}{kp_j}$$

近似地服从 χ^2 分布，其自由度 ν 为 $(r-s-1)$ ，这里 s 是在计算理论分布次数时所用的理论分布曲线所包含的参量数目。对于正态分布 $s=2$ ，对于泊松分布 $s=1$ 。在数理统计中可以证明 χ^2 分布具有图5所示的形状，图中横坐标表示 χ^2 的取值，纵坐标表示相应于该 χ^2 值时的概率密度 $P(\chi^2)$ 。我们可以算出随机变数 χ^2 所取的值大于某个预定值 $\chi^2_{1-\alpha}$ 的概率 $P(\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha})$ ，令此概率为 α ，则

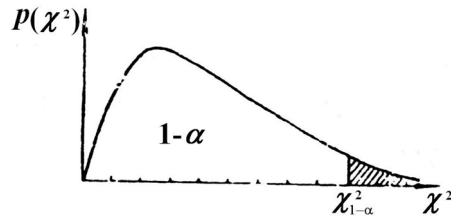


图5 χ^2 分布的图形

$$P(\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha}) = \int_{\chi^2_{1-\alpha}}^{\infty} P(\chi^2) d\chi^2 = \alpha$$

实际上对于不同自由度 ν 已经按照上式计算了 α 和 $\chi^2_{1-\alpha}$ 对应的数据表，一般的概率统计书中都有此表。下表列出了在某些自由度下的相应于某几种概率 α 值时的 $\chi^2_{1-\alpha}$ 值。

相应于三种概率下的 $\chi^2_{1-\alpha}$ 值

| $\chi^2_{1-\alpha}$ ν α | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.50 | 6.346 | 7.344 | 8.343 | 9.342 | 10.341 | 11.340 | 12.340 | 13.339 | 14.339 |
| 0.10 | 12.017 | 13.362 | 14.684 | 16.987 | 17.275 | 18.549 | 19.812 | 21.064 | 22.307 |
| 0.05 | 14.067 | 15.507 | 16.919 | 18.307 | 19.675 | 21.026 | 22.362 | 23.685 | 24.996 |

统计量 χ^2 用来衡量实测分布与理论分布之间有无明显的差异。使用 χ^2 检验时，要求总次数不小于50，以及任一组的理论次数 f'_j 不小于5（最好在10以上），否则可以将组适当的合并以增加 f'_j 。比较的方法是先取一个任意给定的小概率 α ，称为显著性水平，根据自由度 ν 的大小，查出对应的 $\chi^2_{1-\alpha}$ 值，比较统计量 χ^2 与 $\chi^2_{1-\alpha}$ 的大小来判断拒绝或接受理论分布，这种判断是在某一显著性水平 α 上得出来的。例如对于某一组服从泊松分布的数据，其计数平均值为3.87，计算得

统计量 $\chi^2 = 13$, 自由度为9, 如果取显著性水平 $\alpha = 0.1$, 查表得 $\chi^2_{1-\alpha} = 14.684$, 因实测得到的 $\chi^2 = 13 < \chi^2_{1-\alpha} = 14.684$, 所以认为此组数据服从泊松分布。

2. 频率直方图检验法

对一组测量数据可以把它们直接和一个理论分布比较, 从而检验这组数据是否符合该理论分布。在本单元引言中曾经提到核衰变统计涨落所造成的误差遵从泊松分布。当平均值 m 较大时 ($m > 10$) 泊松分布与标准误差 $\sigma = \sqrt{m}$ 的高斯分布形式上很接近。对于实验上测得的一组数据 $n_i (i = 1, 2, \dots, k)$, 首先求出其平均值 \bar{n} ,

$$\bar{n} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i$$

根据式

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (n_i - \bar{n})^2}$$

计算标准误差 σ_i , 然后对于上述的测量数据 n_i 按下述区间来分组, 各分区间的分界点为

$$\bar{n} \pm \frac{1}{4}\sigma, \bar{n} \pm \frac{3}{4}\sigma, \bar{n} \pm \frac{5}{4}\sigma, \dots$$

各区间的中心值为

$$\bar{n}, \bar{n} \pm \frac{1}{2}\sigma, \bar{n} \pm \frac{3}{2}\sigma, \dots$$

统计测量结果出现在各区间的次数 K_i , 以次数 K_i 或频率 K_i/k 作为纵坐标, 各区间的中心值为横坐标做频率直方图。将所得到的频率直方图与以并平均值 \bar{n} 、标准误差为 $\sigma_s = \sqrt{\bar{n}}$ 的高斯分布曲线相比较。通过比较可以定性判断测量数据分布是否合理, 以及是否存在其他不可忽略的偶然因素。

实验装置

实验装置的方框图如图 6 所示。G-M 计数管放在铅室中, 后接前置放大器, 用于将计数管产生的脉冲进行放大。定标器和高压电源合装在一起, 并提供前置放大器所需的低压电源。

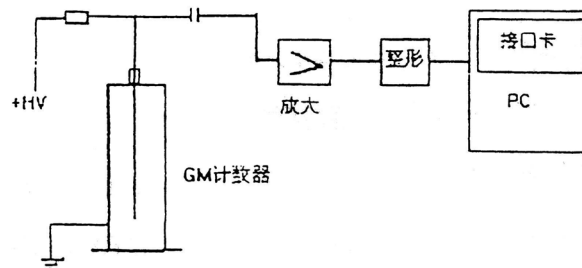


图 6 仪器方框图

实验内容

1. 研究测量时间和重复测量次数对计数率测量误差的影响

- 1) 将放射源放入铅室, 分别以 100 s, 300 s 和 600 s 的时间测量源的放射性计数。求出每次测量的净计数率及相对误差。讨论测量时间对误差的影响。
- 2) 重复测量 6 次, 每次 100 s, 算出 6 次测量的平均值的相对误差, 并与 1) 的单次测量相对误差进行比较。
- 3) 测量本底计数 300 s (即不放源测得的计数)

2. 统计规律的验证

1) 低计数 (Poisson Distribution)

调整源的位置和计数测量时间, 使得测得计数的平均值在 3 ~ 5 之间。

测量 300 个样本点

利用数据处理功能分析测量结果, 用 χ^2 检验是否符合 Poisson 分布。也用频率直方图做定性观察。

2) 高计数 (Gauss Distribution)

调整源的位置和计数测量时间, 使得测得计数的平均值在 500 左右。

测量 300 个样本点

在单组检验中, 做频率直方图及用 χ^2 检验是否符合 Gauss 分布。如果样本点在 3000 以上, 可用分组检验法, 将 3000 个样本点分成 20 组, 每组内样本数为 150。分析小样本的平均值分布 χ^2 和 t 分布。

3. 用双源法测量 G-M 计数管的分辨时间 τ 和 $\Delta\tau$

测量时先放源 A, 再放源 B, 再交换两源的位置, 重复测量次数。

4. 时间间隔分布规律的检验

- 1) 参阅实验参考资料 B, 了解时间间隔分布的原理和测量方法
- 2) 利用计算机进行时间间隔数据的测量样本可在 10000 个左右
- 3) 取 $n = 1$, 在图中比较实验结果与理论曲线, 了解分辨时间对实验结果的影响
- 4) 取间隔 $n = 1, 2, 5, 10$ 从图中分析实验结果。

附录 GM 计数器软件使用说明

软件在 C:\TESTGM>WHOLE.EXE 中

频域测量:

低计数、高计数这两个菜单都提供了设定“定时时间”, 设定“采样次数”的功能。在低计数数据处理中提供了理论与实验结果的比较, 及 χ^2 检验的结果。在高计数数据处理中, 可以从两个角度来分析结果: 一是单组检验法, 可画出直方图, 并与理论计算相比较, 给出直方图中每组的

实验频数和理论频数，最后给出 χ^2 值。二是分组检验，提供分组后的平均值分布， t 分布和 χ^2 分布情况。

时域测量：

时间间隔测量可设定样本数量，数据处理可选间隔 n ，在图中显示实验结果与理论曲线。对公式中的时间常数 τ 进行拟合，可观察分辨时间。

LabVIEW 计算机实测与控制

课程介绍

计算机辅助的实时测量由于其克服了传统测量技术精度差，效率低下等缺点而越来越多的应用在现代科研中。而计算机实时控制技术也由于其智能化和高精度、高效率的控制进入现代科研领域。

本课程主要介绍计算机实时测量和控制的主要器件（A/D 控制卡）及各种实用测量和控制电路以及编写 Labview 实时监控程序。通过这一系列实验，给学生创造一个模拟的环境，进行测量和控制的科研实践。

更加详尽的讲义请到网站上下载：

http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=exp:labview_sensor

基础知识

1. A/D 采集卡

所谓 A/D 采集卡是指模拟量（Analog）的数字化（Digital），或者是数字量的模拟量输出。一般 A/D 采集卡上都设计有 12-16Bit 分辨率的 A/D 转换器和 D/A 转换器，并且可以进行多通道（8-16 路）的数据输入和输出。

我们实验中的采用的 U18 A/D 采集卡上设计有 12Bit 分辨率的 A/D 转换器和 D/A 转换器，提供了 16 路单端或 8 路双端的模拟输入通道和 4 路 D/A 输出通道，A/D 转换器输入信号范围： $\pm 5V$ 、 $\pm 10V$ 、 $0\sim 10V$ ，D/A 转换器输入信号范围： $0\sim 5V$ 、 $0\sim 10V$ 、 $\pm 5V$ 、 $\pm 10V$ 。16 路开关量输入，16 路开关量输出且均能上电清零。

更加详细的说明请参考实验室提供的《U18 数据采集卡硬件使用说明书》。

2. 传感器和外围电路

由于 A/D 采集卡的输入输出量程都在 10V 以内，分辨率也是在量程以内的 4096（12 位）格。所以一般来说，实验中所测量的数据和控制信号都是需要先通过外围电路转换成为 $\pm 5V$ 以内的电压信号以后才能通过 A/D 卡进行采集和控制。以下以温度测量为例说明：

基于 NTC 热敏电阻器的温度测量原理

在一定的温度范围内，NTC 热敏电阻的阻值与温度关系满足下列经验公式：

$$R = R_0 e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (1)$$

式中， R 为该热敏电阻在热力学温度 T 时的电阻值， R_0 为热敏电阻处于热力学温度 T_0 时的阻值。 B 是材料常数，它不仅与材料性质有关、而且与温度有关，在一个不太大的温度范围内， B 是常数。

由 (1) 式可求得，NTC 热敏电阻在热力学温度 T_0 时的电阻温度系数 α

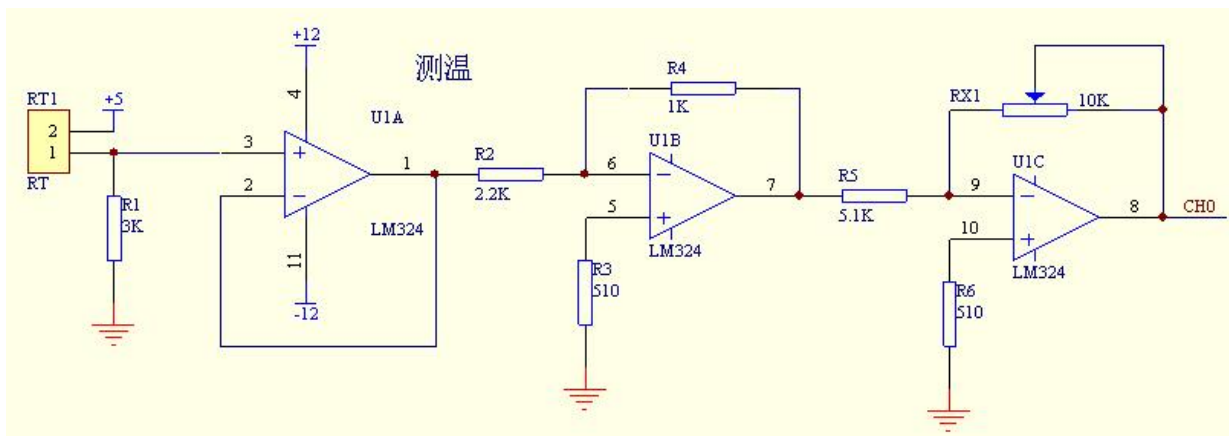
$$\alpha = \frac{1}{R_0} \left(\frac{dR}{dT} \right)_{T=T_0} = -\frac{B}{T_0^2} \quad (2)$$

由 (2) 式可知，NTC 热敏电阻的电阻温度系数是与热力学温度的平方有关的量，在不同温度下， α 值不相同。

对 (1) 式两边取对数，得

$$\ln R = B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) + \ln R_0 \quad (3)$$

在一定温度范围内， $\ln R$ 与 $\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}$ 成线性关系。可以用作图法或最小二乘法求得斜率 B 的值。并由 (2) 式求得某一温度时 NTC 热敏电阻的温度系数 α



NTC 热敏电阻器的测量外围电路图

参考上图，热敏电阻器接在电路左侧，右侧接在 A/D 采集卡的输入通道 0 (CH0)，当温度变大后，热敏电阻 RT1 电阻变小，在分压点产生一线性电压，经电压跟随器保持后，输入 LM324 进行两级放大，最后输出一个正向、与温度变化同方向的线性电压。

本实验中所用的热敏电阻材料常数 $B=3470K$, $T=298K$ 时, $R=5K$ 。由于电路前端有一个分压电阻 $R1=3K$, 则输出电压

$$V = \frac{3}{3+5} \times \frac{5}{3470 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right)} \times 5 \quad (4)$$

对上式进行近似处理后得到温度与电压的线性关系

$$T = 23.68 * V - 19.59 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (5)$$

这样一来，测量电路输出的模拟电压通过 AD 卡测量转换为数字信号输入 PC，温度值 T 即可通过上式计算出来。

请参考实验室提供的《LabVIEW 虚拟仪器教学系统实验指导书 DYS18II》中温度测量部分。

3. Labview 编程

LabVIEW 是实验室虚拟仪器集成环境 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 的简称，是美国国家仪器公司 (NATIONAL INSTRUMENTS, 简称 NI) 的创新软件产品，也是目前应用最广、发展最快、功能最强的图形化软件集成开发环境。目前它广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受，视为一个标准的数据采集和仪器控制软件。

LabVIEW 集成了与满足 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485 协议的硬件及数据采集卡通讯的全部功能。它还内置了便于应用 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数。这是一个功能强大且灵活的软件。利用它可以方便地建立自己的虚拟仪器，其图形化的界面使得编程及使用过程都生动有趣。图形化的程序语言，又称为“G”语言。其编写的程序称为虚拟仪器 VI (Virtual Instrument)，以.VI 后缀。使用这种语言编程时，基本上不写程序代码，取而代之的是流程图或流程图。它尽可能利用了技术人员、科学家、工程师所熟悉的术语、图标和概念，因此，LabVIEW 是一个面向最终用户的工具。它可以增强你构建自己的科学和工程系统的能力，提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径。使用它进行原理研究、设计、测试并实现仪器系统时，可以大大提高工作效率。

LabVIEW 编程的初学者请参考实验室提供的《LabVIEW 入门讲义》和《LabVIEW 术语快速索引》。

实验内容

实验一：LabVIEW 入门

这一部分为学生介绍 LabVIEW 编程的基础知识, 已经掌握 LabVIEW 的基本编程的学生可以跳过这一章。

学习《Labview 入门讲义》的第一课《LabVIEW 概述》，完成书中以下这些练习：**练习 1-1 至 1-5。**

实验二：利用 LabVIEW 进行数据采集

这一部分实验让学生掌握 LabVIEW 编程控制 AD 卡的数据采集。

学习《Labview 入门讲义》的第二课《数据采集》，《U18 数据采集卡软件使用说明书》，《U18 数据采集卡硬件使用说明书》，完成《Labview 虚拟仪器教学实验系统实验指导书 DYS18II》书中实验 1：温度测量和实验 7：电子秤设计。

实验三：利用 LabVIEW 进行输出控制。

这一部分实验让学生掌握 LabVIEW 编程控制 AD 卡的信号输出控制。

学习《U18 数据采集卡软件使用说明书》，《U18 数据采集卡硬件使用说明书》，完成《Labview 虚拟仪器教学实验系统实验指导书 DYS18II》书中实验 2：光强检测与控制、实验 3：光强检测与控制、实验 4：红外传输、实验 5 模拟电机工作和实验 6：电机调速与测速。

实验四：用风扇测速和红绿灯模块制作智能风扇。

学习《U18 数据采集卡软件使用说明书》，《U18 数据采集卡硬件使用说明书》和《Labview 虚拟仪器教学实验系统实验指导书 DYS18II》中相关章节, 利用 Labview 虚拟仪器实验系统中的风扇测速和红绿灯模块部分程序实现如下功能：当风扇转速

改变时红灯亮起，转速改变十次之后自动关闭风扇，风扇变动次数通过液晶显示数字屏显示出来。

实验五：用模拟电梯模块完成应用红黄绿灯指示电梯运行状态的功能

学习《U18 数据采集卡软件使用说明书》，《U18 数据采集卡硬件使用说明书》和《Labview 虚拟仪器教学实验系统实验指导书 DYS18II》中相关章节，利用 Labview 虚拟教学实验系统的模拟电梯模块和红绿灯模块实现如下功能：

1. 当电梯停止时显示黄灯亮起
2. 当电梯上行时显示红灯亮起
3. 当电梯下行时显示绿灯亮起
4. 电梯运行时能够显示相应楼层号。

实验六：使用 LabVIEW 控制信号发生器和锁相放大器。

学习《Labview 入门讲义》的第三课《仪器控制》。

等离子体实验

等离子体实验见实验室补充材料及网站上下载电子版内容

<http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=exp:plasma:start>

Arduino 单片机基础应用及应用开发

从零开始学习 arduino

参见 实验网站上内容 <http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=arduino:start>