

全息光栅和透镜的制作以及参数测定

张天翼、易千棵、戴湘霖、朱淳炜

2024 年 6 月 2 日

摘要

全息术近年发展迅速，前景广阔。本次实验从全息光学元件——光栅、透镜的制作入手，对全息光学的应用做了一系列尝试。具体包括搭建光路、制作全息光栅及透镜，并对其参数进行测量，与理论结果比较以评估误差，同时分析可能的影响因素。此外还使用实验制得的全息光学元件进行一系列应用尝试，观察具体现象。

目录

1 实验目的	3
2 实验仪器	3
3 实验原理	3
3.1 低频全息光栅	3
3.1.1 制作原理	3
3.1.2 衍射原理	3
3.2 全息透镜	4
4 实验过程	5
4.1 光栅实验	5
4.1.1 光栅制作	5
4.1.2 观察现象	5
4.1.3 参数测量	5
4.2 透镜实验	6
4.2.1 透镜制作	6
4.2.2 观察现象	7
4.2.3 参数测量	7
4.3 应用与探究	7
4.3.1 红光会聚	7
4.3.2 白光会聚	7
4.3.3 得到光栅的傅立叶频谱	7
5 数据处理	8
5.1 光栅常数	8
5.2 透镜焦点	8
6 实验结论	8
6.1 全息光栅和透镜的制作	8
6.2 全息元件参数测定结果	9
6.3 应用探究结论	9
7 误差分析	9

1 实验目的

1. 搭建光路并制作一维及二维光栅
2. 搭建光路并制作全息透镜
3. 测定光栅常数及透镜焦距等参数
4. 尝试相关探究及应用

2 实验仪器

激光器 (532nm、632nm)、光学透镜 ($f=15\text{cm}$)、扩束镜、平面反射镜、分束镜、傅立叶透镜 ($f=30\text{cm}$)、夹具座、标准光栅、遥控定时快门、免洗干板若干、光屏、直尺、紫外灯、恒温箱等

3 实验原理

3.1 低频全息光栅

3.1.1 制作原理

在全息干板上记录两列有一定夹角的平面波的干涉条纹，经显影、定影等处理后就得到全息光栅。低空频的全息光栅可用马赫-曾德干涉仪光路来制作：两束平行光在干板位置处相遇发生干涉，干涉条纹为等间距直条纹。干板放在干涉场中经曝光、显影、定影等处理就得到低频全息光栅。

两束相干光与 P 平面的法线交角为 θ_1 和 θ_2 , $\theta = \theta_1 + \theta_2$ 为两束光的会聚角。这两束相干的平行光相互叠加时，产生等距的明暗相间的直条纹，干涉条纹的间距由下式决定：

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2} = \frac{1}{2 \sin \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \cos \frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2)} \quad (1)$$

当两束光对称入射即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta/2$ 时

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

当 θ 很小时

$$d = \frac{\lambda}{\theta} \quad (3)$$

根据 2 或 3 可以测算光栅的光栅常数。

3.1.2 衍射原理

激光照射平面衍射光栅时，会发生夫琅禾费衍射。在光屏两处分别出现 ± 1 级的衍射光斑。更高级次的衍射光斑距离光屏中心更远。

平面衍射光栅方程为

$$d \sin \theta_j = j\lambda, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

根据衍射光路的几何关系，即可在实验上测量光栅常量 d 。[1]

3.2 全息透镜

全息透镜实验是全息术中的基础实验之一。全息透镜实际上是一张点光源的全息图，它相当于一张菲涅尔波带片，具有类似透镜的会聚作用和成像特性。^[2]

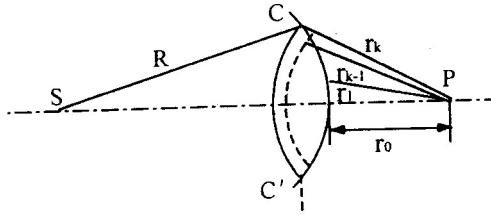


图 1: 菲涅尔圆孔衍射

如图 1 所示，点光源 S 发出波长为 λ 的单色光通过圆孔时将产生衍射。根据菲涅尔-惠更斯原理，可采取下述方法确定点光源 S 发出的光波到达对称轴上任意点 P 产生振动的振幅：设想将点光源到达圆孔处的波阵面分成许多环形带，使 $r_1 - r_0 = r_2 - r_1 = \dots = r_k - r_{k-1} = \lambda/2$ ，那么任意两相邻环带对应部分发出的次波到达 P 点的光程差均为 $\lambda/2$ ，即位相差为 π ，也就是它们在 P 点产生的振动的方向相反，这样分割成的带称为菲涅尔半波带。若圆孔含有 k 个半波带，并假定 a_1, a_2, \dots, a_k 分别为第一个、第二个、……、第 k 个半波带在 P 点所生振动的振幅的绝对值，则 P 点合振幅 $A_k = a_1/2 \pm a_k/2$ (k 为偶数时取“-”号, k 为奇数时取“+”号)。如果将 k 为偶数 (或奇数) 序号的带用不透光的纸或其它物体遮住，那么相邻两个透光部分的位相差 2π 。因此 P 点的合振动将加强，且为 $A_k = \sigma a_{2k+1}$ (或 a_{2k})，此时就组成了一个菲涅尔衍射波带片。由理论推导可得出第 k 个环带的半径 ρ_k 满足下式：

$$\rho_k^2 = k\lambda \frac{Rr_0}{R+r_0} \quad (5)$$

式中 R 为点光源至圆孔的距离, r_0 为圆孔至 P 点的距离。若：

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{r_0} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

则有：

$$\rho_k^2 = k\lambda f \quad (7)$$

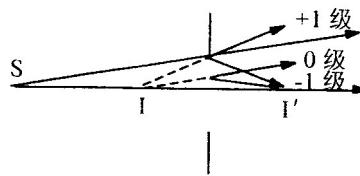


图 2: 波带片的聚焦特性

当用点光源 S 照明上述波带片且仅考虑第一级衍射时，形成的影像有两个 (如图 2 所示)：一个是虚像 $I, +1$ 级衍射波看起来是由 I 点发散的；另一个是实像 $I, -1$ 级衍射波会聚至 I 。由此可见，菲涅尔波带片是一个具有聚焦性质的衍射光栅。它既是一个正透镜，又是一个负透镜。式 6 是它的成像公式, f 就是它的焦距，显然 $f = \frac{\rho_k^2}{k\lambda}$ 。^[3]

4 实验过程

4.1 光栅实验

4.1.1 光栅制作

1. 光路调整

- 1) 按照实验光路图将所有器件摆放在平台上，调至等高。
 - 2) 使用定长细线段将两条光束光束的光程调至基本相等，并使两者的夹角在 30 度到 40 度之间。
 - 3) 调整两束光中扩束镜、准直镜使其共轴，从而使得白屏上光斑亮度最大且均匀。
 - 4) 调节平行光：改变准直透镜与扩束镜之间的距离，使得光屏上光斑在远近处大小相等。
 - 5) 调节光屏位置，使得两束平行光的光斑打在光屏上同一位置。
 - 6) 转动分束镜调节分光比例，使得两束平行光光斑亮度大致相等。
 - 7) 固定各光学元件。
2. 确定曝光时间根据所用激光器的功率以及所用全息底片的灵敏度等，确定适合的曝光时间，本实验采用免洗干板，曝光时间定为 90 秒。

同时为了探究曝光时间对制作出的全息光栅的影响，分别在 45 秒、65 秒、75 秒的曝光时间下再次实验。

3. 曝光与冲洗

关闭实验的照明灯光，使实验室处于暗室环境；打开安全照明灯（红光 LED）。打开全息干板并置于干板架上，注意将感光膜面向物光方向；锁紧干板后静置 12 分钟再进行曝光。

4. 显影与定影

- 1) 将曝光后的全息底片在紫外光下显影 2 分钟。
- 2) 将显影后的干版放入恒温箱中定影 10~15 分钟。

4.1.2 观察现象

待干板冷却后，将其置于原波长激光照射光路下，观察正负一级衍射光斑的强弱与分布范围（如图 3）。同时发现曝光时间在 75 秒以上制作的全息光栅效果明显更好，曝光时间不足的光栅衍



图 3: 正负一级衍射光斑

射效率极低或无衍射光斑，有效区域也不够稳定。

4.1.3 参数测量

- 1) 通过对曝光光路俯视图的拍摄与处理（图 4）测量两束光与干板架法线的夹角 θ_1 和 θ_2 。将其带入公式 1 得到理论的光栅常数。

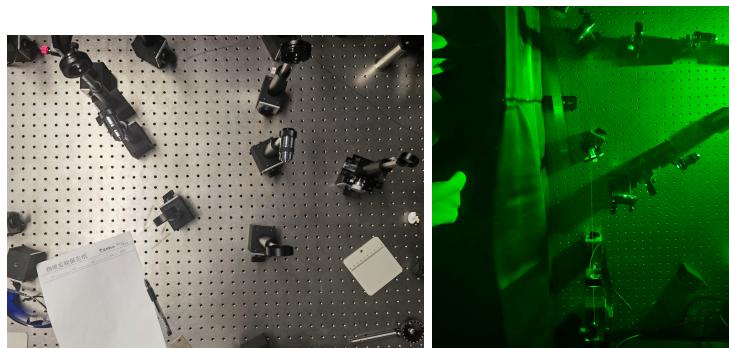


图 4: 光路俯视图

- 2) 在观察光路中利用直尺测量正负一级光斑到 0 级光斑到距离, 重复 3 次取平均值。代入公式 4 得到实际的光栅常数。
- 3) 将理论与实际的光栅常数比较, 得出相对误差。

4.2 透镜实验

4.2.1 透镜制作

1. 光路调整

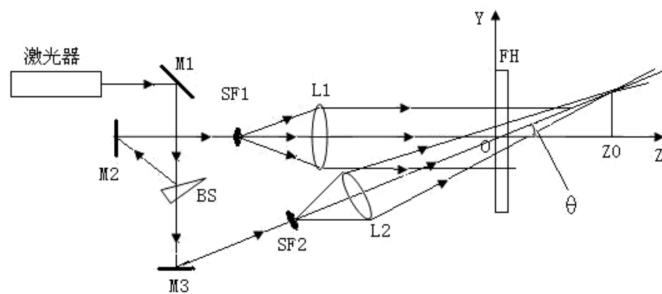


图 5: 透镜制作光路图

- 1) 按照实验光路图 [2] 将所有器件摆放在平台上, 调至等高。
- 2) 使用定长细线段将两条光束光束的光程调至基本相等, 并使两者的夹角在 30 度以内。
- 3) 调整两束光中扩束镜、准直镜使其共轴, 从而使得白屏上光斑亮度最大且均匀。
- 4) 调节平行光: 改变一条光路上准直透镜与扩束镜之间的距离, 使得光屏上光斑在远近处大小相等。
- 5) 另一条光路上通过改变透镜距离, 使得光线焦点在光屏后一定位置, 并用直尺测量焦点与光屏距离。
- 6) 调节光屏位置, 使得两束平行光的光斑打在光屏上同一位置。
- 7) 转动分束镜调节分光比例, 使得非平行光的光斑亮度稍大。
- 8) 固定各光学元件。
2. 重复光栅实验中的显影定义步骤, 设置曝光时间为 90 秒。
3. 改变非平行光路中透镜位置, 使光线焦点位于光屏前方 (如图 6), 再次实验。

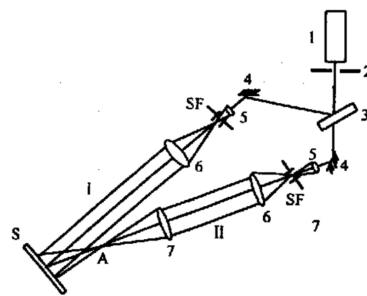


图 6: 焦点在前方的光路图

4.2.2 观察现象

待干板冷却后，将其置于原波长平行光照射下，观察衍射光斑。发现衍射光为非平行光（如图 7），说明全息透镜对原光线有会聚作用。

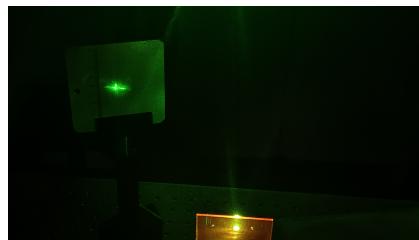


图 7: 全息透镜的焦点

而制作光路中焦点在干板前方的全息透镜，虽然也能观察到一定的会聚作用，但其衍射效率相比于焦点在后方的全息透镜明显更低。

4.2.3 参数测量

找到全息透镜衍射光线的焦点，用直尺测量其到透镜的距离，测 3 次取平均值。

同时测量透镜的衍射角度，确定焦点位置，与原光路比较。

4.3 应用与探究

4.3.1 红光会聚

使用氦氖激光器 (632nm) 调节出平行光线，将制得的全息透镜放在光路中，观察衍射现象，发现与绿光中一样有确定的焦距和离轴角度（图 8）。重复对其焦距的测量，与对绿光的焦距相比较。

4.3.2 白光会聚

使用白光手电筒，通过透镜聚焦为平行光后照射全息透镜，再次观察衍射现象。发现制得的全息透镜对白光中的不同波长光线衍射的离轴角度不同，在光屏上形成了一条彩色线。

4.3.3 得到光栅的傅立叶频谱

用实验制得的全息光栅，对标准实验室光栅在平行光下的衍射光线进行会聚，在一定距离成功得到了光栅的频谱面（图 9），效果较为明显。

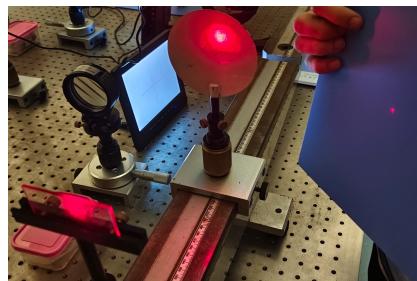


图 8: 对红光的会聚作用

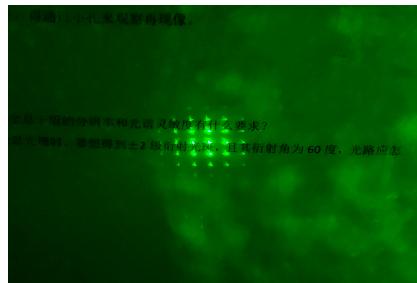


图 9: 光栅的频谱

在频谱面后用制得的另一相同规格全息透镜对光线进行会聚，未能在后方看到还原的光谱影像。

5 数据处理

5.1 光栅常数

光路角度 θ_1 (deg)	光路角度 θ_2 (deg)	光屏距离 l (cm)	光斑距离 s (cm)
22.5	14.1	23.8	16.5
13.5	14.8	18.6	9.9

表 1: 光栅常数测定数据

每个全息光栅的制作光路夹角和衍射角度相关参数被记录在表 1 中，分别代入公式 1 和公式 4 计算出了理论和实际的光栅常数，并以此计算了实验和预期的相对误差（表 2）。

5.2 透镜焦点

实验测得透镜制作光路的原焦点位置和全息透镜实际衍射效果的数据如表 3 所示。

6 实验结论

6.1 全息光栅和透镜的制作

本次实验成功制得全息光栅和全息透镜，并观察到了预期现象。

理论光栅常数 $d_0(nm)$	实际光栅常数 $d(nm)$	相对误差
849.4	933.7	9.93%
1088.2	1132.3	4.05%

表 2: 光栅常数计算结果

光路焦点距离 $f_0(cm)$	透镜焦距 $f(cm)$	光路夹角 $\theta_0(^{\circ})$	透镜离轴角度 $\theta(^{\circ})$
37.6	39.2	32	32
14.2	14.9	38	39
14.3	15.3	38	38

表 3: 透镜参数实验数据

6.2 全息元件参数测定结果

本次实验中被测全息光栅的光栅常数为 $933.7nm$ 和 $1132.3nm$, 所用光路的预期理论光栅常数为 $849.4nm$ 和 $1088.2nm$, 相对误差为 9.93% 和 4.05%

实验中测得全息透镜的焦距和离轴角与原光路中焦距与夹角在一定误差范围内相等, 所以焦点与原光路中非平行光焦点在同一位置。同时发现当焦点在光屏后方时, 所制得的全息透镜效果明显更好。

6.3 应用探究结论

本次实验发现全息透镜对非原波长光线仍有会聚作用, 但会聚效果 (即焦点、离轴角) 会有所不同。

7 误差分析

- 俯视图测定光路角度时, 不能保证视角垂直于两条光线, 所测得光路角度有一定偏差。
- 实验中长度和距离都用钢尺测量, 同时由于光学元件中心和磁力底座有一定偏移, 会导致距离测定不够精确。
- 实验中制得的全息透镜可能由于工艺或精确性原因, 导致聚焦效果不如与标准透镜, 横向和纵向的聚焦效果有极小偏差, 导致焦点处光斑无法聚焦成一个点, 所以对透镜焦距的测定会有一定偏差。
- 光屏法线难以精准确定, 导致测量光路角度和透镜离轴角时有一定误差。

参考文献

- [1] 赵康鑫, 于昊, 郎赤诚, 陶冠奇, 康秀英, 彭宇帆, and 王引书. 全息光栅实验的教学研究. 物理实验, 42:43–48, 2022.
- [2] 黄松筠刘菊 兰勇胡心, 丁道一. 离轴全息透镜的制作. 大学物理实验, pages 11–13, 2001.
- [3] 薛明. 全息透镜制作和白光全息再现. Master's thesis, 华中科技大学, 2009.