

普通物理学实验 II

电子实验报告

实验名称：光的衍射

指导教师：居乐乐

班级：图灵 2303

姓名：张晋恺

学号：3230102400

实验日期：2024年 12 月 11 日 星期 三 上午

浙江大学物理实验教学中心

一、实验综述

1.1 实验背景

光的衍射是指当光波遇到障碍物或通过狭缝时，会发生偏离直线传播的现象。这种现象在光波的波长与障碍物或狭缝的尺寸相当时尤为显著。光的衍射现象是波动性的重要证据之一。

在本实验中，我们将研究一维光栅衍射和单缝衍射现象。

1.1.1 光的衍射的应用

光的衍射现象在科学研究和技术应用中有着广泛的应用。以下是一些主要的应用领域：

- **光学仪器：**光栅光谱仪利用光的衍射原理来分解光线的不同波长，从而分析光的组成成分。这在化学分析、天文学和材料科学中有重要应用。
- **显微镜技术：**衍射极限是显微镜分辨率的一个重要限制因素。通过使用超分辨率显微镜技术，如 STED 显微镜，可以突破这一限制，实现更高的分辨率。
- **通信技术：**光通信中，光的衍射效应会影响信号的传输质量。通过优化光纤设计，可以减小衍射效应，提高通信效率。
- **激光加工：**激光切割和雕刻技术利用光的衍射特性来实现高精度的加工。这在制造业中有广泛应用。
- **天文学：**天文学家利用衍射光栅来分析恒星和星系的光谱，从而研究它们的化学成分、温度和运动状态。

1.2 实验原理

1.2.1 惠更斯-菲涅尔定理

惠更斯-菲涅尔定理是解释光的衍射现象的一个重要理论基础。该定理由惠更斯原理和菲涅尔原理结合而成。

惠更斯原理：每一个波前上的点都可以看作是产生次级波的波源，这些次级波以相同的速度向各个方向传播。新的波前是这些次级波的包络面。

菲涅尔原理：在考虑光的衍射时，必须将所有次级波的相干叠加效应考虑在内。即，新的波前不仅仅是次级波的几何包络面，还要考虑各次级波的相位和振幅的叠加。

通过惠更斯-菲涅尔定理，可以解释光在通过狭缝、边缘或光栅时的衍射现象。该定理在光学中具有重要的应用价值，帮助我们理解和预测光的传播行为。

$$E(P) = \int_S dE_{(P)} = \int_S F \frac{K(\theta)}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right) dS \quad (1)$$

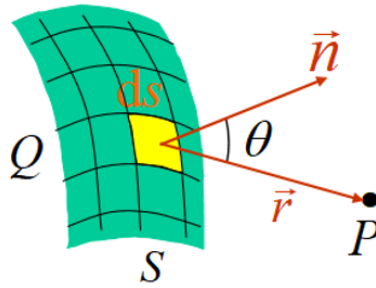


图 1: 惠更斯-菲涅尔定理

1.2.2 光的衍射分类

光的衍射现象可以根据不同的条件和特征进行分类，主要包括以下几种类型：

- **菲涅尔衍射：**当光波遇到障碍物或通过狭缝时，如果光源或观察屏幕距离障碍物或狭缝较近，衍射现象称为菲涅尔衍射。此时，光波的波前发生明显的弯曲，形成复杂的衍射图样。
- **夫琅禾费衍射：**当光波遇到障碍物或通过狭缝时，如果光源和观察屏幕距离障碍物或狭缝较远，衍射现象称为夫琅禾费衍射。此时，光波的波前可以近似看作平面波，形成规则的衍射图样。
- **单缝衍射：**光波通过单一狭缝时发生的衍射现象。单缝衍射图样通常表现为中央亮条纹最宽、最亮，两侧亮条纹逐渐变窄、变暗。
- **多缝衍射：**光波通过多个狭缝时发生的衍射现象。多缝衍射图样表现为多个亮条纹，条纹间距和亮度分布与狭缝数量和间距有关。

- **光栅衍射**：光波通过光栅（由大量平行狭缝组成）时发生的衍射现象。光栅衍射图样具有高度规则性和对称性，常用于光谱分析。

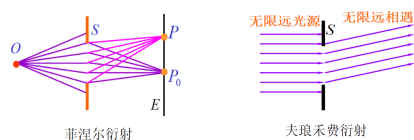


图 2: 光的衍射分类

1.2.3 矢量振幅法

矢量振幅法是一种用于分析光波干涉和衍射现象的数学方法。该方法通过将光波的振幅表示为矢量，并考虑其幅度和相位，实现对多重光波叠加效果的准确描述。

在矢量振幅法中，每个光波的振幅可以表示为一个具有特定方向和长度的矢量，这些矢量的叠加反映了光波的合成效果。例如，设有两个相干光波，其振幅分别为 $\mathbf{A}_1 = A_1 e^{i\phi_1}$ 和 $\mathbf{A}_2 = A_2 e^{i\phi_2}$ ，则总振幅 \mathbf{A} 为：

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 = A_1 e^{i\phi_1} + A_2 e^{i\phi_2} \quad (2)$$

通过计算总振幅的模平方，可以得到干涉光强：

$$I = |\mathbf{A}|^2 = |A_1 e^{i\phi_1} + A_2 e^{i\phi_2}|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (3)$$

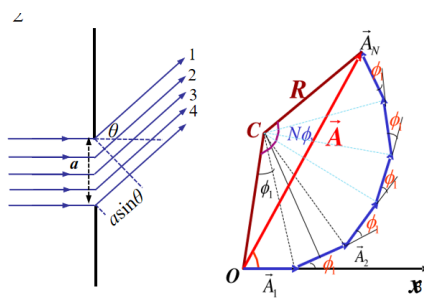


图 3: 矢量 幅法示意图

$$\text{由 } A_1 = 2R \sin \frac{\phi_1}{2}, \quad A = 2R \sin \frac{N\phi_1}{2}$$

$$\text{令 } \mu = \frac{N\phi_1}{2} = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$$

$$A = N A_1 \frac{\sin \mu}{\mu}$$

$$\text{则单缝衍射光强分布: } I_\theta = I_0 \left(\frac{\sin \mu}{\mu} \right)^2$$

1.2.4 积分法

积分法是一种用于计算光波在空间中传播和干涉的数学方法。通过积分法，可以求解复杂光场的光强分布。该方法通常用于分析光波在通过透镜、狭缝或其他光学元件后的衍射和干涉现象。

在积分法中，光场的电场分布可以表示为：

$$E(y, x) = E_0 e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (4)$$

其中， E_0 是初始电场强度， \vec{k} 是波矢， \vec{r} 是位置矢量。

通过泰勒展开，可以得到：

$$E(y, x) \approx E_0 \left(1 + i\vec{k} \cdot \vec{r} - \frac{(\vec{k} \cdot \vec{r})^2}{2!} + \frac{i(\vec{k} \cdot \vec{r})^3}{3!} - \dots \right) \quad (5)$$

对于小角度近似，可以忽略高阶项，得到：

$$E(y, x) \approx E_0 (1 + i\vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (6)$$

通过积分法，可以求得光场在不同位置的电场分布：

$$E(y, x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_0 e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} d\vec{r} \quad (7)$$

1.2.5 单缝衍射光强分布特征

单缝衍射的光强分布特征可以通过研究光强 $I_\theta = I_0 \left(\frac{\sin \mu}{\mu} \right)^2$ 的变化来理解。以下是光强分布的主要特征：

- 主极大值：在 $\sin \theta = 0$ 处，光强达到最大值 I_0 ，因为此时 $\mu = 0$ ，使得 $\frac{\sin \mu}{\mu} = 1$ 。
- 零点位置：光强为零的位置由 $\frac{\sin \mu}{\mu} = 0$ 确定。零点出现在 $\sin \theta = \pm \frac{\lambda}{a}, \pm \frac{2\lambda}{a}, \dots$ 处。
- 次极大值：在主极大值的两侧，存在多个次极大值。这些次极大值的位置例如在 $\sin \theta = \pm 1.43 \frac{\lambda}{a}$ 处。
- 对称性：光强分布关于 $\theta = 0$ 对称，表明衍射图样在中心轴两侧是对称的。

这些特征揭示了单缝衍射的基本性质，即光波通过狭缝后，由于波的干涉效应，形成了特定的光强分布。

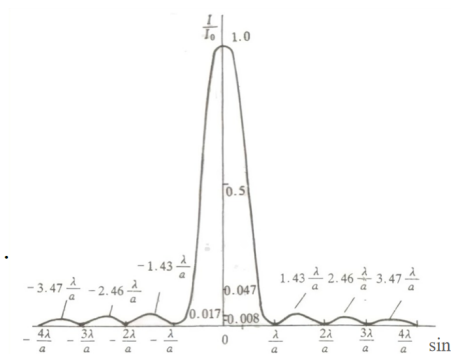


图 4: 单缝衍射光强分布特征

1.2.6 光栅衍射

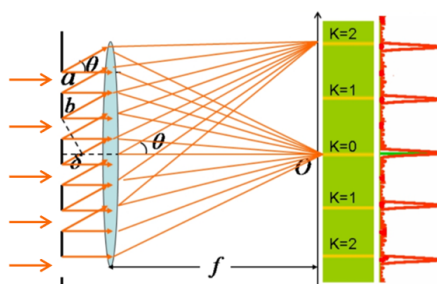


图 5: 光栅衍射

平行光照射透射光栅：同时存在每个缝的单缝衍射和缝与缝间光干涉

其中，光栅常数 $d = a + b$

明纹条件： $d \sin \theta = k\lambda$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

暗纹条件： $d \sin \theta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

二、 实验内容

2.1 一维光栅衍射

首先调节光路等高共轴，让激光通过光栅，在屏幕上形成衍射图样，分别测量衍射光强在 $\pm 1, 0$ 级衍射光强，并记录数据。

光栅位置 $L_1 = 24.16\text{cm}$, $L_2 = 83.36\text{cm}$, $\Delta L = L_2 - L_1 - 2.00\text{cm} = 57.20\text{cm}$

测量次数	-1 级亮点位置 x_{-1} (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A	0 级亮点位置 x_0 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A	+1 级亮点位置 x_{+1} (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A
1	34.757	4737.4	53.601	未显示	71.342	4970.6
2	34.725	4937.9	53.521	未显示	71.351	4877.3
3	34.744	4988.7	53.537	未显示	71.366	4937.5

表 1: 测量数据表

$$\Delta x_1 = (71.340 - 34.757)/2 = 18.2915mm$$

$$\Delta x_2 = (71.351 - 34.725)/2 = 18.313mm$$

$$\Delta x_3 = (71.366 - 34.744)/2 = 18.311mm$$

$$\Delta x_{avg} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3}{3} = \frac{18.2915 + 18.313 + 18.311}{3} = 18.305mm$$

$$\lambda = \frac{a\Delta x_{avg}}{L} = \frac{0.02 \times 18.305}{0.572} = 0.640\mu m$$

2.2 单缝衍射

让光通过 0.08mm 的单缝；测量衍射光强分布，并记录数据。

此时的 $D = 47.00cm$

-2 级亮点位置 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A	-1 级亮点位置 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A	0 级亮点位置 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A	+1 级亮点位置 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A	+2 级亮点位置 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A
43.291	12.0	47.537	32.8	52.901	667.1	57.702	32.5	63.804	15.5

表 2: 单缝衍射测量数据表

$$\overline{x_{\pm 1}} = \frac{57.702 - 47.537}{2} = 5.0825mm \quad a_1 = 1.43 \frac{D\lambda}{\Delta x_{\pm 1}} = 0.083mm$$

$$\overline{x_{\pm 2}} = \frac{63.804 - 43.291}{2} = 10.2565mm \quad a_2 = 2.46 \frac{D\lambda}{\Delta x_{\pm 2}} = 0.079mm$$

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2}{2} = 0.081mm$$

相对误差为

$$\delta = \left| \frac{a - a_{true}}{a_{true}} \right| \times 100\% = \left| \frac{0.081 - 0.08}{0.08} \right| \times 100\% = 1.25\%$$

由此可见，实验测量值与理论值非常接近，误差在可接受范围内。

根据测得的点，绘制单缝衍射光强分布图。

其中，一共测的点如下

序号	位置 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A	序号	位置 (mm)	光强 $\times 10^{-8}$ A
1	65.812	0.8	2	64.681	7.1
3	63.804	15.5	4	63.775	15.1
5	61.615	6.5	6	60.610	3.1
7	59.511	1.4	8	59.021	12.2
8	58.363	23.6	9	57.702	32.5
10	57.084	22.9	11	56.751	9.1
12	56.271	2.4	13	55.941	23.1
14	55.556	77.2	15	55.287	113.9
16	54.863	233.7	17	54.561	400.0
18	54.051	427.3	19	52.901	667.1
20	51.891	415.7	21	51.447	304.9
22	51.152	219.9	23	50.320	65.4
24	49.921	20.9	25	49.010	2.2
26	48.264	22.9	27	47.537	32.7
28	46.754	24.6	29	46.150	11.0
30	45.636	1.1	31	44.636	2.5
32	43.291	12.0	33	42.921	6.9
34	41.690	3.1	35	41.290	0.3

表 3: 单缝衍射光强分布测量数据表

使用 matlab 将得到的数据点拟合，得到单缝衍射相对光强分布图。

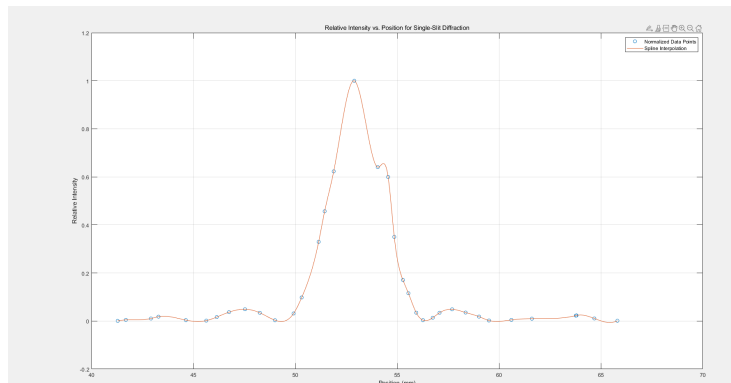


图 6: 单缝衍射相对光强分布图

可以看到，拟合曲线与理想曲线非常接近，说明实验结果与理论结果一致。

2.3 误差分析

在实验中，误差是不可避免的，可能来自多种来源。以下是对一维光栅衍射和单缝衍射实验中可能存在的误差的分析：

2.3.1 一维光栅衍射实验

• 测量误差：

- **位置测量误差：**在测量光斑位置时，可能由于刻度尺的分辨率限制或读数时的视差导致误差。
- **光强测量误差：**光强的测量可能受到仪器灵敏度的限制，尤其是在光强较弱时，读数可能不够精确。

• 设备误差：

- **光栅质量：**光栅的制造误差，如缝宽不均匀或缝间距不一致，可能导致衍射图样的偏差。
- **激光器稳定性：**激光器的输出功率不稳定或光束质量不佳可能影响实验结果。

• 环境因素：

- **空气扰动：**实验环境中的空气流动可能导致光路的微小偏移，影响测量精度。

- **温度变化：**温度的变化可能影响光栅和其他光学元件的尺寸，进而影响实验结果。

2.3.2 单缝衍射实验

- **测量误差：**

- **位置测量误差：**与光栅衍射类似，单缝衍射中光斑位置的测量也可能受到刻度尺分辨率和视差的影响。
- **光强测量误差：**光强测量的误差可能来自于探测器的灵敏度和线性度。

- **设备误差：**

- **单缝宽度误差：**单缝的实际宽度可能与标称值不符，导致计算的光强分布与理论值不一致。
- **光源质量：**光源的波长不稳定或光束不均匀可能影响衍射图样的对称性和强度分布。

- **环境因素：**

- **光路对准误差：**光路未完全对准可能导致衍射图样的偏移或失真。
- **振动影响：**实验台的振动可能导致光斑位置的微小变化，影响测量结果。

2.3.3 总结

为了减小误差，可以采取以下措施：提高测量仪器的精度，确保实验设备的质量和稳定性，控制实验环境的稳定性（如温度、空气流动），以及在实验过程中多次重复测量以获得平均值。通过这些方法，可以有效提高实验结果的准确性和可靠性。

总的来看，实验结果与理论结果非常接近，误差在可接受范围内。

三、 实验拓展

3.1 简述光的衍射的本质

光的衍射是波动现象的一个重要特征，其本质是波在遇到障碍物或通过狭缝时偏离直线传播的行为。具体来说，光的衍射可以理解为以下几个方面：

- **波动性：**光的衍射现象是光的波动性的重要证据。根据波动理论，光波在传播过程中会在遇到障碍物或狭缝时发生弯曲，这种弯曲导致光波进入几何阴影区，从而形成衍射图样。
- **惠更斯-菲涅尔原理：**该原理结合了惠更斯原理和菲涅尔原理，解释了光的衍射现象。惠更斯原理认为每个波前上的点都可以看作是次级波源，而菲涅尔原理则强调这些次级波的相干叠加效应。
- **相干叠加：**光的衍射图样是由于不同路径的光波相干叠加而形成的。光波的相位和振幅的叠加导致了光强的变化，从而形成明暗相间的衍射图样。
- **波长与障碍物尺寸的关系：**衍射现象在光波的波长与障碍物或狭缝的尺寸相当时尤为显著。这是因为在这种情况下，波的弯曲效应最为明显。

总之，光的衍射本质上是光波在传播过程中由于波动性和相干叠加效应而产生的偏离直线传播的现象。

3.2 简述可以通过哪些方式减少光的衍射效应带来的相差

为了减少光的衍射效应带来的相差，可以考虑以下几种方法：

- **使用较短波长的光源：**
 - **原理：**衍射效应的强度与光的波长成正比。波长越长，衍射效应越明显。
 - **方法：**选择紫外光或其他短波长光源代替可见光源，以减小衍射效应。
- **增大光束直径：**
 - **原理：**根据衍射理论，光束直径越大，光波的弯曲程度越小。
 - **方法：**使用扩束镜或其他光学元件来增大光束的直径，从而减少通过狭缝或障碍物时的衍射。
- **优化光路设计：**
 - **原理：**减少光在传播过程中遇到的障碍物和狭缝，可以有效降低衍射效应。

- **方法：**在设计光学系统时，尽量避免不必要的障碍物，并确保光路的直线传播。
- **使用相干性较差的光源：**
 - **原理：**相干性较差的光源会导致衍射图样的对比度降低，从而减小相差。
 - **方法：**选择宽带光源或使用去相干化技术来降低光源的相干性。
- **改进实验设备：**
 - **原理：**高质量的光学元件和精密的实验设备可以减少系统中的杂散光和其他干扰。
 - **方法：**使用高精度的光学元件，如高质量的透镜和光栅，确保设备的稳定性和精度。
- **控制实验环境：**
 - **原理：**环境因素如温度、空气流动等会影响光的传播。
 - **方法：**在稳定的环境中进行实验，避免空气流动和温度变化对光路的影响。