

## 第12届 CPHO-S 物理竞赛联考

### 实验笔试题

考试时间：2022年10月8日 15:00—16:00

命题人：程幸 杨旸 向滢滢  
审题人：李瀚奕 李燃亮 王天齐

#### 考生必读

- 1、考生考试前请务必阅读本须知。
- 2、本试题共7页，答题卡共2页，总分80分。
- 3、如遇到试题或答题卡印刷不清楚的情况，请务必向监考老师提出。
- 4、需要阅卷老师评阅的内容一定要写在答题纸相应题号后面的空白处，请注意合理规划答题以避免超出答题区域导致作答无效。
- 5、若无特别说明，不需要进行误差分析，但结果需保留合理的有效位数。

#### A. 两个基础实验（20分）

##### 1. 金属丝杨氏模量的测量

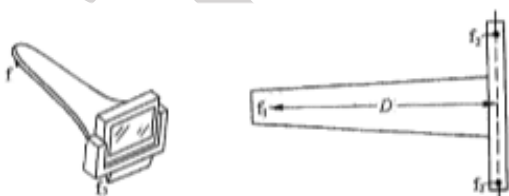
如图a.1所示为光杠杆法测杨氏模量装置示意图，图a.2所示为光杠杆示意图。

在实验测量之前，需要调节装置到测量状态，基本步骤如下：

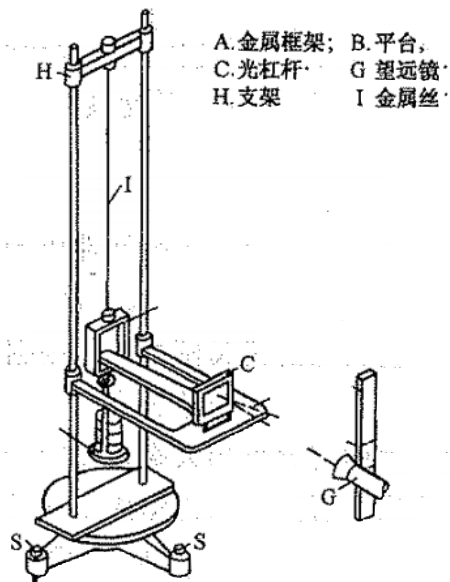
（1）取下光杠杆C，打开制动器，调节底脚螺丝S，使支架H竖直。判断支架H竖直的标准是：\_\_\_\_\_①\_\_\_\_\_。

（2）调节平台B，使光杠杆C放上去以后， $f_1$ 和 $f_2f_3$ 维持水平。放光杠杆C时，要注意保持框架A不动，使其下方的圆柱不与制动圈接触；同时\_\_\_\_\_②（操作）\_\_\_\_\_。

（3）调节镜尺组。先大体上选好镜尺组的位置，使望远镜与平面镜等高，望远镜光轴水平，竖尺保持竖直。灯光的位置要保证：\_\_\_\_\_③\_\_\_\_\_。



图a.2 光杠杆示意图



图a.1 装置示意图

（4）调节望远镜G，分粗调和细调两步进行：首先进行粗调，即适当挪动镜尺组和灯光，使眼睛在望远镜筒的上方(靠近镜筒)沿镜筒方向能从平面镜中看到明亮的竖尺的像。粗调完成后，再进行细调，即先调节目镜，看清叉丝，然后调节物镜，看清竖尺的像，使叉丝与竖尺的像在同一平面上，\_\_\_\_\_④（操作目的）\_\_\_\_\_，反复调节，最后使与望远镜等高的竖尺刻度 $r_0$ 落在叉丝上。

##### A.1.1（4分）完善上述步骤。

本实验的数据处理常采用最小二乘拟合法或是逐差法，但逐差法有许多衍生类型，为了便于说明问题，我们假设测量得到 12 个数  $r_1, r_2, \dots, r_{12}$ ， $r_i$  是金属丝在负荷  $i+1$  个砝码的状态下，望远镜中的读数。

现在的问题是，为了比较准确地求出每增加一个砝码望远镜中读数变化量的最佳估值  $\delta l$ ，如何处理这 12 个数据，效果较好。由于这一组数据是在相同的实验条件下测得的，因而是等精度的，假设每个  $r$  的不确定度均为  $\sigma$ 。

**A.1.2 (6 分)** 分别计算下列三种数据处理方式得到  $\delta l$  的不确定度，直接写在答题卡相应位置，并判断何种处理方式最佳：

a. 将数据分为三组  $\{r_1, r_2, \dots, r_4\}, \{r_5, r_6, \dots, r_8\}, \{r_9, r_{10}, \dots, r_{12}\}$ ，每组数中首尾两个相减后取平均；

b. 将数据分为两组  $\{r_1, r_2, \dots, r_6\}, \{r_7, r_8, \dots, r_{12}\}$ ，对应项  $\{r_i, r_{i+6}\}$  相减后取平均，此即我们最常用的常规逐差法；

c. 将数据分为三组  $\{r_1, r_2, \dots, r_4\}, \{r_5, r_6, \dots, r_8\}, \{r_9, r_{10}, \dots, r_{12}\}$ ，将第一、三组数中的对应项  $\{r_i, r_{i+8}\}$  相减后取平均，不使用第二组数。

## 2. 电测法测定冰的比熔化热

测定冰熔化热的方法有很多，最常见的是混合法。但混合法中存在热量损失难以补偿的系统误差。而采用电测法，可以保证实验过程在恒温恒压的状况下进行，是更为理想的实验方法。

电测法的主要思路为：在保温瓶中装满一定量的冰水混合物，保温瓶的橡皮塞上插有一根细玻璃管，如图所示。橡皮塞上端玻璃细管中露出一段水柱。冰和水的混合物中插有一只电加热器。用加热器为体系输入热量，用细管检测保温瓶内的水位变化，由此测量冰的比熔化热。

### 实验仪器

保温瓶（热水瓶胆）、冰槽、电热器、橡皮塞（盖保温瓶用）、细玻璃管、标尺、直流稳流电源、直流电压表、直流电流表、秒表、活塞杆

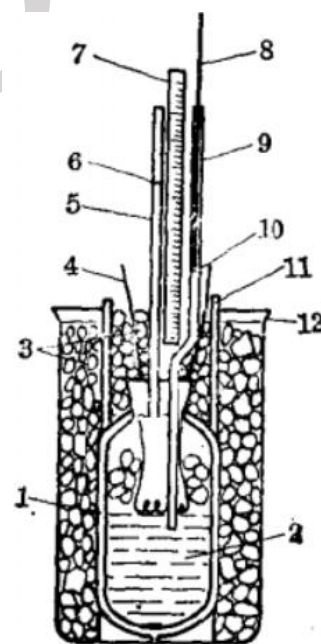
### 实验内容

(1) 制备冰。

(2) 把插有电加热器和玻璃管的橡皮塞盖在热水瓶口，并密封，同时将玻璃管 5 的水注满到标记位置。再将热水瓶（紧包有铝筒）放入冰和水浴槽内，在瓶口附近也有冰和水混合物，这样 ①（操作目的）。

(3) 考虑到热水瓶中的冰水混合物仍有可能吸收周围空气中热量而慢慢熔化。在未接通电源时，玻璃管中水位会慢慢下降，需 ②（操作），始终使玻璃管 5 中水位维持固定高度。每隔一段时间记录玻璃管 9 中的水面高度。

(4) 接通电源，这时电热器释放热量被冰和水吸收，使冰部分熔化。并继续调节，使玻璃管 5 中水位不变，同时一面记时间，一面读数。实验中通电电流必须始终保持稳定，记录通电电流值和电压值。



- 1—热水瓶胆；2—冰水混合物  
3—冰水混合物；4—电热器引线  
5—细玻璃管；6—管上基准标记  
7—标尺；8—活塞杆  
9—稍粗玻璃管；10—供观测用的杆末端  
11—铝圆筒；12—盖子

图 a.3 电测比熔化热装置图

(5) 当水位下降到玻璃管 9 露出长度的一半左右时，切断电源，冰继续熔化。重复上述步骤，记下玻璃管 9 中水位随时间变化关系。直至下降“速率”与开始测量时系统吸收环境空气中热量下降“速率”基本上接近为佳。

(6) 用读数显微镜测量玻璃管 9 的直径  $d$ ，计算冰的比熔解热。

#### A.2.1 (4 分) 将实验步骤补充完整。

实验数据如表 a.1 所示，图 a.4 为根据表 a.1 作出的水柱高度—时间关系图。

表 a.1 水柱高度—时间关系表 (单位: cm)

时间	高度	时间	高度	时间	高度
9:02'45"	49.8	10:14'10"	41.1	10:19'35"	20.5
9:13'45"	48.9	10:14'35"	39.3	10:20'05"	18.3
9:31'30"	48.5	10:15'19"	36.4	10:20'35"	16.6
9:56'45"	47.4	10:15'45"	34.6	10:21'10"	15.8
10:11'15"	47.1	10:16'43"	30.8	10:21'58"	14.5
10:12'00"	47.1	10:17'15"	28.7	10:22'51"	14.1
10:12'30"	46.2	10:17'50"	25.4	10:23'40"	13.9
10:13'00"	44.8	10:18'25"	24.3	10:33'25"	13.3
10:13'25"	43.1	10:18'55"	22.6	10:40'40"	12.7

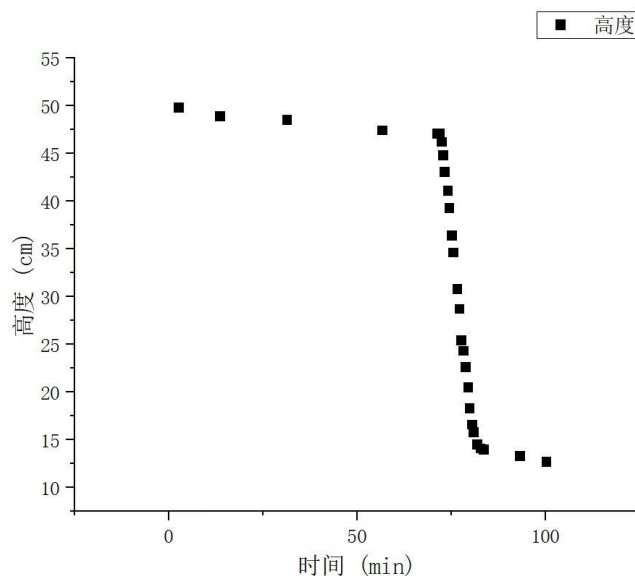


图 a.4 水柱高度—时间关系图

#### A.2.2 (6 分) 充分利用测量数据，计算冰的比融化热 $L$ 。

玻璃管 9 直径  $d = 5.52 \text{ mm}$ ，加热电压  $U = 10.2 \text{ V}$ ，加热电流  $I = 4.20 \text{ A}$ ，水的密度

$\rho_w = 1.000 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，冰的密度  $\rho_i = 0.900 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

## B. 探究光敏器件光电特性及运用（30 分）

当前利用光学测量的仪器运用十分广泛，从交通到建筑，而若只通过机械测量，很难达到需要的精确度，也不便于数字化。而光电器件的出现正好解决了这样一个问题，把难以感知的光信号转化为数字信号，导入计算机处理，可以快速、准确地得出结果，大大降低了实验的操作难度，也让物理实验信息化、数字化、智能化。

### 实验仪器

分光计一台、半导体激光器一个、钠灯一台、光栅一个、万用电表一个、光电池一个、光敏电阻一个、导线若干、光具座一个、双通道示波器一台、信号发生器一台、同轴电缆若干、电阻箱 2 个

### 实验目的

利用光敏电阻测量激光的单缝衍射，从而计算得出单缝的参数，进而设计光敏电阻在测量光强度方面的实验方案。

### 实验内容

#### 1. 激光波长的测量

利用汞绿线测量光栅常数，并依此测量激光波长，测量得到的数据如表**b.1**所示。其中角标 $1,2$ 分别代表（正负） $1,2$ 级谱线，角标 $L,R$ 分别代表左侧与右侧测量得到的值。

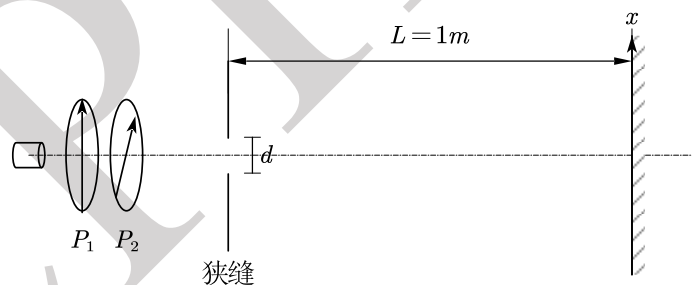
表**b.1** 光栅衍射测量数据表（ $\lambda_{\text{green}} = 546.07 \text{ nm}$ ）

光谱线	$\theta_{+2L}$	$\theta_{+2R}$	$\theta_{+1L}$	$\theta_{+1R}$	$\theta_{-1L}$	$\theta_{-1R}$	$\theta_{-2L}$	$\theta_{-2R}$
汞绿光	$39^\circ 8'$	$219^\circ 2'$	$56^\circ 22'$	$236^\circ 24'$	$88^\circ 5'$	$268^\circ 3'$	$105^\circ 16'$	$285^\circ 21'$
激光	$33^\circ 54'$	$213^\circ 57'$	$54^\circ 7'$	$234^\circ 5'$	$90^\circ 17'$	$270^\circ 19'$	$110^\circ 31'$	$290^\circ 33'$

**B.1.1**（7 分）列式计算光栅常数 $d$ 及其不确定度，不确定度保留两位有效数字，上述测量中每个角位置的不确定度均为 $\sigma_\theta = 1'$ 。

**B.1.2**（1 分）计算激光波长 $\lambda_0$ 的值。

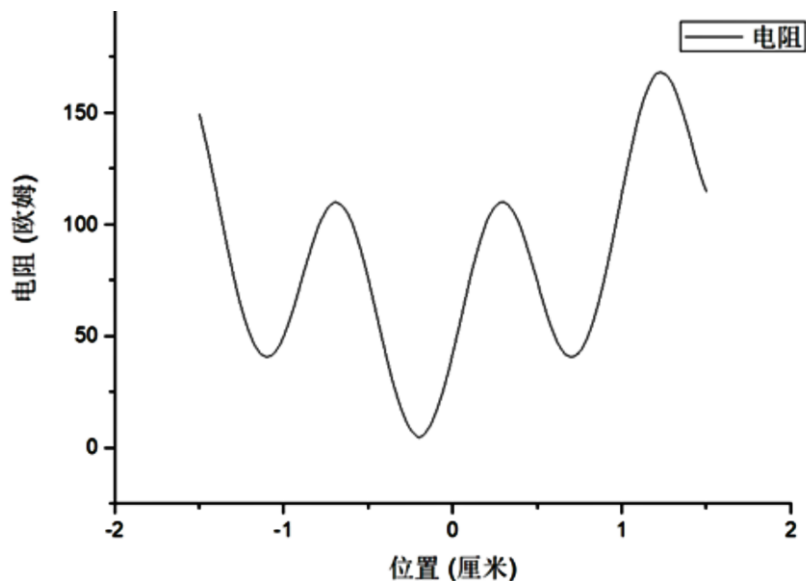
#### 2. 利用激光衍射测量单缝宽度



图**b.1** 激光衍射实验示意图

如图**b.1**所示，利用激光进行单缝衍射实验，偏振片 $P_1$ 与 $P_2$ 用于调节激光的强度。于接收光屏处设置一个光敏电阻，固定于一个可读数的导轨上，利用万用表欧姆挡测量光敏电阻阻值，其余数据已在图中标明。

测量得到光敏电阻阻值一位置关系如图**b.2**所示。



图b.2 光敏电阻阻值－位置关系图

此处半角宽的定义为：谷值加上与该谷距离最近的峰值与谷值之差的 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 对应衍射角间距的一半。

**B.2.1 (4分)** 利用图b.2，计算单缝缝宽 $d$ 及 $0, \pm 1$ 级谷的半角宽 $\delta\theta_{\pm 1,0}$ ，直接填在答题卡的相应位置。

**B.2.2 (2分)** 若仅使用一个偏振片，依然可以调节出射光的光强，请解释原因。

**B.2.3 (2分)** 分析偏振片调节不当导致光强过大或过小对本实验产生的影响。

### 3. 探究发光二极管的发光强度与电流强度的关系

光电池和普通二极管一样，也是由一个 PN 结组成的半导体器件，也具有单方向导电特性。和普通二极管相比，在结构上不同的是，为了便于接受入射光照，PN 结面积尽量做的大一些，电极面积尽量小些，而且 PN 结的结深很浅，一般小于 $1\ \mu\text{m}$ 。光电二极管的短路电流正比于入射光强。

**B.3.1 (8分)** 利用以下仪器，在示波器上展现发光强度与电流强度的关系图：

双通道示波器一台、信号发生器一台、同轴电缆若干、电阻箱 2 个、发光二极管一个、光电池一个、导线若干。

要求给出实验电路简图、简述示波器、电阻箱参数设定。

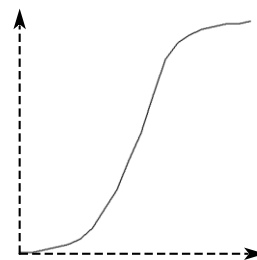
**B.3.2 (2分)** 以下不能作为信号发生器的波形的有 ( )：

- a. 三角波      b. 正弦波      c. 方波      d. 阶梯形波      e. 锯齿波

发光二极管的响应时间指从接通电源到亮度为最大亮度的 90%所需的时间或断电后从最大亮度降至 10%亮度所需的时间（亮度与时间可视作 $e$ 指数关系），大部分 LED 的响应时间在 10 ns 左右。

图b.3为 B.3 部分从示波器上得到的图像，此时信号发生器输出频率为 $f = 1\ \text{kHz}$ 的正弦波。

**B.3.3 (4分)** 现将信号发生器的频率调整为 100 MHz，定性画出此时示波器上的图像。



图b.3 示波器波形图



### C. 弗兰克—赫兹实验（30 分）

弗兰克—赫兹实验证明原子内部结构存在分立的定态能级。这个事实直接证明了汞原子具有玻尔所设想的那种“完全确定的、互相分立的能量状态”，是对玻尔的原子量子化模型的第一个决定性的证据。本实验可观测到电子与汞蒸汽原子碰撞时的能量转移的量子化现象，测量汞原子的第一激发电位，从而加深对能级概念的理解。

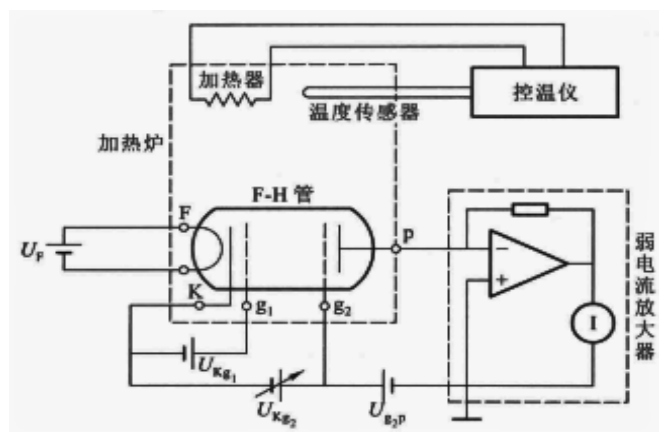
#### 实验仪器

水银管、温度传感器、控温仪、电热丝、电流放大器、恒压电源、加热炉、电流表

#### 实验目的

观测电子与汞蒸汽原子碰撞时能量转移的量子化现象，测量汞原子的第一激发电位。

#### 实验内容



图c.1 实验装置结构图

本实验的主要实验器具是一个类似真空管的管状容器，称为水银管，如图c.1所示，其内有低气压的水银气体。水银管内，装了三个电极：阴极、网状控制栅极、阳极：阴极的电势低于栅极跟阳极的电势，而阳极的电势又稍微低于栅极的电势，阴极与栅极之间的加速电压是可以调整的。通过电流将钨丝加热，钨丝会发射电子。由于阴极的电势高于钨丝的电势，阴极会将钨丝发射的电子往栅极方向送去。因为加速电压作用，往栅极移动的速度和动能会增加。到了栅极，有些电子会被吸收；有些则会继续往阳极移动。通过栅极的电子，必须拥有足够的动能，才能够抵达阳极；否则，会被栅极吸收回去。

各个电压源的用途如下：

$U_F$ 为电极电压，提供灯丝电源，放出电子。

$U_{kG1}$ 提供电子初始加速电压（控制电子束的强度）。

$U_{kG2}$ 为加速电压（加速电子使之轰击汞原子）。

$U_{g2p}$ 为减速电压。

装置于阳极支线的安培计可以测量抵达阳极的电流，随着电子加速电压的改变，电流也将产生周期性变化。

电流的周期性主要来源于电子与气体（汞）原子间的碰撞情况的周期性。电压从零开始增加，电子动能也随之增加，射向阳极的电子数也增加，此时虽然电子与汞原子之间发生了碰撞，但该碰撞属于弹性碰撞，电子并不损失能量，因而电流随电压增加而增加。

逐渐增大电子的加速电压，当电压超过汞原子激发态能量 $\Delta E$ 时，电流突然下降，说明电子与汞原子发生了非弹性碰撞，电子使汞原子从基态跃迁到激发态，在碰撞中损失动能，不能克服反向电压的阻滞到达板极 P，从而电流下降。

以此类推，如电压继续增加，发生非弹性碰撞后的电子动能继续增加，当电子的动能即将达到 $n\Delta E$ 时，到达板极 P 的电子数再次增加，使得电流上升并接近峰值。当电压超过 $n\Delta E$ 时，电子与汞原子又发生非弹性碰撞，电流再次下降。

## 1. 原理分析

由于管中温度较高，电子的平均自由程较短，从而加速后的最大速率较低，故只能测量到汞的第一激发态能量。

**C.1.1 (4 分)** 若想测量到更高的激发态，应当如何调节参数。

**C.1.2 (4 分)** 考虑到此实验中的数据应该呈现多组峰，请给出一个合理的数据取样方案。

已知：总的电压变化范围为 0 – 30 V，每组数据之间电压差在 0.1 V 量级。

**C.1.3 (4 分)** 给出方案，调节使得测量曲线的峰谷比明显。

## 2. 数据处理

**C.2.1 (6 分)** 图 c.2 为实验中测得的整体图像，列表记录各峰值对应的加速电压。

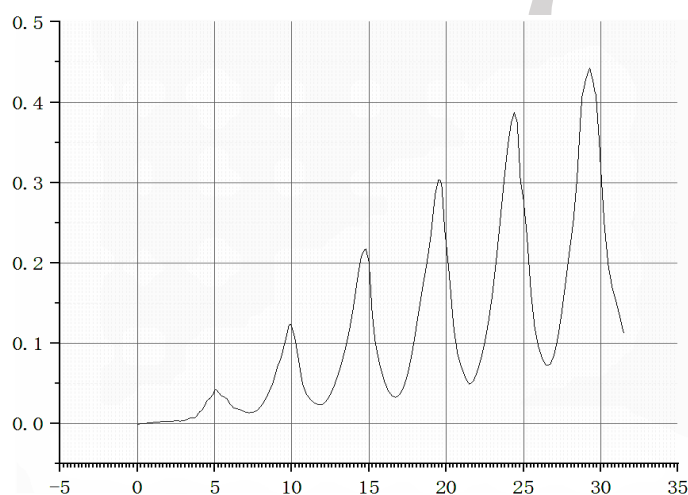


图 c.2 赫兹实验数据图

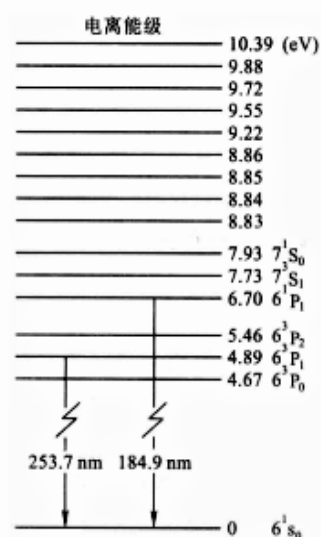


图 c.3 汞原子能级图

**C.2.2 (8 分)** 作图计算汞的第一激发能。

**C.2.3 (4 分)** 图 c.3 为汞原子的能级图，可以发现，测量结果并非第一激发态 4.67 eV，而是更高 4.89 eV 左右的能级，请给出一种合理的解释。