

基础物理实验

光的衍射



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



欢迎大家修读本课程，请注意以下事项：

1. 课程有班级群，请注意加群，以便跟老师联系；
2. 本课程为必修课，若没通过，没有补考，只有重修；
3. 课程评分由平时成绩和期末成绩组成，请出席每一次实验课并提交报告，如特殊原因无法出席，请务必请假并联系老师申请补做；
4. 实验前认真预习并完成预习报告，没有预习报告，不允许做实验；
5. 诚实守信，不允许篡改、伪造或抄袭别人的数据，不允许带着别人的实验报告来实验室做实验，一经发现，该实验为 0 分。

光的衍射

当波传播时遇到障碍物受到限制时，发生偏离直线传播（并非指反射和折射）的现象，称为衍射现象。平时衍射现象不易为人们所觉察，是因为可见光的波长很短，以及普通光源是非相干的面光源（白光）。衍射现象分为两类：一类是菲涅耳衍射（又称近场衍射），光源和观察屏与衍射缝（孔）的距离为有限远；另一类是夫琅禾费衍射（又称远场衍射），光源和观察屏与衍射缝（孔）的距离为无限远。

衍射现象在生活中用肉眼也能观察到。比如，由于光盘的表面均匀地刻有一系列的光轨，所以可以看到光盘表面呈现出的彩色图样；透过两指并拢后成的一条细缝观察日光灯，可以看到细缝间的明暗条纹。在合适的条件下，在障碍物产生的阴暗边界附近可观察到明暗相间的条纹。

单缝衍射现象观察与测量最简单的方法是使用单色光源（比如激光）照射单缝后在屏上观察衍射图。但由于用肉眼观察测量误差大。所以现在利用图像识别技术识别衍射图，即改用 CMOS 图像（光）传感器代替光屏观察与测量，如图 1 所示。

图像识别技术是一门新型技术，它也是人工智能的一个重要领域。二维码，人脸，机器人的视觉等图形识别都离不开图像识别技术。现代最新图像识别技术是神经网络图像识别技术。是一种人类模仿动物神经网络后的图像识别技术。由于篇幅有限，有兴趣的同学可以查阅有关这方面的资料。图 2 是光的衍射图经过光传感器后在计算机上显示的衍射图，并通过软件分析后，显示光的衍射光强分布图。图中由于主极大光强过强而未显示光强变化。如要观察分析主极大光强变化，可以减小光强强度。

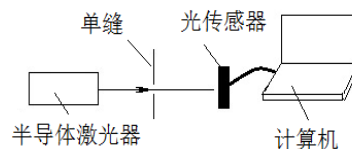


图 1 光的衍射实验

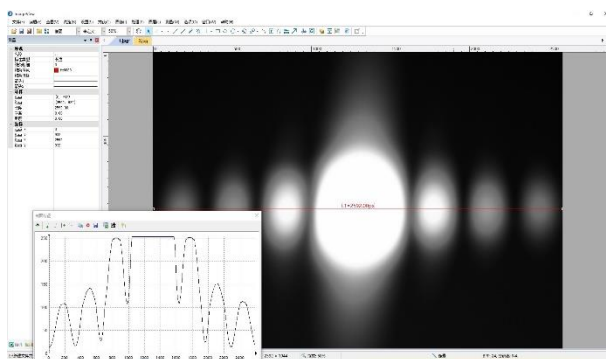


图 2 单缝衍射与光强分布

实验目的

1. 观察光的衍射现象，了解光的衍射的原理；
2. 学会光路调节方法；
3. 观察不同大小的单缝衍射的光强分布；
4. 通过光的衍射测量激光波长；
5. 学会用计算机软件观察与测量。

实验原理

当水面上的波通过小孔（或障碍物）时，如果小孔的直径比水波的波长小或相差不大时，穿过小孔的波的形状与原来的波的形状无关，小孔可以看作产生新波的波源，如图 3。

光是电磁波，所以具有波的特性。惠更斯提出，当光波在传播过程中，波阵面上的各点都起着发射次波的波源的作用，这些子波的包迹就形成了新的波阵面，如图 4。这就是惠更斯原理。

但是惠更斯原理不能给出衍射波的强度分布。法国物理学家菲涅耳在接受惠更斯原理中的子波概念上提出了同一波阵面上各点发出的子波在空间某点都是相干的理论，从而以波动理论解释光的衍射现象，建立了惠更斯-菲涅耳原理。它可以表述为：波所到达的任意点都可以看作是新的振动中心，当他们发出的球面次波时，空间任意点 P 的振动是包围波源的

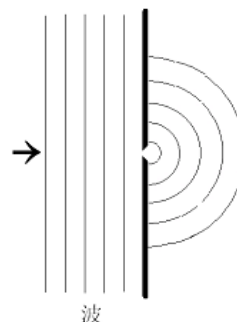


图 3 水面上的波通过一个小孔

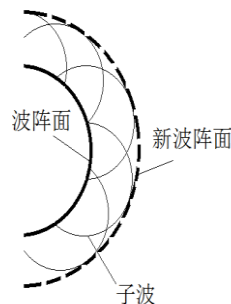


图 4 波传播示意图

任意闭合曲面上所有这些次波在该点的相干叠加。

如图 5 所示, P 点合振动就等于波面 S 上各点面元 dS 发出的子波在 P 点上振动的叠加。 P 点光振动可表示为

$$E_P = \int_S CK(\theta) \frac{\cos(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda})}{r} dS \quad (1)$$

式中, C 是比例系数; $K(\theta)$ 是倾斜因子 (倾角 θ 的函数)。这就是惠更斯-菲涅耳的数学表达式。

利用公式 (1) 可以定量地描述光的衍射现象, 但要用到积分运算, 较复杂。所以通常分析光的衍射用到方法是半波带法与振幅矢量法。

1. 单缝衍射

a) 半波带法描述光的衍射现象:

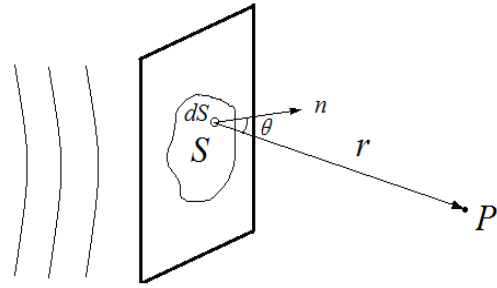


图 5 波面 S 上各点面元 dS 发出的子波

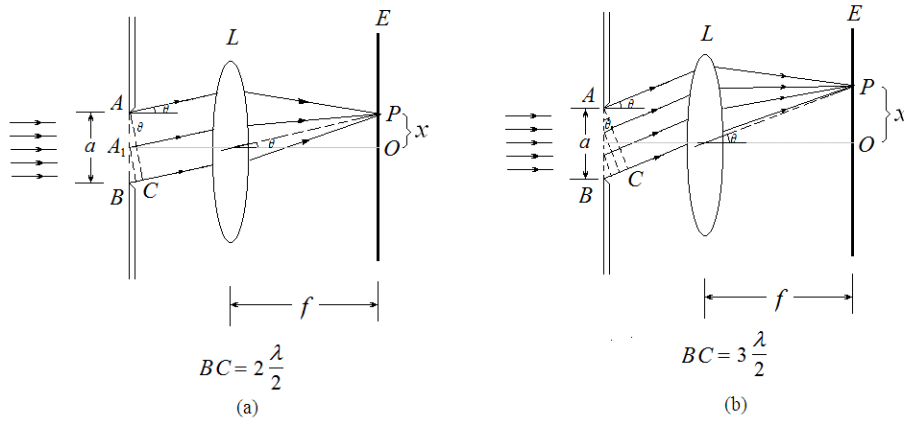


图 6 用半波带法分析单缝衍射

如图 6, 波长为 λ 的单色光垂直入射到宽度为 a 的单缝 AB 上, 衍射后沿各个方向传播, 衍射角为 θ 。当 $\theta=0$ 时, 衍射光沿原入射方向传播, 经过透镜 L 会聚后到达屏幕 O 点上。由于透镜 L 只起会聚的作用, 不产生附加的光程差。于是在 O 点上呈现出中央明纹。

当 θ 为某一值时, BC 恰好等于偶数 n 个半波长, 这时单缝 AB 可分成偶数个半波带。例如 $n=2$, 如图 6 (a), AA_1 与 A_1B 带上对应点发出的子波的光程差为半波长, 相位差为 π 。经过透镜 L 会聚到达 P 点后相互抵消, 在 P 点处出现暗纹...

当 θ 为某一值时, BC 恰好等于奇数 n 个半波长时, 单缝 AB 处可分成奇数个半波带。例如 $n=3$, 如图 6 (b), 相邻两个半波带相互抵消后留下一个半波带作用。在 P 点处出现明纹。由于光程差 $BC = a \sin \theta$ 。所以屏上单缝衍射出现明暗条纹的条件是

$$\text{中央明纹 } BC = a \sin \theta = 0 \quad (2)$$

$$\text{暗纹 } BC = a \sin \theta = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad k=1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

$$\text{明纹 } BC = a \sin \theta = \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2} \quad k=1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

对于中央明条纹, 其角宽度是两个第一级暗纹所夹的角宽度。设第 1 级暗纹对应的衍射角为 θ (中央明条纹半角宽)。由于衍射角 θ 很小, 所以有:

$$\theta \approx \sin \theta = \frac{\lambda}{a} \quad (5)$$

中央明条纹角宽度

$$\Delta\theta = 2\theta = \frac{2\lambda}{a} \quad (6)$$

中央明条纹宽度

$$\Delta x = f \frac{2\lambda}{a} \quad (7)$$

如果在屏上测得中央明条纹宽度 Δx , 单缝缝宽 a , 则有

$$\lambda = \frac{\Delta x a}{2f} \quad (8)$$

b) 单缝衍射的光强分布:

单缝衍射强度分布公式为

$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2} \quad (9)$$

式中 $u = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$, θ 为衍射角, I_0 为中央明条纹中心处的强度。单缝衍射的强度 I 分布曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 大部分光强集中在中央极大区域内。当缝的宽度 a 与光的波长 λ 相比很大时, 第一衍射极小的衍射角 θ ($\approx \lambda/a$) 很小, 中央衍射极大 (中央明条纹) 的宽度很小。看到的是一条很细很细的明亮线。

当 $\sin \theta = 0$, $\theta = 0$, 衍射的主极大强度 $I = I_0$ 。

当 $\sin \theta = k\lambda/a$, ($k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 衍射极小 (暗纹), 即 $I = 0$ 。

当 $\sin \theta = (2k+1)\lambda/(2a)$, ($k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 出现一系列衍射次极大 (明条纹)。

对于衍射极小 (暗纹)。设 x 为级次 k 在衍射屏上衍射中心到衍射极小位置的位移。如果 x 的绝对值与单缝到衍射屏距离 S 相比很小很小, $\sin \theta \approx x/S$ 。则 $k\lambda/a = x/S$ 。即

$$\lambda = \frac{xa}{kS}$$

作 x 与 k 关系图, 则

$$\lambda = K \frac{a}{S} \quad (11)$$

式中 K 为直线斜率。

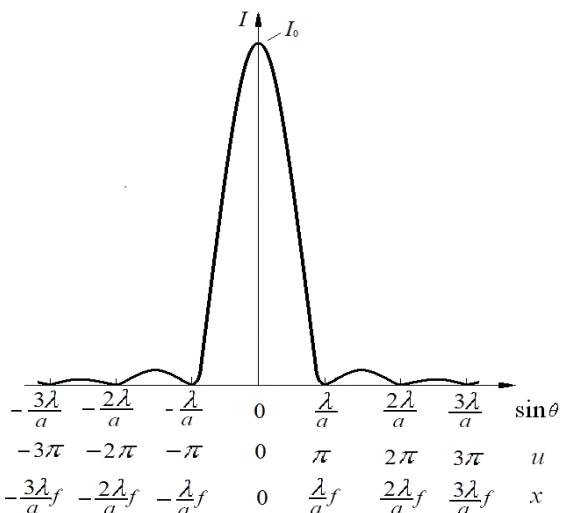


图 7 夫琅禾费单缝衍射强度分布曲线

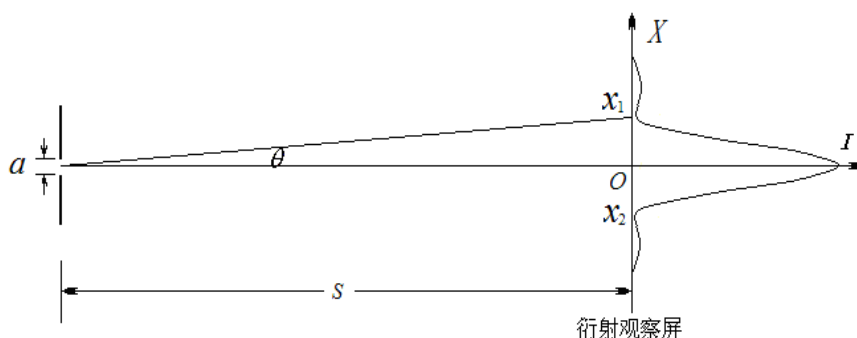


图 8 单缝衍射示意图

如果 k 级暗纹之间的距离 $2x = |x_1 - x_2|$, x_1 与 x_2 为 k 级暗纹的位置, S 为单缝到屏距离。当 $S \gg x$, 也可以通过以下公式估算出激光波长

$$\lambda = \frac{xa}{kS} \quad (12)$$

由于光传感器（或单缝）实际位置与光传感器（或单缝）底座位置刻度不一致引起误差。所以改变光传感器与单缝间距再测量一次。则

$$\lambda = \frac{\Delta x a}{\Delta S k} = \frac{(x_1 - x_2)a}{2(S_1 - S_2)} \quad (13)$$

Δx 是前一次测量 k 级暗纹间距 x_1 与后一次测量同级次暗纹间距 x_2 差的一半， ΔS 为测量前后二次单缝到屏距离 S_1 与 S_2 差。

实验前应回答的问题（本实验报告不需要写实验原理，只需回答下列问题）

1. 水波通过小孔（直径比波长小或相差不大）后会出现什么情况？（请画示意图）
2. 单缝衍射出现明暗条纹的条件是什么？
3. 单缝衍射的强度 I 与 $\sin\theta$ 关系？简单画出光强分布曲线示意图。
4. 光源的波长测量的计算公式？

实验仪器

实验仪器如图 9 所示，实验仪器型号见实验仪器标牌。

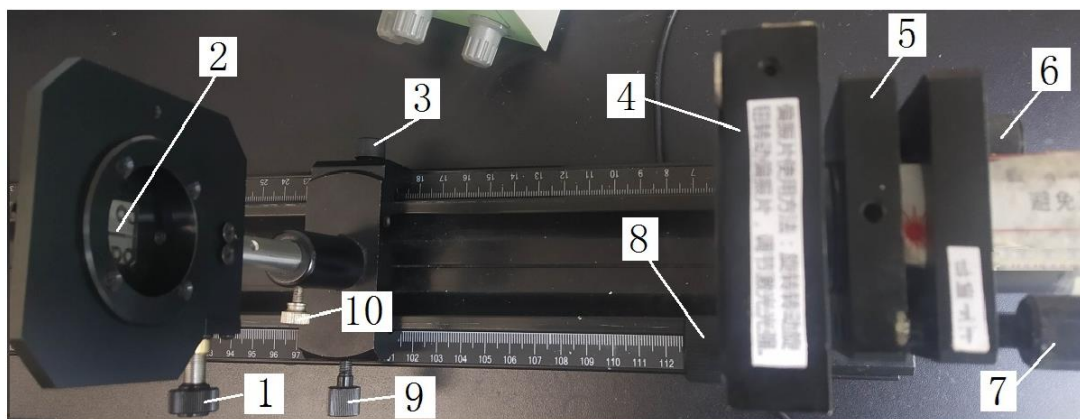


图 9 夫琅禾费衍射实验装置示意图

1. 光（图像）传感器与调节架
2. 实验内容告示牌
3. 照明灯，供读数与数据记录用
4. 计算机
5. 半导体激光器电源
6. 单缝与调节架
7. 偏振片与调节架：为了调节激光的光强，在激光器前放上偏振片调节架。通过转动偏振片的方法调节照射在单缝上激光光强强弱。
8. 半导体激光器
9. 光具座（导轨）
10. 光路调节时高度位置指示用的刻度白屏（图中没显示）

激光安全!

激光是一种方向性和单色性都很好的强光，使用时要格外小心。本实验所用的激光功率虽然不大，但也绝不能让激光直接射入眼睛，它会对视网膜产生永久的伤害。同时任何光滑的表面均可造成光线的反射，所以也要避免反射的激光射入眼睛。做实验时，要留意其他同学，勿让他们受到激光的照射。不用激光时，最好用不透明的东西挡掉或关掉激光器电源。



1—单缝垂直度调节旋钮 2—单缝 3—单缝调节架底座固定旋钮 4—偏振片调节架 5—半导体激光器调节架 6—半导体激光器左右(回转)调节旋钮 7—半导体激光器上下(俯仰)调节旋钮 8—偏振片旋转调节旋钮 9—单缝左右移动调节旋钮 10—单缝调节架固定旋钮

图 10 单缝与偏振片及半导体激光器附视图

实验内容

光路调节:

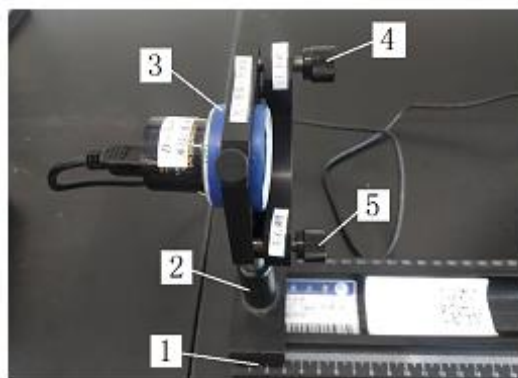
a) 拧松单缝调节架固定旋钮，取下单缝调节架。激光器通过偏振片直接照射在光传感器中心（如果光太弱，可旋转偏振片调节架上的调节旋钮）。然后在单缝调节架的底座上放上刻度白屏。前后移动白屏，要求激光照射在白屏上高度不变。如果白屏移动过程中，激光照射在白屏上的光点上下移动，则要调节半导体激光器调节架上的上下（俯仰）调节旋钮。

b) 取下刻度白屏，如果发现激光照射在光传感器中心位置上有偏离，则通过以下方法调节：

- 1) 上下偏离：可拧松光传感器调节架固定旋钮，上下移动调节架。调节完毕，拧紧固定调节。
- 2) 左右偏离：可调节激光器左右（回转）调节旋钮，直到激光照射到光传感器中心位置。

激光波长的测量:

a) 打开计算机，双击屏上 ImageView 图标，显示软件测量界面。点击“相机列表”下电子目镜（数字或文字表示）。这时，应在软件界面窗口中看到激光光斑。色彩模式选“灰度”。如果太亮可通过调节偏振片的方法调节光强。在单缝调节架底座上放上单缝调节架。单缝与光传感器相距 0.9 米左右。激光照射在单缝上。如果有偏离，可调节单缝左右移动调节旋钮，使激光的光斑中心照射在单缝中心位置上，如图 12 所示。



1-光传感器调节架位置刻度线 2-底座 3-光传感器 4-上下(俯仰)调节旋钮 5-左右(回转)调节旋钮

图 11 光(图像)传感器调节架与底座

b)在计算机上显示如图 2 的衍射画面。显示的衍射画面左右级次至少有 3 个。如果级次不足,可适当减小 S 。如果显示的衍射点不“水平”,有倾斜,可调节单缝垂直度调节旋钮。如果左右有偏移,可略微调节半导体激光器左右(回转)调节旋钮。注意:调节完毕再查看一下激光照射在单缝上位置是否有偏离。

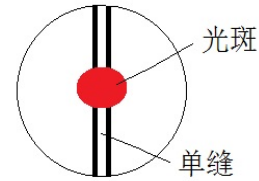


图 12 激光照射在单缝上

c)在软件菜单栏“测量”的“线段”中选取“水平线段”。在衍射图上画出最长水平线段(约 2592 点)。也可以在测量框坐标中修改 X (直线)起点与终点值。在软件菜单栏“处理”中点击剖面线作剖面特征图。如果剖面图不满意,可改变激光光强再观察剖面图变化。注意:光强太弱时剖面图上光强变化(曲线变化)会不明显。水平线段也可以上下移动(鼠标点在线段上移动),水平线段不一定过衍射点中心位置。可上下移动水平线段以显示剖面线的剖面特征图最佳为准。水平线段也可以删除后重新画(按“Delete”键)。

d)选择最好的剖面图,在软件菜单栏“捕获”中点击“捕获图像”,保存衍射图,注意不是保存剖面图(不要点击剖面图上保存键)。此时计算机屏幕上显示的是“静止”的衍射图(照片),而不是实时“动图”(视频)。鼠标移到水平线段上点击,这时界面窗口中出现衍射图水平线段剖面图。在软件菜单栏“处理”中选择“去噪”,选中“双边滤波”后点击进行双边滤波去噪处理(可多次进行去噪处理)。注意:在衍射图上应选取合适位置的直线作剖面图;去噪处理中值域与空域取最大。点击剖面特征图菜单栏中“输出到 Excel”键后计算机会自动生成 Excel 文件。

e)在生成 Excel 文件中选取第一列(灰度)数值作散点图。为了能在图上读取数据。散点图可以拉开放大。如果数据标记太大也可更改,方法是点击数据标记,再按右键选择数据系列格式,选取“内置”更改类型(圆点)与大小(最小数)。在图上读取各级 k 暗纹的光强最小值的位置,并记录在表中。根据实验室给出的定标值把相应数值(像素点)转换成以毫米为单位的实际值。

f)测量单缝与光传感器(接收面)之间的距离,

数据处理:

a)用公式 12 估算出激光波长, k 取 3。

b)用得到几组级次 k 对应 x 在实验室用 excel 软件作图。(为什么可用衍射点位置测量代替衍射点位移的测量?)

c)在实验室用得到几组级次 k 对应 x 导入到 origin 软件中作图。通过直线拟合后得到斜率 K ,并在实验报告上写出拟合直线方程式与相关系数。再用斜率 K 通过式 11 计算得到激光波长,并与实验室给出的激光波长比较。用 origin 软件得到的斜率 K 的标准偏差 $u(K)$,通过传递公式计算激光波长不确定度。(表达式如何写?)

改变单缝与光传感器(接收面)之间的距离,再测一次。建议 $S=0.7$ 米, $k=3$ 。利用式13计算出激光波长。(选做实验)

参考文献

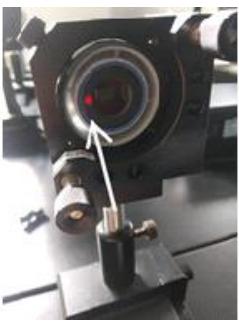
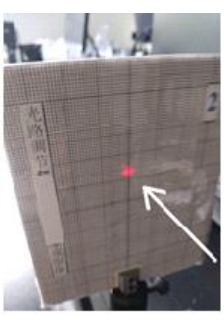
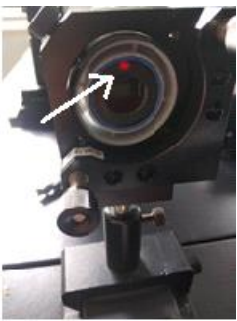

- [1] 贾玉润,王公治,凌佩玲. 大学物理实验. 上海: 复旦大学出版社. 1987.
- [2] 张铁强, 大学物理学(第二版下册). 北京: 高等教育出版社. 2012,
- [3] 赵凯华, 钟锡华. 光学(下册). 北京: 北京大学出版社. 1984.
- [4] 陈曙光等. 大学物理(上册) [[M]. 湖南长沙: 湖南大学出版社, 2010.

光的衍射告示牌

注意事项:

- 1.本告示牌供实验者阅读参考，所以不要在上面写字，更不能带出实验室。
- 2.拿取单缝（板）时，手不要触摸单缝。
- 3.当心激光。

光路调节前请仔细阅读讲义，了解各调节架上调节螺丝的作用。实验中对照下表根据不同情况调节相对应的螺丝。否则无法调好光路，且损坏光学元件的调节架。

			
光传感器上光点左（右）偏移。	移动刻度白屏时光点上下移动。	在光传感器上光点上（下）偏移	屏上显示衍射图不水平
调节方法：应调节激光调节架左右（回转）调节螺丝	应调节激光调节架上（下）（俯仰）调节螺丝	应松开传感器的底座固定螺丝，上下移动传感器调节架。	应调节单缝调节架垂直度调节螺丝。

注意：实验时，软件中色彩模式选“灰度”。

激光波长的测量数据记录(严禁用U盘)

实验记录要求（在实验室完成内容）给老师签名前应完成实验现象记录，表1，表2，直线拟合方程式，相关系数，由作图得到斜率不确定度，波长大小。（只要结果，不要计算过程）

表1 光的衍射数据记录

k	P	x/mm	k	P	x/mm
1			-1		
2			-2		
3			-3		

表 2 距离 S 与缝宽 a 的记录

S_1/mm	S_2/mm	S/mm	a/mm

转换系数 $D=5.60/2592$ 毫米/像素。 P 为像素， $x=D*P$ 。

注： $S=|S_1-S_2|$ ， S_1 是（衍射测量）单缝调节架的位置读数， S_2 是光（图像）传感器调节架的位置读数，都是 1/5mm 估读。

数据处理要求（离开实验室后完成内容）

波长与不确定度计算应写出计算过程

1) 用以下公式估算出激光波长：

$$\lambda = \frac{xa}{kS}$$

如果 k 级暗纹之间的距离 $2x = |x_1 - x_2|$ ， x_1 与 x_2 为 k 级暗纹的位置， S 为单缝到屏距离。

2) 用斜率 K 通过以下公式计算得到激光波长：

$$\lambda = K \frac{a}{S}$$

波长的不确定度的计算：

$$\left[\frac{u(\lambda)}{\lambda} \right]^2 = \left[\frac{u(K)}{K} \right]^2 + \left[\frac{u(a)}{a} \right]^2 + \left[\frac{u(S)}{S} \right]^2$$

上式中 S 单次测量，分度值 1mm，估读 1/5 小格（mm），不确定度限值 0.1mm
 $u(a)=0.001\text{mm}$ 。 $\lambda \pm u(\lambda) = \underline{\hspace{2cm}} \text{nm}$ 。

$$\left| \frac{\lambda - \lambda_{\text{测}}}{\lambda} \right| \times 100\% \quad \text{式中 } \lambda \text{ 为实验室给出的激光波长的参考值 } 650\text{nm}$$

直线拟合方程式改用 k ， S 表示，**不要求打印作图。严禁用 U 盘拷贝图像与作图。如果要保存图像，可以拍照。否则扣除 50% 的 1 个实验分数。**

Excel 数据处理简介：记录完数据后，不要用计算器计算，可直接输入到 Excel 上运算。运算得到 k 与 x 的 2 列数据。按“Ctrl”键，选中 2 列数据，在菜单栏中选“插入”→“图表”→“散点图”。在图上点击实验数据点，然后按左键，出现方框图，选“添加趋势线”，在“选项”列中选“显示公式”（直线拟合方程）与“R 平方”（相关系数）。相关系数以 Origin 数据处理后的结果为准。

Origin9 数据处理简介：在 Excel 中分别选取 k 与 x 的 2 列数据依次复制粘贴到 origin 中。选中 2 列数据，并点击左下角“/”符号。则 origin 软件自动生成直线拟合图。在菜单栏中依次选“Analysis”→“fitting”

→ “Linear Fit” → “1<Last used>” 后点击。Origin最后以2种形式显示数据处理后的结果，出现在表格中Slope一行中的第一列（Value）是斜率 K 值（Value），第二列（Standard Error）是标准偏差，也就是斜率 K 的不确定度 $u(K)$ 。还有相关系数(R-square)。如果相关系数为1时，可更改显示的相关系数位数

