

实验 B10 单缝衍射相对光强分布

摘要： 光的衍射是光的波动性的基本特征之一，在结构测定及精确测量领域有着广泛的应用。本实验首先测定单缝衍射的相对光强分布。将型号为 QY-10，波长为 632.8nm 的 He-Ne 激光器与狭缝、光功率测试仪的光探头和光屏等呈直线放置在光学平台上，并使其保持在同一高度。调整光源至狭缝距离调整为 5cm，狭缝宽度为 0.264mm，狭缝与光探头在 X 方向上的距离为 86.05cm。此时主极大宽度约为 5mm，各级衍射条纹清晰。沿 Y 轴移动光探头，使光功率最大，记录此时位置 x 。单向移动光探头，每移动 0.1mm 或 0.2mm 记录一次光功率值，直至第三次极大。以光探头相对移动距离为横坐标，光功率相对值为纵坐标拟合曲线，并在同一张图中作出理论曲线相比较。可以看出，实验曲线的趋势与理论公式的趋势基本一致。由实验曲线测得的数据进行拟合，可以得到狭缝的宽度 0.24 mm，与实验中狭缝实际宽度的相对误差为 9%。

除此之外，本实验还测定单缝衍射的相对光强分布。光源采用 GY-6 型溴钨灯，摘下灯前毛玻璃，将光探头放置于光源前 5cm 处，每远离 1cm-2cm 测一次光功率。对光源至光探头距离平方的导数与其对应光功率作图并线性拟合，发现在距离钠灯一定距离时，光功率计的读数与入射光强成线性关系。因此可以说光探头工作在线性区域。

关键词： 夫琅禾费单缝衍射，光功率测试仪，曲线拟合

Experiment B10: Single Slit Diffraction

Relative Intensity Distribution¹

XXX^{1 2}

School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The diffraction of light is one of the basic characteristics of light, which is widely used in the field of structure determination and accurate measurement. Firstly, the relative intensity distribution of single slit diffraction was measured. The QY-10 He-Ne laser with wavelength of 632.8nm was placed on the optical platform in a straight line with the slit, the optical probe of the optical power tester and the optical screen, and kept at the same height. We adjusted the distance between the light source and the slit to 5cm, width of the slit to 0.264mm, and the distance between the slit and the light probe in the X direction to 86.05cm. At this time, the diffraction patterns at all levels are clear. We moved the optical probe along the Y-axis to maximize the optical power and recorded the position x . Then move the optical probe in one direction and record the optical power value every 0.1mm or 0.2mm until the third peak. The relative moving distance of the optical probe was taken as the abscissa and the relative value of the optical power was taken as the ordinate fitting curve. It can be seen that the trend of the experimental curve is basically consistent with that of the theoretical formula. By fitting the data measured from the experimental curve, the width of the slit is 0.24 mm, and the relative error is 9%. In addition, the relative intensity distribution of single slit diffraction is also measured. GY-6 bromotungsten lamp was used as the light source. The frosted glass in front of the lamp was removed, and the light probe was placed 5cm in front of the light source. The light power was measured every time it was 1cm-2cm away. The derivative of the square distance from the light source to the light probe and the corresponding light power were plotted and linearly fitted. It is found that there is a linear relationship between the reading of

the optical power meter and the incident light intensity at a certain distance from the sodium lamp. Thus the light probe can be said to operate in a linear region.

Key words: Fraunhofer single slit diffraction, optical power tester, curve fitting

【数据记录与处理】

1. 测定单缝衍射的相对光强分布

实验参数：狭缝与光探头在 X 方向上的距离为 $Z=86.05\text{cm}$ ，狭缝宽度为 0.264mm ，高度为 2.59cm ，光屏宽度 15cm 。

测量光强分布时，将实验测得的探头移动距离与光功率值记录，记录下光功率最大时光功率计和平移螺杆的读数，之后在 X 方向上平移光探头，每隔一段距离记录一次光强和光探头移动距离 Δx ，则狭缝与光探头的距离为 $X = \sqrt{(Z^2 + \Delta x^2)}$ ，衍射角正弦值为 $\sin\theta = \Delta x/X$ ，光功率相对值 I_θ/I_0 ，相关数据列表如表 1:

以 $\sin\theta$ 为横坐标，光功率相对值 I_θ/I_0 为纵坐标作图，并在同一张图中，自定义拟合曲线如图三:

$$\frac{I_\theta}{I_0} = \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi ax}{\lambda}\right)}{\frac{\pi ax}{\lambda}} \right)^2$$

对实验参数做仿真，结果见图一，图二:

代入实验参数可以计算出理论狭缝宽度为 0.24mm ，将各主极大与仿真值对比，见表 5:

2. 检测光功率计的读数与入射光强的线性关系

a 为参数，进行拟合，同时取 $a = 2.29 \times 10^{-4} \text{ m}$ 将理论公式下的曲线在同一张图中画出，最终得到拟合曲线与理论曲线如图四。

¹Supported and taught by Han Shen, School of Physics, Sun Yat-sen University

²Corresponding author. E-mail:morb@mail2.sysu.edu.cn

表 1: 光强分布相关数据

探头移动距离 $\Delta x/mm$	光功率 I_θ/nW	$\sin\theta$	光功率相对值 I_θ/I_0
0.0	276	0.00000000	1.00000000
0.1	275	0.00011621	0.99637681
0.2	274	0.00023242	0.99275362
0.3	273	0.00034863	0.98913043
0.4	272	0.00046485	0.98550725
0.5	270	0.00058106	0.97826087
0.6	268	0.00069727	0.97101449
0.7	265	0.00081348	0.96014493
0.8	260	0.00092969	0.94202899
0.9	257	0.00104590	0.93115942
1.0	250	0.00116212	0.90579710
1.1	242	0.00127833	0.87681159
1.2	236	0.00139454	0.85507246
1.3	231	0.00151075	0.83695652
1.4	222	0.00162696	0.80434783
1.5	217	0.00174317	0.78623188
1.6	210	0.00185938	0.76086957
1.7	201	0.00197560	0.72826087
1.8	194	0.00209181	0.70289855
1.9	187	0.00220802	0.67753623
2.0	181	0.00232423	0.65579710
2.2	166	0.00255665	0.60144928
2.4	151	0.00278908	0.54710145
2.6	135	0.00302150	0.48913043
2.8	121	0.00325392	0.43840580
3.0	106	0.00348635	0.38405797
3.2	93.1	0.00371877	0.33731884
3.4	80.1	0.00395119	0.29021739
3.6	67.0	0.00418361	0.24275362
3.8	55.3	0.00441604	0.20036232
4.0	43.8	0.00464846	0.15869565
4.2	36.0	0.00488088	0.13043478
4.4	27.7	0.00511331	0.10036232
4.6	20.5	0.00534573	0.07427536
4.8	14.6	0.00557815	0.05289855
5.0	10.0	0.00581058	0.03623188
5.2	6.3	0.00604300	0.02282609
5.4	3.5	0.00627542	0.01268116
5.6	1.6	0.00650784	0.00579710
5.8	0.7	0.00674027	0.00253623
6.0	0.4	0.00697269	0.00144928

探头移动距离 $\Delta x/mm$	光功率 I_θ/nW	$\sin\theta$	光功率相对值 I_θ/I_0
6.2	0.6	0.00720511	0.00217391
6.4	1.4	0.00743754	0.00507246
6.6	2.6	0.00766996	0.00942029
6.8	4.1	0.00790238	0.01485507
7.0	5.6	0.00813481	0.02028986
7.2	7.3	0.00836723	0.02644928
7.4	9.0	0.00859965	0.03260870
7.6	10.5	0.00883207	0.03804348
7.8	11.9	0.00906450	0.04311594
8.0	12.9	0.00929692	0.04673913
8.2	13.7	0.00952934	0.04963768
8.4	14.3	0.00976177	0.05181159
8.6	14.6	0.00999419	0.05289855
8.8	14.6	0.01022661	0.05289855
9.0	14.3	0.01045904	0.05181159
9.2	13.7	0.01069146	0.04963768
9.4	12.9	0.01092388	0.04673913
9.6	12.0	0.01115630	0.04347826
9.8	10.9	0.01138873	0.03949275
10.0	9.8	0.01162115	0.03550725
10.2	8.5	0.01185357	0.03079710
10.4	7.2	0.01208600	0.02608696
10.6	5.9	0.01231842	0.02137681
10.8	4.6	0.01255084	0.01666667
11.0	3.5	0.01278327	0.01268116
11.2	2.5	0.01301569	0.00905797
11.4	1.7	0.01324811	0.00615942
11.6	1.0	0.01348053	0.00362319
11.8	0.5	0.01371296	0.00181159
12.0	0.2	0.01394538	0.00072464
12.2	0.0	0.01417780	0.00000000
12.4	0.0	0.01441023	0.00000000
12.6	0.2	0.01464265	0.00072464
12.8	0.5	0.01487507	0.00181159
13.0	0.8	0.01510750	0.00289855

探头移动距离 $\Delta x/mm$	光功率 I_θ/nW	$\sin\theta$	光功率相对值 I_θ/I_0
13.2	1.2	0.01533992	0.00434783
13.4	1.8	0.01557234	0.00652174
13.6	2.3	0.01580476	0.00833333
13.8	2.8	0.01603719	0.01014493
14.0	3.4	0.01626961	0.01231884
14.2	3.8	0.01650203	0.01376812
14.4	4.3	0.01673446	0.01557971
14.6	4.6	0.01696688	0.01666667
14.8	4.9	0.01719930	0.01775362
15.0	5.0	0.01743173	0.01811594
15.2	5.2	0.01766415	0.01884058
15.4	5.1	0.01789657	0.01847826
15.6	4.9	0.01812899	0.01775362
15.8	4.7	0.01836142	0.01702899
16.0	4.4	0.01859384	0.01594203
16.2	4.0	0.01882626	0.01449275
16.4	3.6	0.01905869	0.01304348
16.6	3.1	0.01929111	0.01123188
16.8	2.7	0.01952353	0.00978261
17.0	2.2	0.01975596	0.00797101
17.2	1.8	0.01998838	0.00652174
17.4	1.3	0.02022080	0.00471014
17.6	0.9	0.02045322	0.00326087
17.8	0.6	0.02068565	0.00217391
18.0	0.4	0.02091807	0.00144928
18.2	0.2	0.02115049	0.00072464
18.4	0.1	0.02138292	0.00036232
18.6	0.0	0.02161534	0.00000000
18.8	0.0	0.02184776	0.00000000

表 5: 实验各极大与仿真值比较

极大的级数	理论 I_θ/I_0	实验 I_θ/I_0	相对误差
主极大	1	1	0
第一次极大	0.0469	0.0529	12.7%
第二次极大	0.0166	0.0188	13.2%

图 1: 曲线拟合

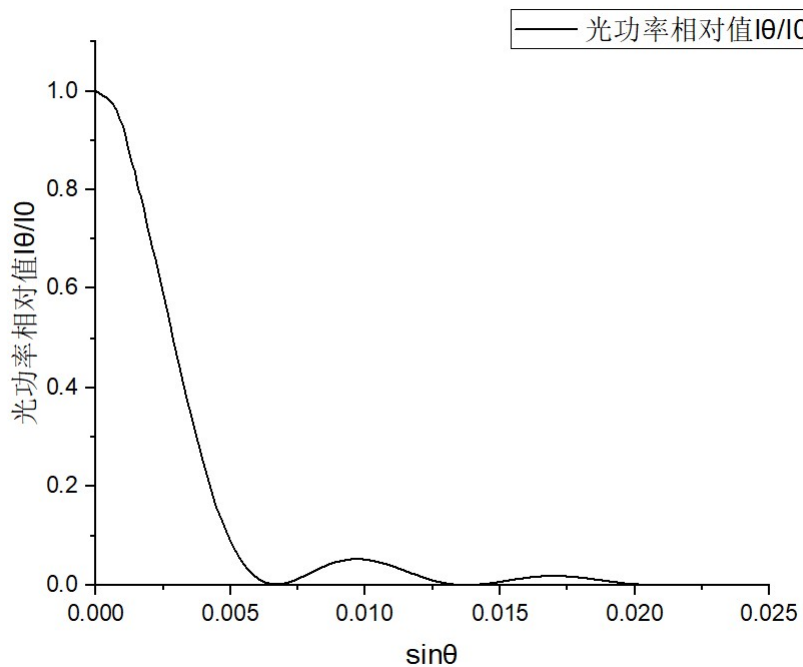


图 2: 仿真界面

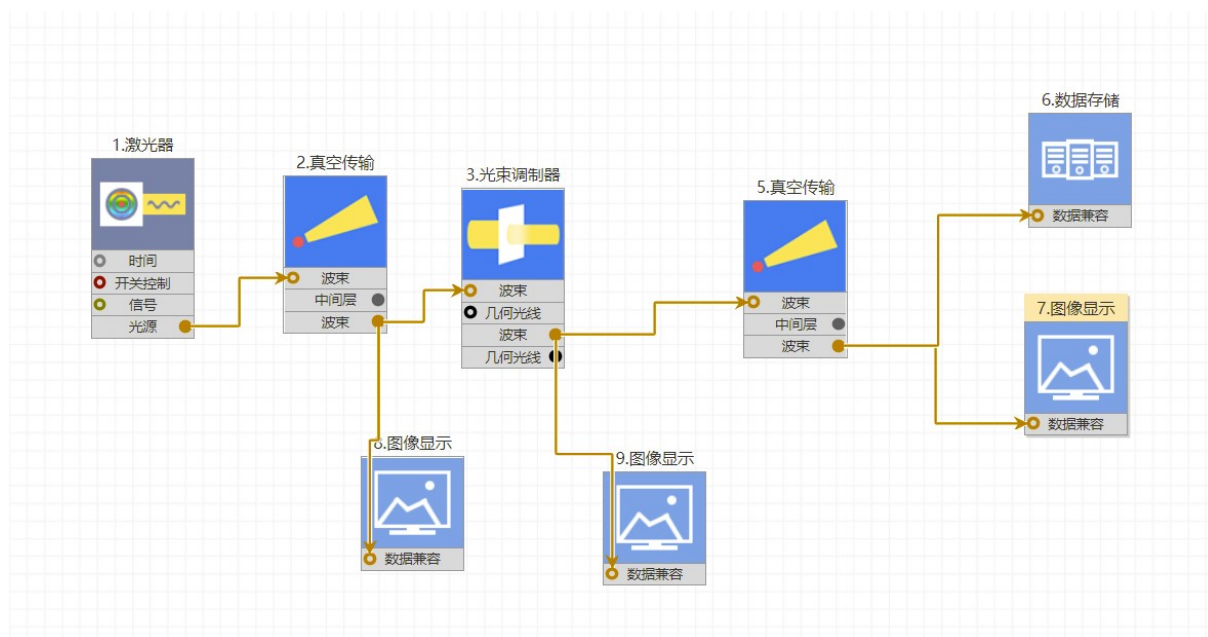
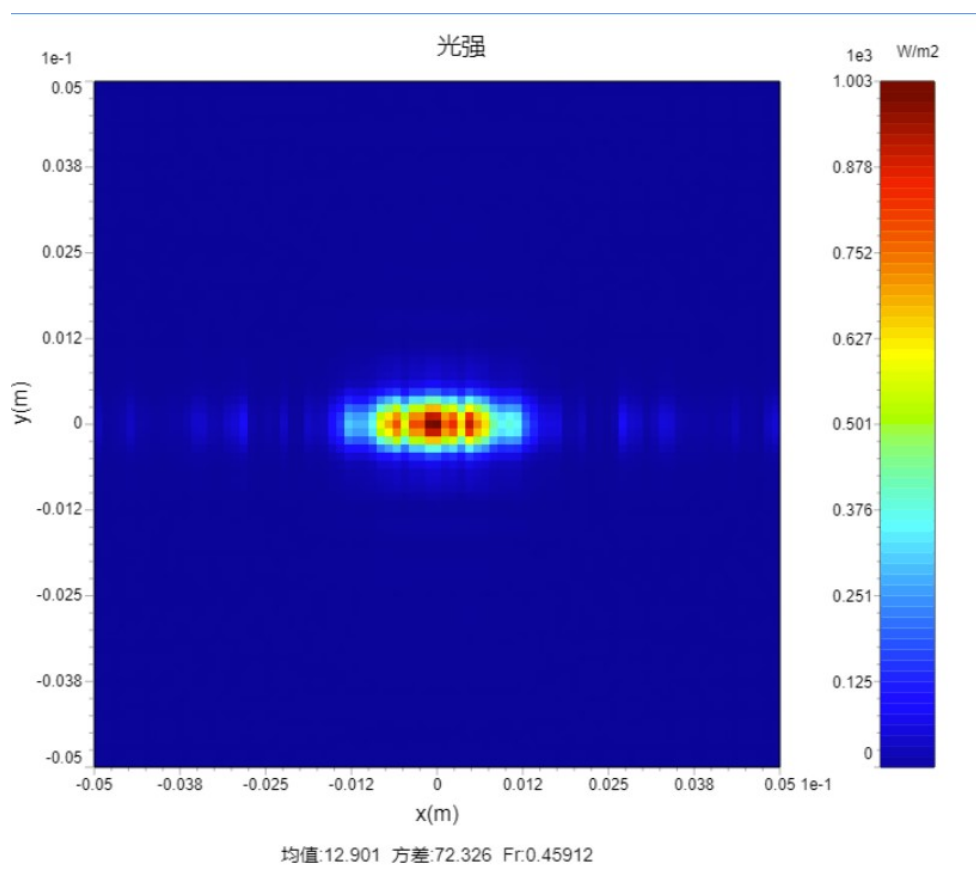


图 3: 仿真结果



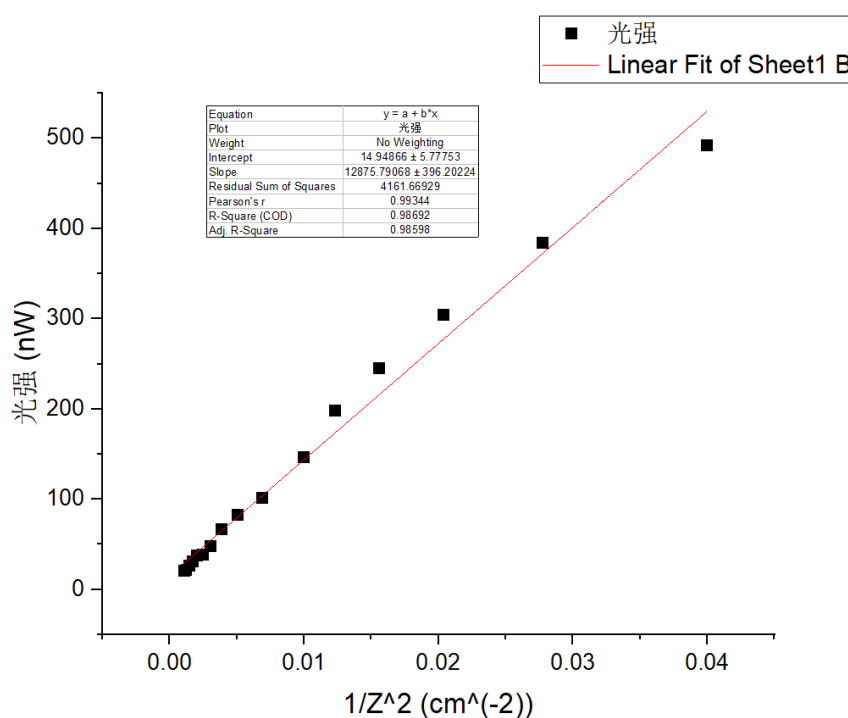
在实验 2 中，测得起始位置光源与光探头距离为 $Z_0 = 22.0\text{cm}$ ，而后以 2cm 的间隔测量至 40cm ，之后以 4cm 的间隔测量至 80cm ，最后以 5cm 的间隔测量至 100cm 。实验数据列表如下。

表 6: 光度计读数与距离相关数据

Z/cm	$1/Z^2/\text{cm}^{-2}$	P/nW	Z/cm	$1/Z^2/\text{cm}^{-2}$	P/nW
5	0.04	492	16	0.00390625	66.0
6	0.027777778	384	18	0.00308641	47.4
7	0.02040816	304	20	0.0025	38.1
8	0.015625	245	22	0.00206611	37.1
9	0.01234568	198.2	24	0.00173611	30.7
10	0.01	146.2	26	0.00147929	26.1
12	0.0069444	101.1	28	0.00127551	21.0
14	0.0051020	82.6	30	0.00111111	19.9

作光功率 P 关于距离平方倒数的图像并进行定截距拟合，截距为零。

图 4: 线性拟合



其中， $R^2 = 0.98692$ ，说明两者线性关系极强，可认为光探头工作在线性区。

【误差分析】

1. 测定单缝衍射的相对光强分布

- (1). 实验测得的数据点不够多，分步值仍不够小，不能保证光强出现极大时的数据被测量到，这会导致光强极大点被跳过，进而导致极大的误差
- (2). 受困于仪器的极限，主极大不可能测得完全准确，会对后续计算差生误差。
- (3). 实验中不能保证完全的无光环境，会使光探头产生一定的误差。
- (4). 在读数时，即使没有干扰实验仪器，光探头读数也在不断变化，在估读的过程中会差生误差。

2. 检测光功率计的读数与入射光强的线性关系

- (1). 移动光探头时，光探头的位置不能完全摆放正确，这将导致 Z 值有较大的误差。
- (2). 在每个位置读数前微调光探头位置的操作中可能导致人为误差。

【结论】

在一定的误差范围内，可以验证单缝夫琅禾费衍射的相对光强分布与理论基本一致，并可由此求得狭缝的宽度，与实测的结果误差不大。为进一步减小误差，可考虑进一步减小步长值进行测量。光功率计的读数与入射光强有极强的线性关系，可以认为光探头工作在线性区。

【思考题】

1. 当缝宽增加一倍，衍射花样的光强和条纹的宽度将会怎样改变？如缝宽减半，情况如何？

答：（1）当缝宽增加一倍时，由光强分布公式可知，当缝宽增加一倍时，光强增加。条纹宽度可以根据主极大两侧暗纹之间的角距离 $\Delta\theta = 2\lambda/a$ 来判断，角距离变为原来的一半，条纹的宽度变为原来的一半。

（2）当缝宽减半时，光强减小，角距离变为原来的两倍，条纹的宽度变为原来的两倍。

2. 使用光功率计应注意那些问题？光功率计进光狭缝的宽度对实验结果有何影响？

答：（1）使用光功率计应注意使用的光功率计的测试范围，选择适合实验需要的功率，注意选择和发射光源一样的波长，注意仪器在长时间闲置后，需使用仪器的自校准功能，注意测量时要注意保证探头与其他光学仪器共轴和减少环境光的影响。

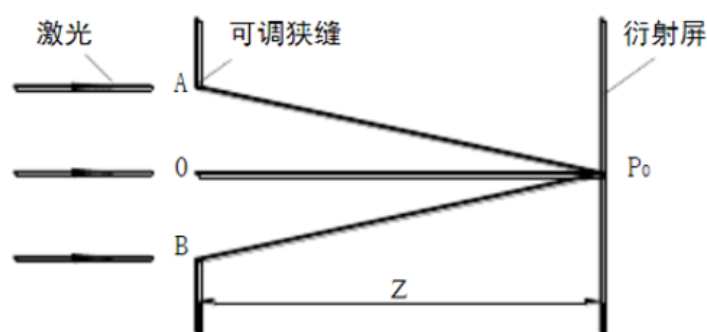
（2）光功率计测量的是光在单位时间内所做的功，进光狭缝的宽度过大会导致沿 X 方向测量范围过大，不够精确，影响实验结果，狭缝太窄会导致光探头很难保持与光纤在同一直线，稍微偏离测量值就会变为零，也不准确。

3. 检查光功率计探头是否工作在线性区时，能否用激光光源？

答：不能。光强与光源的距离平方倒数成正比是球面波的特点；而激光更接近平面波，光强基本不随与光源距离而改变，不易测得光功率与距离的变化关系。

4. 证明本实验能满足夫琅和费衍射条件。

证明：如图， P_0 为衍射角 $\theta = 0$ 的一点，对于夫琅和费衍射来说，要求缝上各点发出的次波到 P_0 时均有相同的光程，显然，只有把屏移到无穷远才能满足。实际上，只要 AP_0 与 OP_0 的差远远小于一个波长 λ ，就可以满足条件。 $AP_0 - OP_0 = \sqrt{Z^2 + (a/2)^2} - Z \ll \lambda$ 因 $Z \gg a$ ，可得



$$\sqrt{Z^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} - Z = \frac{a^2}{8Z}$$

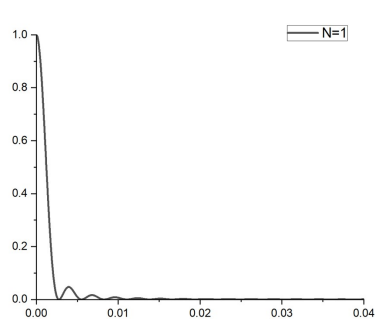
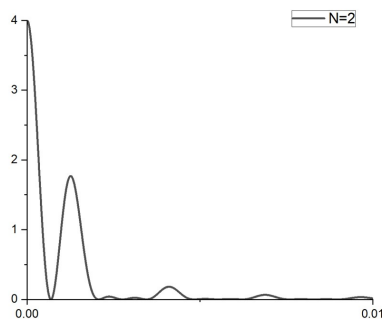
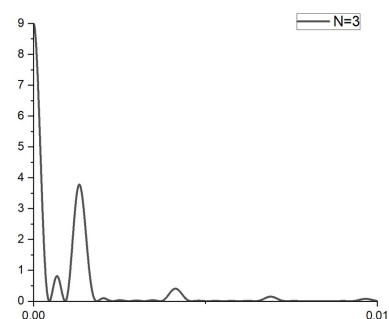
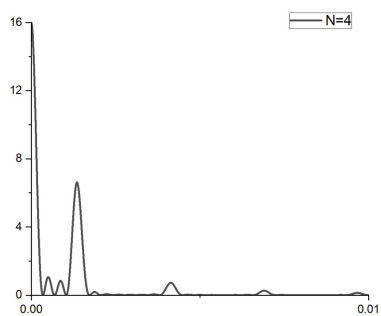
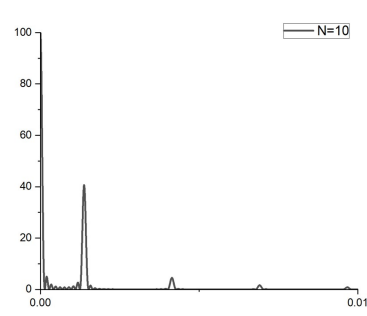
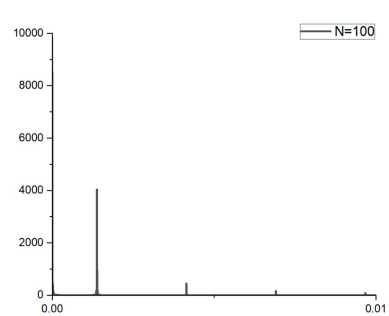
即有 $a^2 \ll 8Z\lambda$ 在实验中, $\lambda = 632.8\text{nm}$, 缝宽 $a = 0.264\text{mm}$, $Z = 89.05\text{cm}$, 代入后, 符合上式。

5. 采用数值计算的方法画出单缝、双缝、三缝、四缝、多缝、透射光栅的相对光强分布曲线。

答：单缝、双缝、三缝、四缝、多缝可以看做是透射光栅的特殊情况，多缝衍射强度分布为单缝衍射光强分布与多缝干涉光强分布的相互作用结果。其表达式为：

$$I = I_0^2 \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}} \right)^2 \left(\frac{\sin\left(N \frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}} \right)^2$$

将 $a = d/2 = 0.264\text{mm}$, $N = 1, 2, 3, 4, 10, 100$ 分别代入, 作图如下:

(a) $N=1$ (b) $N=2$ (c) $N=3$ (d) $N=4$ (e) $N=5$ (f) $N=5$