

实验 B9 迈克耳孙干涉及应用（白光干涉）

【实验目的】

- (1). 观察等倾、等厚干涉现象及调节白光干涉条纹。
- (2). 学习用迈克耳孙干涉仪测量钠光谱波长差的方法。
- (3). 学习用白光干涉测量透明薄片折射率的方法。

【实验仪器】

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	迈克耳孙干涉仪	1	杭州精飞 KF
2	钠灯	1	KF-GP20Na
3	透明薄片	1	

【实验原理】

1. 利用白光干涉测定透明薄片的厚度或折射率

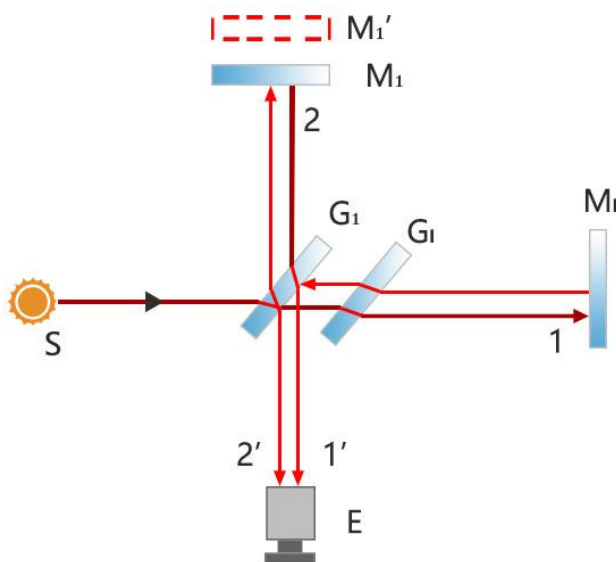


图 1: 迈克耳孙干涉仪原理

在迈克耳孙干涉实验中，如图 A1 所示的原理，若先采用激光光源，调节出等倾干涉圆环，再减小两反射臂的光程差，直至等倾圆环几乎消失。这时如果换上扩散的白光

光源，并微调可调反射镜的倾斜度，则可在视场中观察到彩色的条纹，此即为白光等厚干涉条纹，在彩色条纹的中间还可观察到一条全黑的条纹，称为中心暗纹，观察到此现象后，可缓慢移动 M_1 镜，使中心暗纹移到视场中央，然后在 M_1 镜与分束镜 P_1 之间放上折射率为 n ，厚度为 t 的透明薄片，且使薄片与 M_1 镜平行，则此时光程差要比原来增大 $\Delta L=2t(n-1)$ 。

白光彩色条纹随即移出视场范围，如果将 M_1 镜向前朝分束镜 P_1 方向移动一段距离 Δd ，使 $\Delta d=\Delta l/2$ ，则白光彩色干涉条纹重新出现（中心暗纹要移到视场中央），有 $\Delta d=t(n-1)$ 。

测出 M_1 镜的移动量 Δd ，若已知厚度，可求出折射率 n ；反之，若已知 n ，可求出 t 。

2. 测钠双黄线的波长差

钠黄光含有两种波长相近的光。若采用钠灯作光源，在干涉仪动镜 M_1 移动过程中，干涉条纹会出现清晰与模糊的周期性变化，称为光拍现象，设干涉条纹出现一次模糊到清晰后模糊的变化时， M_1 镜移动距离为 Δd ，则双钠黄线的波长差为 $\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\delta d}$

【实验内容及步骤】

结合说明书，学习精密干涉仪的调节方法，用 HeNe 激光器调节出等倾干涉条纹。

- (1). 按图 1 安装干涉仪，扩束镜（2）先不安装。
- (2). 调节 He-Ne 激光器的高度和倾斜度，使激光束从分束镜的中心入射。
- (3). 调节 M_1 和 M_2 反射镜的倾斜度调节螺钉，使各镜面的入射和出射点高度与分束镜接近， M_1 和 M_2 反射的光点在观察屏中央重合。
- (4). 装上扩束镜，观察干涉条纹。

2. 钠双黄线波长差的测量

- (1). 用 He-Ne 激光，调出干涉圆环。移动反射镜 M_1 ，使条纹变宽变稀，至观察屏上只有少数几个圆环，两干涉臂的光程几乎相等。
- (2). 不安装扩束镜。改用钠灯，灯前装有毛玻璃使光散射，观察屏改为平面反射镜。
- (3). 从反射镜中观察，仔细调节 M_2 镜后的倾斜度调节螺钉和 M_1 镜的位置，可观察到黄黑相间的直线状的等厚干涉条纹。
- (4). 调节移动 M_1 ，观察条纹模糊 → 清晰 → 模糊的周期变化过程，记录变化若干周期时 M_1 镜移动的距离 Δd 。

(5). 计算钠双黄线的波长差。

3. 白光干涉的调节并测透明薄片的折射率

- (1). 用 He-Ne 激光，调出干涉圆环。移动反射镜 M_1 ，使条纹变宽变稀，至观察屏上只有少数几个圆环，两干涉臂的光程几乎相等。
- (2). 不安装扩束镜，改用汞灯，灯前装有毛玻璃使光散射，观察屏改为平面反射镜。
- (3). 从反射镜中观察，仔细调节 M_2 镜后的倾斜度调节螺钉和 M_1 镜的位置，可观察
- (4). 在分束镜 P_1 和动镜 M_1 间安装透明薄片并与光路垂直，彩色条纹消失。缓慢调节到直线状的彩色干涉条纹。精密测微头，缩小 M_1 和 P_1 之间的距离，重新观察到彩色条纹，记录 M_1 移动的距离 Δd 。
- (5). 用螺旋测微计测量薄片的厚度，计算薄片的折射率 n 。

【数据处理】

1. 钠双黄线波长差的测量

表 1: 实验数据记录

模糊次数	1	2	3	4	5	6
M_1 位置 d/mm	10.210	10.500	10.793	11.080	11.372	11.661
$\Delta d/mm$		0.290	0.293	0.287	0.297	0.289

计算波长差及误差

查阅资料后可知 Na 双黄线波长为

$$\lambda_1 = 589.0nm$$

$$\lambda_2 = 589.6nm$$

平均波长

$$\Delta\bar{\lambda} = 589.3nm$$

平均移动距离

$$\Delta \bar{d} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_i = \frac{1}{5} \times (0.290 + 0.293 + 0.287 + 0.297 + 0.289) = 0.2912mm$$

Na 双黄线的波长差

$$\Delta \lambda = \frac{\bar{\lambda}^2}{2\Delta \bar{d}} = 0.596nm$$

Na 双黄线波长差理论值

$$\Delta \lambda_0 = 0.600nm$$

相对误差

$$E = \left| \frac{\Delta \lambda - \Delta \lambda_0}{\Delta \lambda_0} \right| \times 100\% = 0.6\%$$

计算不确定度

平均值的实验标准差

$$S_{\Delta d} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^5 (\Delta d_i - \Delta \bar{d})^2} = 0.0017mm$$

自由度

$$V_{\Delta d} = n - 1 = 4$$

A 类不确定度

$$S_A = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta \lambda}{\partial \Delta d} \times S_{\Delta d} \right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{\bar{\lambda}^2}{2\Delta \bar{d}^2} \times S_{\Delta d} \right)^2} = 0.0036nm$$

A 类不确定度的自由度

$$V_A = \frac{S_A^4}{\left(\frac{\partial \Delta \lambda}{\partial \Delta d} \times S_{\Delta d} \right)^4 / V_{\Delta d}} = 4$$

$$U_{\Delta d} = \frac{0.01mm}{\sqrt{3}} = 0.00577mm$$

自由度 $V_{U_{\Delta d}} = 1$

B 类不确定度

$$S_B = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta \lambda}{\partial \Delta d} \times U_{\Delta d}\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{\bar{\lambda}^2}{2\Delta d^2} \times U_{\Delta d}\right)^2} = 0.0121nm$$

B 类不确定度的自由度

$$V_B = \frac{S_B^4}{\left(\frac{\partial \Delta \lambda}{\partial \Delta d} \times U_{\Delta d}\right)^4 / V_{U_{\Delta d}}} = 1$$

合成不确定度

$$S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2} = 0.0127nm$$

合成自由度

$$V = \frac{S^4}{\frac{S_A^4}{V_A} + \frac{S_B^4}{V_B}} = 1$$

取 $V=1, p=0.95$, 查表可得 $t_p = 12.71$

扩展不确定度为

$$\Delta D = t_p S = 0.15nm$$

计算结果为

$$\Delta \lambda = \Delta \bar{\lambda} \pm \Delta D = (0.60 \pm 0.15)nm$$

误差分析

1. 人眼无法准确地做出清晰和模糊的界定，从而造成较大误差，可多次测量减小误差。
2. 当实验中触碰桌子时，仪器会随之发生颤动，从而导致误差的产生。

2. 白光干涉的调节并测透明薄片的折射率

表 2: 薄片厚度

测量次数	1	2	3	4	5	均值	标准差
薄片厚度/mm	0.168	0.171	0.170	0.171	0.170	0.170	0.0005

薄片平均厚度

$$\bar{t} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 t_i = \frac{1}{5} \times (0.168 + 0.171 + 0.170 + 0.171 + 0.170) = 0.170mm$$

平均厚度的实验标准差

$$S_{\Delta t} = S_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^5 (\Delta t_i - \Delta \bar{t})^2} = 0.00054mm$$

自由度

$$V_t = n - 1 = 4$$

B 类不确定度

$$S_B = \frac{0.01mm}{\sqrt{3}} = 0.00577mm$$

B 类自由度

$$V_B = 1$$

合成不确定度

$$S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2} = 0.0058mm$$

合成自由度

$$V = \frac{S^4}{\frac{S_A^4}{V_A} + \frac{S_B^4}{V_B}} = 1$$

取 $V=1, p=0.95$, 查表可得 $t_p = 12.71$

测量结果为

$$\Delta t = \Delta \bar{t} \pm \Delta N_{\Delta t} = (0.17 \pm 0.07)mm$$

表 3: 实验数据记录

测量次数	1	2	3	4	5
模糊时 M_1 位置 d_1/mm	10.422	10.420	10.422	10.425	10.423
清晰时 M_1 位置 d_2/mm	10.321	10.322	10.323	10.323	10.320
$\Delta d/mm$	0.101	0.098	0.099	0.102	0.103

平均移动距离

$$\Delta \bar{d} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_i = \frac{1}{5} \times (0.101 + 0.098 + 0.099 + 0.102 + 0.103) = 0.1006mm$$

平均值的实验标准差

$$S_{\Delta d} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^5 (\Delta d_i - \Delta \bar{d})^2} = 0.0009mm$$

自由度

$$V_{\Delta d} = n - 1 = 4$$

由公式得

$$n = \frac{\Delta d}{t} + 1$$

n 均值为

$$\bar{n} = \frac{\Delta \bar{d}}{\bar{t}} + 1 = 1.592$$

A 类不确定度

$$S_A = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \Delta d} \times S_{\Delta d}\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial t} \times S_t\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{1}{\bar{t}} \times S_{\Delta d}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{t}^2} \times S_t\right)^2} = 0.00578$$

A 类不确定度的自由度

$$V_A = \frac{S_A^4}{\left(\frac{\partial n}{\partial \Delta d} \times S_{\Delta d}\right)^4 / V_{\Delta d} + \left(\frac{\partial n}{\partial t} \times S_t\right)^4 / V_t} = 4.96$$

$$U_{\Delta d} = \frac{0.01mm}{\sqrt{3}} = 0.00577mm$$

自由度 $V_{U_{\Delta d}} = 1$

B 类不确定度

$$S_B = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial \Delta d} \times U_{\Delta d}\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial t} \times U_t\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{1}{\bar{t}} \times U_{\Delta d}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{t}^2} \times U_t\right)^2} = 0.039$$

B 类不确定度的自由度

$$V_B = \frac{S_B^4}{\left(\frac{\partial n}{\partial \Delta d} \times U_{\Delta d}\right)^4 / V_{\Delta d} + \left(\frac{\partial n}{\partial t} \times U_t\right)^4 / V_t} = 1.62$$

合成不确定度

$$S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2} = 0.04$$

合成自由度

$$V = \frac{S^4}{\frac{S_A^4}{V_A} + \frac{S_B^4}{V_B}} = 1.69$$

取 $V=2, p=0.95$, 查表可得 $t_p = 4.3$

扩展不确定度为

$$\Delta n = t_p S = 0.17$$

计算结果为

$$n = \bar{n} \pm \Delta n = 1.59 \pm 0.17$$

误差分析

1. 由于条纹较浅，故清晰与模糊的边界难以用肉眼准确分辨，从而造成较大的误差
2. 薄片厚度测量时最后一位是估读数，存在一定误差。
3. 薄片不一定与光路严格垂直，导致实验中厚度增加，测量的折射率增大。

【思考题】

(1) 如何测量透明溶液的折射率？请提出实验方案并说明其合理性。

答：实验方案：(1) 安装干涉仪，在分束镜和 M_1 镜之间放一个透明容器并与光路垂直（先不安装扩束镜）。(2) 调节 He-Ne 激光器的高度和倾斜度，使激光束从分束镜的中心入射。(3) 调节 M_1 和 M_2 反射镜的倾斜度调节螺钉，使各镜面的入射和出射点高度与分束镜接近， M_1 和 M_2 反射的光点在观察屏中央重合。(4) 装上扩束镜，观察干涉条纹。移动反射镜 M_1 ，使条纹变宽变稀，至观察屏上只有少数几个圆环，两个干涉臂的光程几乎相等。(5) 撤下扩束镜。把激光器换成汞灯，灯前装有毛玻璃使光散射。将观察屏的一面换成平面反射镜。(6) 从反射镜中观察，仔细调节 M_2 镜后的倾斜度调节螺钉和 M_1 镜的位置，直至观察到直线状的彩色干涉条纹。(7) 在分束镜 P_1 和动镜 M_1 间的透明容器中加所需测液体并与光路垂直，彩色条纹消失。缓慢调节精密测微头，缓慢调节精密测微头，缩小 M_1 和 P_1 之间的距离，重新观察到彩色条纹，记录 M_1 移动的距离 Δd 。(8) 用螺旋测微器测量容器的厚度，根据式 $n = \Delta d / (t + 1)$ 计算透明溶液的折射率 n 。

(2) 当空气的温度改变时，空气的折射率也会改变的，怎样去测量空气的折射率？

答：空气折射率会随空气状态改变而改变，我们可以利用基于传感器的空气折射率测量仪测量空气折射率：将常温下测得的空气温度、压力和相对湿度，利用 HP03MA 传感器以及相应计算机程序读取补偿系数、温度及压力值，对温度和压力值进行修正后代入 Edlen 经验公式，最终计算出空气折射率 n 。HP03MA 系统的主要功能是从一个压力传感器转换为补偿压力和温度信号。转换后可得到 D1(测量气压) 和 D2(测量温度) 值。因为传感器是随着温度强烈变化的，所以必须对这些影响进行一些补偿。HP03MA 传感器中需要赋予补偿系数特定的输入值，压力（单位：0.01hpA）和温度（单位：0.1°C）作为输出值。