



光学方法探索样品的空间结构

——第21届亚洲物理奥赛 实验第2题解答

刘丽飒 宋 峰

(南开大学物理科学学院 300071)

本题分为四个部分:A部分进行光与样品的准直,B部分测量样品中微球间距以及微球直径,C部分测量样品中矩形网格阵列的矩形结构尺寸和取向角,D部分测量样品网格间距,E部分对C和D测量到的矩形网格阵列形貌进行图形化。本文在官方提供的参考答案基础上,给出详尽的解答过程与注意事项,对考察要点与评分标准进行分析。

A部分:光与样品的准直(1.0分)

双缝放置在最佳位置时,在屏幕上可观察到符合答题纸表格要求,至少两个正负清晰的级次暗纹,该干涉条纹距离中心对称,亮度左右相同。

A.1 双缝样品的最佳位置值($X_{\text{sample}}, Y_{\text{sample}}$)=(3700, -2900)。

A.2 根据最佳位置值,绘制观察到的干涉条纹,见图1。记录一、二阶暗条纹的位置(x, y),计算到原点的距离 S ,见表1。

确定相邻两个暗条纹之间的间距 ΔS ,依据对称测量和累加法克服实验误差,采用正负二级暗线间距之和,除以3得出,并注意两个有效数字的取位。本小问满分0.5分。

A部分考察学生对光路的调节能力。 X 位置偏差在 ± 300 之内,得0.25分,在 $\pm 400 \sim 600$ 仅得0.1分; Y

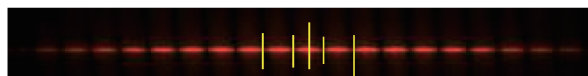


图1 对参考答案中给出的衍射花样进行级次标记(黄色线段)

表1 A.2 实验数据记录表

级次,条纹	-2,暗	-1,暗	1,暗	2,暗
(x, y)	(-0.98,0)	(-0.38,0)	(0.34,0)	(0.98,0)
$S(\text{cm})$	0.98	0.38	0.34	0.98
$\Delta S(\text{cm})$	0.65			

位置偏差在 ± 500 之内得0.25分,在 $\pm 600 \sim 1000$ 仅得0.1分。满分0.5分。测量条纹时注意依据对称性,正确识别并标记出中心亮条纹和正负一级以及正负二级暗条纹位置,如图1,得0.1分。这里要注意的是零级中心识别不准确但依然需要标记。正负一级暗纹位置偏差($\pm 0.08, \pm 0.08$)之内得0.15分,正负二级暗纹位置偏差($\pm 0.08, \pm 0.08$)之内得0.15分。 ΔS 偏差在 ± 0.04 之内得0.1分。从评分规则可以看出,如果采用正负一级暗线间距计算 ΔS ,结果得0.72,超出的正确区间,不得分。

B部分 样品结构尺寸探索:微球间距以及微球直径的探测(3.0分)

B.1 微球密排形成类光栅的周期结构,依据光栅公式 $d \sin \theta = k \lambda$, 其中 k 为衍射级次,

$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{S}{L}\right)$, 得:

$$d = \frac{k\lambda}{\sin(\tan^{-1}(S/L))} \quad (1)$$

正确给出公式(1), 得0.5分。

B.2屏幕位于 $L = 60 \text{ cm}$ 的位置, 在屏幕上可

以看到相应的衍射图案。以波长 488, 514, 632.8 nm 激光为例, 在同一环上记录 5 个点, 记录微球在屏幕上衍射图样的坐标 (x, y) , 计算距离 S 、平均值 \bar{S} 以及 $\tan^{-1}(\bar{S}/L)$ (单位: 弧度), 具体数据见表 2。

表 2 B.2 实验数据记录表

$\lambda =$ 488 nm	(x, y)	(-4.04, 6.68)	(3.00, 5.50)	(4.08, -4.60)	(5.76, 0.48)	(-5.68, 0.65)
	$S(\text{cm})$	6.18	6.26	6.15	5.78	5.71
	$\bar{S}(\text{cm})$	6.02±0.11				
	$\tan^{-1}\left(\frac{S}{L}\right)$	0.0999±0.0019				
$\lambda =$ 514 nm	(x, y)	(3.32, 5.64)	(6.16, 0.48)	(4.46, -4.90)	(-3.12, -5.64)	(-6.00, -0.64)
	$S(\text{cm})$	6.54	6.18	6.63	6.45	6.03
	$\bar{S}(\text{cm})$	6.37±0.11				
	$\tan^{-1}\left(\frac{S}{L}\right)$	0.1057±0.0019				
$\lambda =$ 632.8 nm	(x, y)	(4.04, 7.00)	(7.44, 0.68)	(5.24, -5.96)	(-3.97, -7.04)	(-7.44, -0.68)
	$S(\text{cm})$	8.08	7.47	7.94	8.08	7.47
	$\bar{S}(\text{cm})$	7.81±0.14				
	$\tan^{-1}\left(\frac{S}{L}\right)$	0.1294±0.0023				

其中 $S = \sqrt{x^2 + y^2}$, 取三个有效数字; 平均值 \bar{S} 取三或四个有效数字; $\tan^{-1}(\bar{S}/L)$ 由函数的误差传递公式得出, 保留到小数点后第四位。

B.3 参考图 2 中微球排列示意, 按照等径圆球的体心立方密堆积, 微球的直径 a 满足 $\sqrt{3}a/2 = d$, 利用公式(1)可以计算出三种激光源实验中每个实验所对应的微球之间的距离 d 。对应 488 nm、514 nm、632.8 nm 激光, 参考表 2 中的数据, 衍射光栅对应的 $d = 4.89 \mu\text{m}$ 、 $4.87 \mu\text{m}$ 、 $4.90 \mu\text{m}$; $a = 5.65 \mu\text{m}$ 、 $5.63 \mu\text{m}$ 、 $5.66 \mu\text{m}$ 。 $\bar{a} = 5.627 \pm 0.020 \mu\text{m}$ 。

B 部分考察学生对光路中同一环衍射点的判定能力, 为减小误差, 屏幕 L 与样品之间的间距选择以获得衍射点小而亮、便于测量的位置为最佳。题目并没有要求对称测量, 因为衍射斑纹可能不是一个点而是个大圆斑, 弥散或者某个位置由于某种原因缺失等等影响观察的情况。类似情况在对晶体衍射观察时常见到, 如图 2 左下提供了参考示例(非参考解答提

供)。图 2 为按照 632.8 nm 激光取得的数据绘制还原的结果。题目假定整个系统的光路处于最佳状态, 这可以理解为物体、衍射斑以及采集坐标纸的中心重合。激光波长增加, 所测得的条纹距离 S 增大。

表 2 中, 每个 (x, y) 和计算出的 S 值 0.05 分,

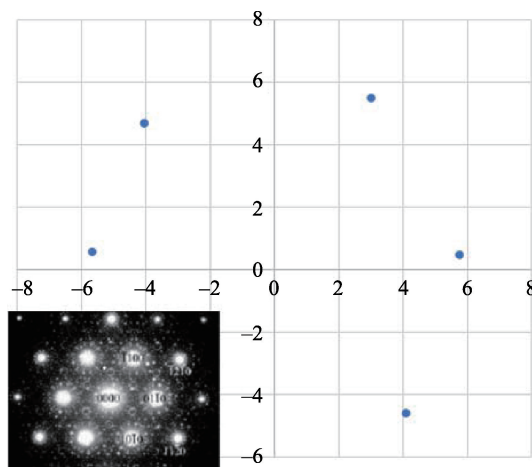


图 2 632.8 nm 激光微球衍射点还原图 (横纵尺寸单位: cm) 与参考示例(左下)

15个,合计0.75分;每个 $\tan^{-1}(\bar{S}/L)$ 误差在10%以内给0.25分,合计0.75分,如 $\tan^{-1}(\bar{S}/L)$ 误差在11%~20%以内,每个得0.1分。 \bar{S} 计算和表中不确定度不计分在评分细则中没有占分。满分1.5分。

B.3中,每个正确 d 得0.1分,每个正确 a 得0.2分, \bar{a} 误差在0.35%以内0.1分。满分1.0分。

C 部分样品结构尺寸的探索:从衍射图样中推导出矩形结构的尺寸和对应的取向角。(2.5分)

C.1 可以选择 488、514、632.8、694.3 nm 四种激光之一进行实验。在实际应用中许多透明玻璃微球以二维密集堆积条件排列在旋转了一定角度的矩形网格阵列中。矩形网格阵列尺寸大于微球,同样波长和距离情况下对应矩形网格阵列尺寸的衍射密集不易分辨,

需要加大距离进行实验。故题目要求将屏幕与样品的距离固定在 $L=90$ cm 处,观察衍射图样。这里以 632.8 nm 为例,给出两个轴向上4到7阶亮条纹的坐标 (x, y) 、计算出的距离 S 、 $\tan^{-1}(S/L)$ 的对应值(单位:弧度)见表3。

C.2 根据衍射公式,表3中轴1的四个 $\sin[\tan^{-1}(\frac{S}{L})]$ 数据与级次成严格的线性关系。考虑到 $\tan^{-1}(S/L)$ 是很小的角度, $\sin[\tan^{-1}(\frac{S}{L})]$ 、 $\tan^{-1}(\frac{S}{L})$ 与 S/L 近似相等。可以对轴1中四个 S 与级次进行线性拟合,求得斜率即为 ΔS_i , 得到 $\Delta S_i=0.973$ cm。同理处理得到 $\Delta S_w=1.12$ cm。在利用 $l=\lambda/\sin[\tan^{-1}(\Delta S_i/L)]$ 计算得到长边长度 $l=58.53$ μm 。同理得到短边长度 $w=50.85$ μm 。当然使用 $\sin[\tan^{-1}(\frac{S}{L})]$ 或 $\tan^{-1}(\frac{S}{L})$ 与级次进行线性拟合求解也可以。

表3 C1部分632.8 nm实验数据记录表

轴1	级次,条纹	4,明	5,明	6,明	7,明
	(x, y)	(3.84, 1.96)	(6.48, 2.44)	(5.48, 2.88)	(6.44, 3.32)
	$S(\text{cm})$	4.31	5.28	6.19	7.25
	$\tan^{-1}(S/L)$	0.0479	0.0586	0.0687	0.0893
轴2	级次,条纹	4,明	5,明	6,明	7,明
	(x, y)	(-2.28, 4.56)	(-2.84, 5.48)	(-3.36, 6.52)	(-3.84, 7.52)
	$S(\text{cm})$	5.10	6.17	7.33	8.44
	$\tan^{-1}(S/L)$	0.0566	0.0685	0.0813	0.0935

C.3将轴1的点画在坐标纸上,如图3。圈出第一象限亮纹的四个点,画出一条线贯穿数据点。读取该直线上距离较远的两点计算出斜率,此斜率为单个矩形的长边相对于水平轴的方向角 ϕ 的正切值。或者对四个坐标的 x 与 y 进行线性拟合求斜率,也可以得到单个矩形的长边相对于水平轴的方向角 ϕ 的正切值,如图4,斜率为0.5246,方向角 $\phi=27.7^\circ$ 。

C部分考察对矩形网格产生的衍射光斑为十字交叉的点中两个轴向4到7阶亮条纹坐标分布记录的准确性。从D部分可以看出前几阶

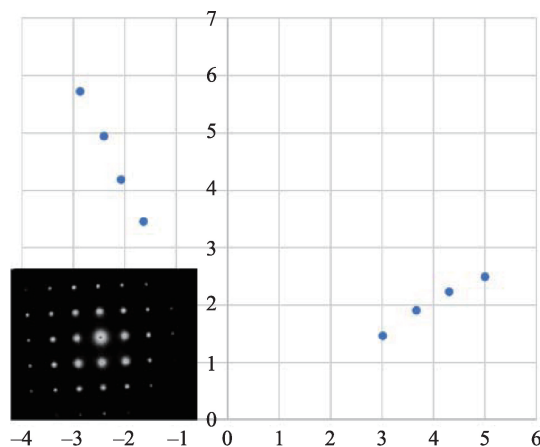


图3 632.8 nm激光网格衍射点还原图(纵横尺寸单位:cm)与参考示例(左下)

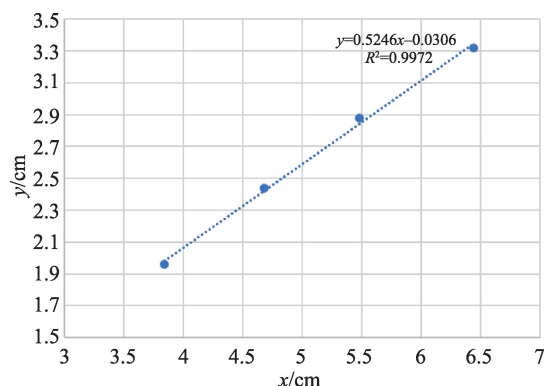


图4 632.8 nm激光网格衍射点线性回归

的亮条纹包含更清晰的细节特征不便于标记。

C.1 官方评分标准只对 $\tan^{-1}(S/L)$ 结果的采分,结果误差在2%以内每个0.1分,误差在2%~5%以内每个给0.05分,满分0.8分。

C.2 评分标准:利用正确的数据处理方法得到 ΔS_x 得0.15分,用其他方法得到的得0.1分。利用正确的数据处理方法得到 ΔS_w 得0.15分,用其他方法得到的得0.1分。 l 和 w 正确计算各得0.2分,满分0.7分。

C.3 评分标准:正确连线得0.4分,正切角误差在 $\pm 1.50^\circ$ 之内的0.6分,正切角误差在 $\pm 1.51^\circ \sim 3.00^\circ$ 之内的0.3分。满分1.0分。

以632.8 nm激光为例衍射点还原图见图3。第一象限是轴1数据点,第4象限是轴2数据点。长边所产生的衍射花样点与点之间的距离比短边所产生的衍射花样点与点之间的

距离小,依据这一点可判断轴1方向对应的是长边。这道题还包含对实验处理方法的考察。找到准确的线性关系是实验处理数据得到矩形结构的尺寸参数的关键。评分要求指出利用正确的数据处理方法得到 ΔS_x 得0.15分,用其他方法得到的得0.1分。 S 与级次并非严格的线性关系,所以不用累加或者逐差等方法处理数据都不是最优结果。例如:任何 S 直接除以对应的级次得到 ΔS ,比如 $7.25/7=1.04$ cm,只能得0.1分。C3部分用线性回归得到单个矩形的长边相对于水平轴的方向角 ϕ ,是比较准确的结果。

D 部分样品结构尺寸探索:对样品中的矩形网格间距进行探测(2.5分)

D.1 屏幕与样品的距离固定在 $L=95$ cm,以使用914 nm红外激光对样品进行照射为例,用光电探测器识别屏幕上细小的衍射斑图。记录屏幕上一组 4×4 的精细衍射亮点的中心坐标。记录坐标位置,画出光斑图案,见图5。利用长边四个点 x 的坐标求平均值与列数进行线性拟合,斜率即为长边相邻光斑之间的距离 ΔS_x ,具体处理方法见表4。

同样处理方法可以得到长边相邻光斑距离 $\Delta S_y=0.411$ cm,短边相邻光斑距离的计算类似,

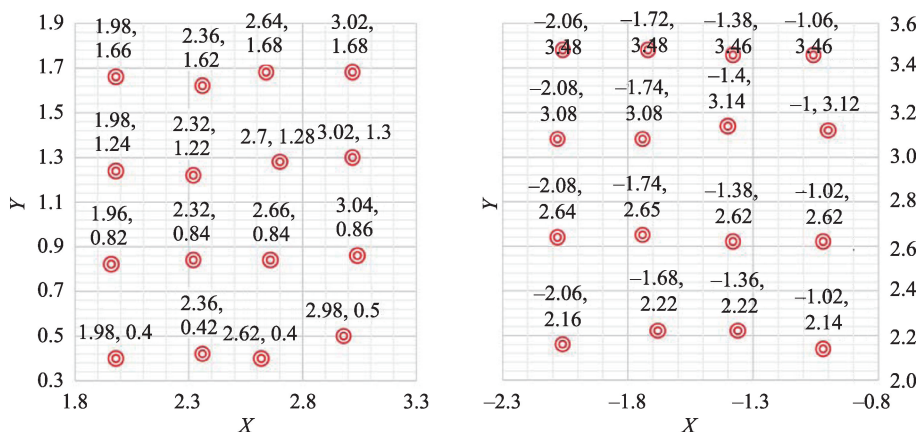


图5 波长914 nm实验记录的 4×4 位置亮点坐标(左:长边方向;中:短边方向)

表4 计算914 nm激光器对长边相邻光斑距离 ΔS_x 。

列数	1	2	3	4
横坐标值/ cm	1.98	2.36	2.64	3.02
	1.96	2.32	2.70	3.02
	1.98	2.32	2.66	3.04
	1.98	2.36	2.62	2.98
平均值/cm	1.975	2.340	2.655	3.015
ΔS_x /cm	0.344			

这里略去。

D.2 根据衍射公式,样品网格的间距 $d_x = \lambda / \sin [\tan^{-1}(\Delta S_x / L) = 914 / \sin(0.344 / 95) = 252 \mu\text{m}$,同理计算得 $d_y = 211 \mu\text{m}$ 。

D部分题目描述:“在前面的问题中用可见光范围内的入射光,屏幕上交叉的明亮条纹内有更精细的衍射斑图案,不容易识别”。如果不改变观察位置只更换波长会将衍射图像按波长比例放大。D部分与C部分测量位置十分接近。以解答C部分时用632.8 nm观察,解答D部分用914 nm激光探测为例,衍射图像放大倍数大约是1.44,放大有限。从评分标准看,测量难度较大。本题依然考察数据处理方法。可以认为同一列四个采样点是对该列横轴位置的4次测量,可以求平均位置;再对不同列的横轴位置坐标平均值与列数,利用非相同条件下多次测量的数据处理方法:线性拟合,求相邻光斑距离 ΔS_x 。纵轴位置间隔也是同样的处理方法。

D.1 评分标准:数据正负号给0.2分。表4中,写明相邻光斑距离计算方法给0.1分,相邻光斑距离数据在 $\pm 0.4 \text{ cm}$ 之内,得0.4分;在 $\pm 1.0 \text{ cm}$ 之内,得0.2分。D.1满分1.9分。

D.2 评分标准:题目给出参考值 $d_x = 249.3 \mu\text{m}$, $d_y = 198.2 \mu\text{m}$ 计算结果在 $\pm 2.5\%$ 以内满分0.6分, $\pm 5\%$ 以内满分0.4分, $\pm 10\%$ 以内满分0.2分。

E部分.样品结构尺寸探索:矩形网格阵列形貌图形化(1.0分)

E.1 根据C部分和D部分的解答,通过观察

衍射条纹获得的结构尺寸和方向信息,确定了样品的具体结构网格。画出 3×3 的矩形阵列表示样品的周期排列,在图中表示 l 、 w 、 d_x 、 d_y 、 ϕ ,如图6。整理数据结果如下:

$(l, w, d_x, d_y, \phi) = (58.53 \mu\text{m}, 50.85 \mu\text{m}, 252 \mu\text{m}, 211 \mu\text{m}, 27.7^\circ)$ 。

E部分依据衍射理论,衍射光斑直线方向与对应的衍射物呈90度分布。正确画出图形并在图中标注物理量即可。 l 、 w 、 d_x 、 d_y 、 ϕ 每个正确的表达和图形表示得到0.2分,满分1.0分。

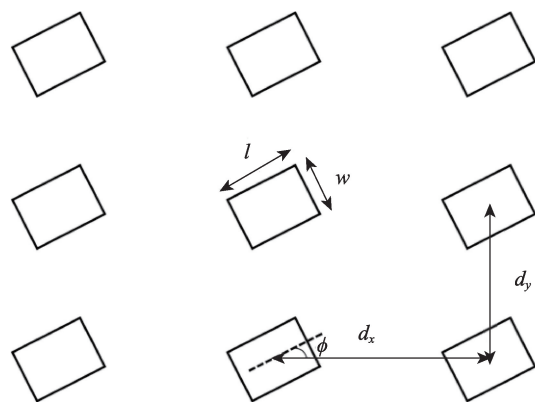


图6 3×3 的矩形阵列表示样品的周期排列

本题虽为虚拟实验,但对光路调节、实验参数选取、实验现象判断、实验数据获取(衍射光斑的记录与测量)和数据处理方案设计等多个实验技能方面都进行了非常全面的考察。学生并不只是基于软件输出结果进行简单记录和依据理论公式进行直接计算。希望学习者重点体会本虚拟实验与真实实验在对实验能力考察方面上的一致性。

