

实验 A7 迈克尔逊干涉及其应用（激光干涉）

[实验前思考题]

1. 什么是光的相干性？什么是相干长度和相干时间？

2. 迈克尔逊干涉仪能观察到干涉条纹的条件是什么？

3. 什么是等厚干涉？什么是等倾干涉？实现的条件是什么？

1. 光的相干性：两束光在空间重叠，若光强不是线性叠加，而是因为光程或相位等原因出现增强或减弱从而观察到干涉条纹，则称两束光是相干的。

相干长度：当两束相干光的光程大于某一数值时，相干性消失，不再产生干涉，该光程称为相干长度 $\Delta L = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$ (λ 为谱线中心波长， $\Delta \lambda$ 为光源光谱宽度)。

相干时间： $t_c = \frac{\Delta L}{c}$ (ΔL 为相干长度， c 为光速)

① 叠加光波有相互平行的光振动分量
② 相位差恒定

2. 振动频率相同、振动方向相同、相位差恒定的相干光源

3. 等厚干涉：由平行光入射到厚度均匀、折射率均匀的薄膜上、下表面而形成的干涉条纹。因在薄膜厚度相同的地方形成同一条干涉条纹故称等厚干涉。

等倾干涉：扩展光源上各发光点沿各个方向入射在均匀厚度的薄膜上产生的干涉条纹。

等厚干涉条件：平行光源入射上下表面不平行劈尖，入射光同频同振动力向、固定相位差，光源要成时间、空间相干性，薄膜

等倾干涉条件：入射光同频同振动力向、固定相位差，光源有时间、空间相干性，平行平板厚度不能过大。

(请自行加页)



[实验目的]

1. 了解迈克尔逊干涉仪的构造、原理和调节方法。
2. 学习用迈克尔逊干涉仪测量单色光波长的方法。
3. 学习用迈克尔逊干涉仪测量薄玻璃片折射率的方法。
4. 学习用迈克尔逊干涉仪测量空气折射率的方法。

[仪器用具]

仪器名称	数量	主要参数(型号, 测量范围, 测量精度等)
精密干涉仪	1	KF-WSM 精度 100nm
He-Ne 激光器	1	输出功率 2mW
气室	1	最大压力量程 300mmHg
透明薄片	1	

[原理概述]

1. 迈克尔逊干涉仪工作原理

迈克尔逊干涉实验是验证光速不变性原理的经典实验之一。迈克尔逊干涉仪在生产、科研和精密计量技术中有着广泛的应用，可用它测量光波的波长、微小长度、光源的相干长度等，还可用它来研究温度、压力对光传播的影响等等。

仪器的工作原理如图 1 所示。从光源 S 发出的光束经扩束镜扩束后射到分束镜 P1 的半透半反膜上，被分为强度近似相等的反射光①和透射光②。因 P1 与反射镜 M₁、M₂ 均成 45° 角，所以两束光分别垂直照射 M₁、M₂，经反射后再在观察屏 E 处相遇，形成干涉条纹。若不存在补偿镜 P2，则光束①共经过 P₁ 三次，而光束②只经过 P₁ 一次。放置与 P₁ 的材质和厚度完全一样的 P₂ 镜后，光束②也经过透镜三次，故两束光的光程差就只需计算在空气中的光程差就可以了。

M₂ 通常是固定的，M₁ 可在精密导轨上移动，以改变两光束的光程差。M₁、M₂ 的倾斜度可调，以使镜面与光束垂直。在本实验中，M₁ 镜移动距离的最小读数为 250nm ，估读到 25nm 。图 1 中的 M₂' 是 M₂ 镜由 P₁ 镜的半透半反膜反射后所成的虚像，在 E 处观察时，自 M₂ 反射的光束②好象由 M₂' 发出。因此，干涉仪所产生的干涉图样与 M₁ 和 M₂' 间的空气膜所产生的干涉图样完全等效。

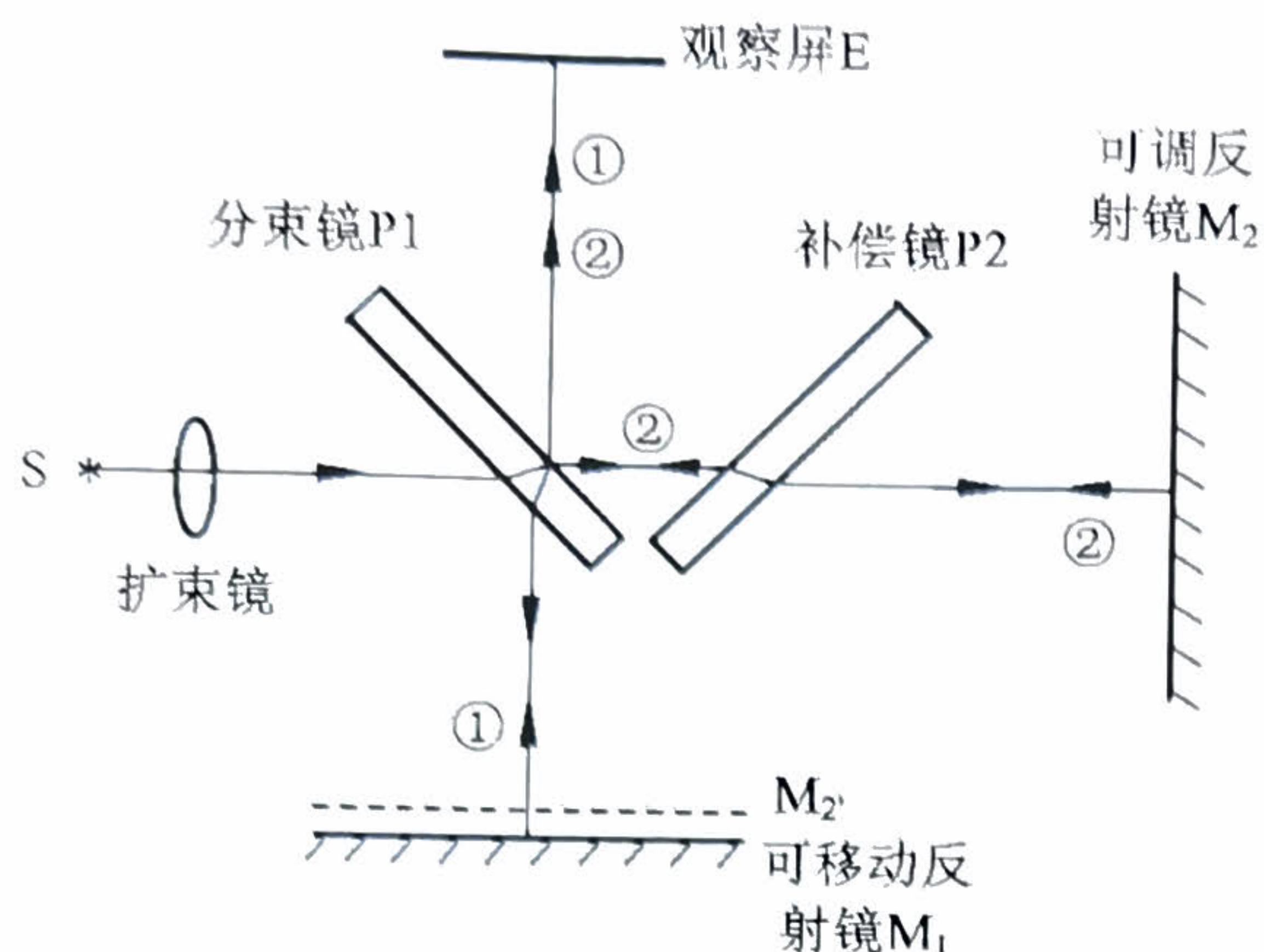


图 1 迈克尔逊干涉仪原理

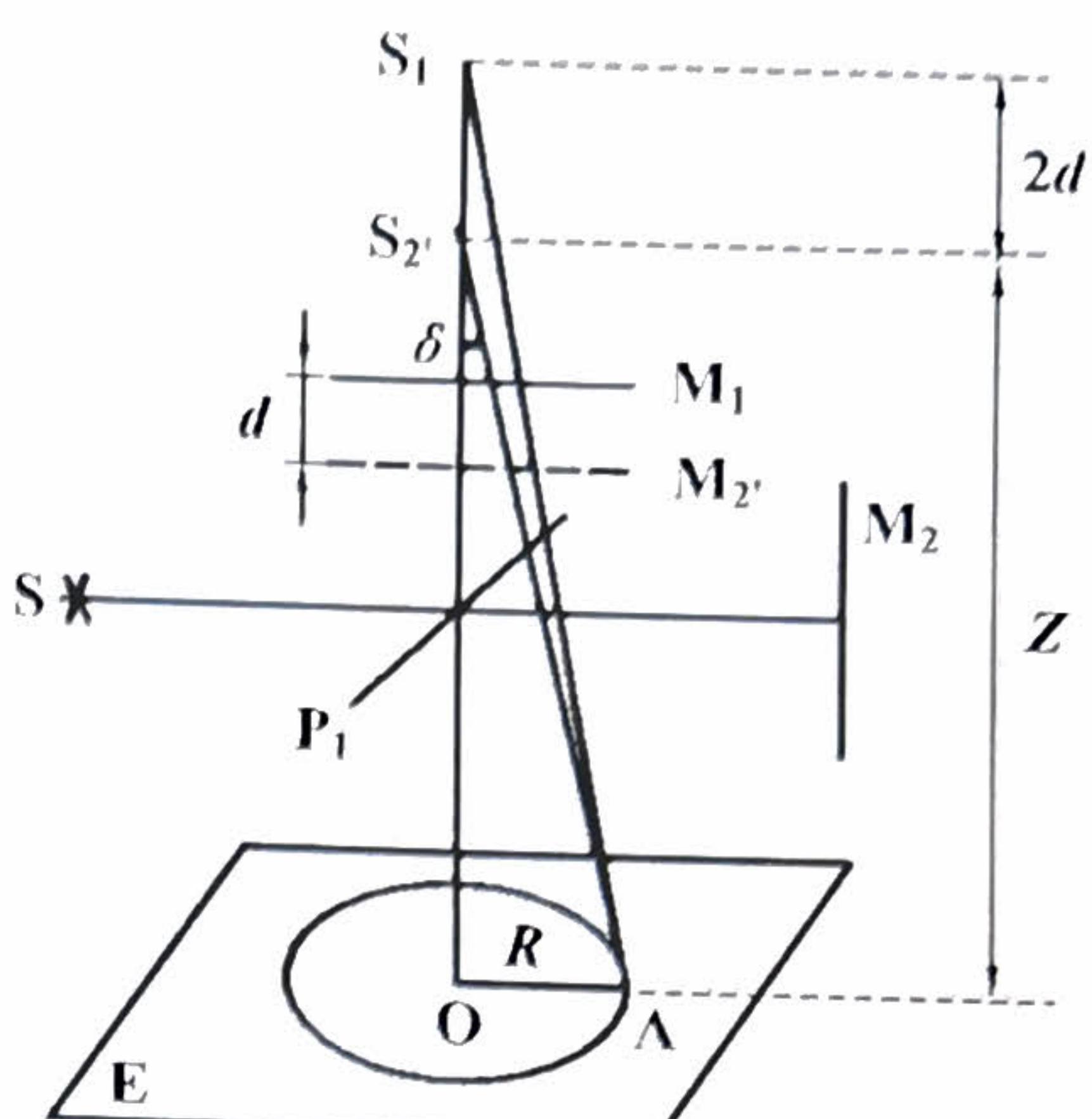


图 2 非定域干涉原理

2. 点光源产生的非定域干涉条纹

当光源为点光源时，它向空间发射球面波，经反射镜 M_1 、 M_2 反射后，相当于由两个虚光源 S_1 、 S_2' 发出，如图 2 所示，但两光源的距离为 M_1 和 M_2' 距离的两倍。若 S_1 、 S_2' 发出的球面波在它们相遇的空间处处相干（如采用激光作为光源），则这种干涉现象称为非定域干涉。若用平面屏观察干涉图样，在不同的位置和方向可观察到圆、椭圆、双曲线、直线等条纹。若观察屏垂直于 S_1S_2' 的连线，在不同的位置和方向可观察到圆、椭圆、双曲线、直线等条纹。若观察屏垂直于 S_1S_2' 的连线，对应的干涉图样是一组同心圆，圆心在 S_1S_2' 延长线和屏的交点 O 上。

由 S_1 、 S_2' 到屏上任一点 A ，两光线的光程差为：

$$L = S_1A - S_2'A = \sqrt{(Z+2d)^2 + R^2} - \sqrt{Z^2 + R^2} = \sqrt{Z^2 + R^2} \left(\sqrt{1 + \frac{4d(Z+d)}{Z^2 + R^2}} - 1 \right) \quad (1)$$

通常 $Z \gg d$ ，利用展开式 $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{2 \cdot 4}x^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6}x^3 - \dots$ ，取至平方项，展开式 (1)

后再略去二级无穷小项，可得：

$$L = 2d \cos \delta \quad (2)$$

当 $L = 2d \cos \delta = k\lambda$ 时出现亮条纹，当 $L = 2d \cos \delta = k\lambda + \lambda/2$ 时出现暗条纹。这种由点光源产生的圆环状干涉条纹，无论将观察屏 E 沿 S_1S_2' 方向移动到什么位置都可以看到。由式 (2) 可知：

(1) $\delta = 0$ 时，光程差 $L = 2d$ 最大，圆心对应的干涉级 K 最高。当 d 增加时，可看到圆环一个个自中心“冒出”而后往外扩张；当 d 减小时，圆环逐渐缩小并从中心“消失”。每改变一个圆环，相当于 S_1S_2' 的光程差改变了一个波长 λ 。设 M_1 镜移动了 Δd ，相应“冒出”或“消失”的圆环数为 N ，则：



$$n = \frac{t \sin^2 \theta}{2t(1 - \cos \theta) - N\lambda} + \left(1 - \cos \theta - \frac{N \cdot \lambda}{2t} \right) \quad (5)$$

在转动角度小于 20° 时，右边第二项可以省略，引起的误差不大于 20%。

5. 空气折射率的测量

将长度为 t 的气室置于迈克尔逊干涉光路中，调节干涉仪在观察屏上出现等倾干涉条纹。关闭气室阀门，向气室内充气至满偏（300mmHg），此时的气压记为 p_{max} 。再轻轻松开阀门，缓慢放气，同时记录放气过程中干涉条纹的变化数 N 至压力表指针归零，此时气室内的气压为大气压 p_{atm} 。则气室内空气的折射率可表示为

$$n = 1 + \frac{N\lambda}{2t} \cdot \frac{p_{max}}{\Delta p} \quad (6)$$

其中 Δp 为气室内压强与 p_{max} 之间的差值。根据 N 和 Δp 的关系曲线，可计算出大气压下空气的折射率。

| 实验装置 |

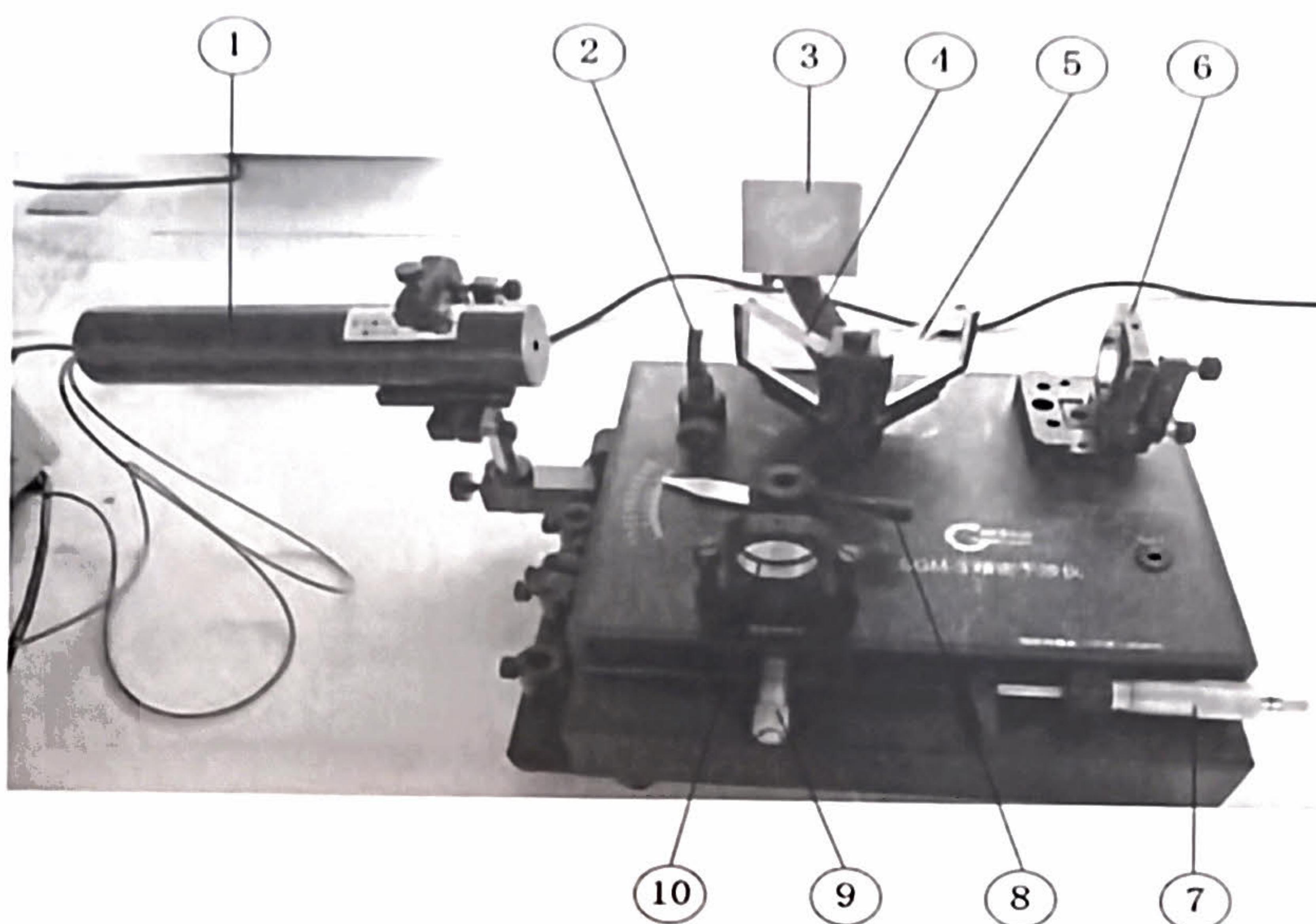


图 5 精密干涉仪

(写出精密干涉仪各部分名称)

1. He-Ne 激光源	2. 扰束镜	3. 毛玻璃观察屏	4. 分束镜
5. P ₂ 补偿镜	6. M ₂ 反射镜	7. 精密测微头	8. 样转底座
9. 预置测微头	10. M ₁ 反射镜		

| 安全注意事项 |

1. 本实验采用 He-Ne 激光作为光源，实验过程中严禁光束直射眼睛，否则会损伤眼睛。
2. 气室充气时指针严禁超过 300mmHg 的最大值，否则会损坏气室，导致漏气。

$$L = 2\Delta d = N\lambda, \text{ 则 } \Delta d = N\lambda/2 \quad (3)$$

读出 Δd 及数出相应的 N , 就可以测出光波的波长 λ 。

(2) d 增大时, 光程差 L 每改变一个波长 λ 所需的角度 δ 变化值减小, 即两亮环(或两暗环)之间的距离变小, 条纹变细变密。反之, d 减小时, 条纹变粗变疏。

3. 等倾干涉条纹

如图 3 所示, 当 M_1 和 M_2' 互相平行, 光源为扩展光源(如光源前加了一块毛玻璃)时, 入射角为 δ 的光经 M_1 、 M_2' 反射后的(1)和(2)两束光互相平行, 它们的光程差为:

$$L = AB + BC - AD = \frac{d}{\cos \delta} + \frac{d}{\cos \delta} - AC \sin \delta = \frac{2d}{\cos \delta} - \frac{2d \sin^2 \delta}{\cos \delta} = 2d \cos \delta \quad (4)$$

可见, 在 d 一定时, L 只决定于 δ 角, δ 相等的各方向上的光束形成一个圆环。由于光线平行, 所成的是虚像, 当眼睛对无穷远调焦才能看到一系列的同心圆。当移动眼睛时, 圆环亦随之移动, 但其形状、大小不变。与非定域干涉条纹类似, 在等倾干涉条纹中, 圆心处干涉条纹的级别最高。当 d 增加时, 圆环从中心“冒出”, 条纹变细变密; 当 d 减小时, 圆环从中心“消失”, 条纹变粗变疏。

产生等倾干涉条纹的光源问题。在点光源的情况下, 等倾干涉实际上就是非定域干涉中把屏放到无穷远的特例, 但这种干涉比较难实现, 通常需要采用扩展光源。由于扩展光源各发光点是互不相干的, 每个点光源都有自己的一套非定域条纹, 在无穷远处, 扩展光源上任两个独立光源发出的光线, 只要入射角相同, 都会会聚在同一干涉条纹上, 因此, 在无穷远处就会看到清晰的等倾干涉条纹。

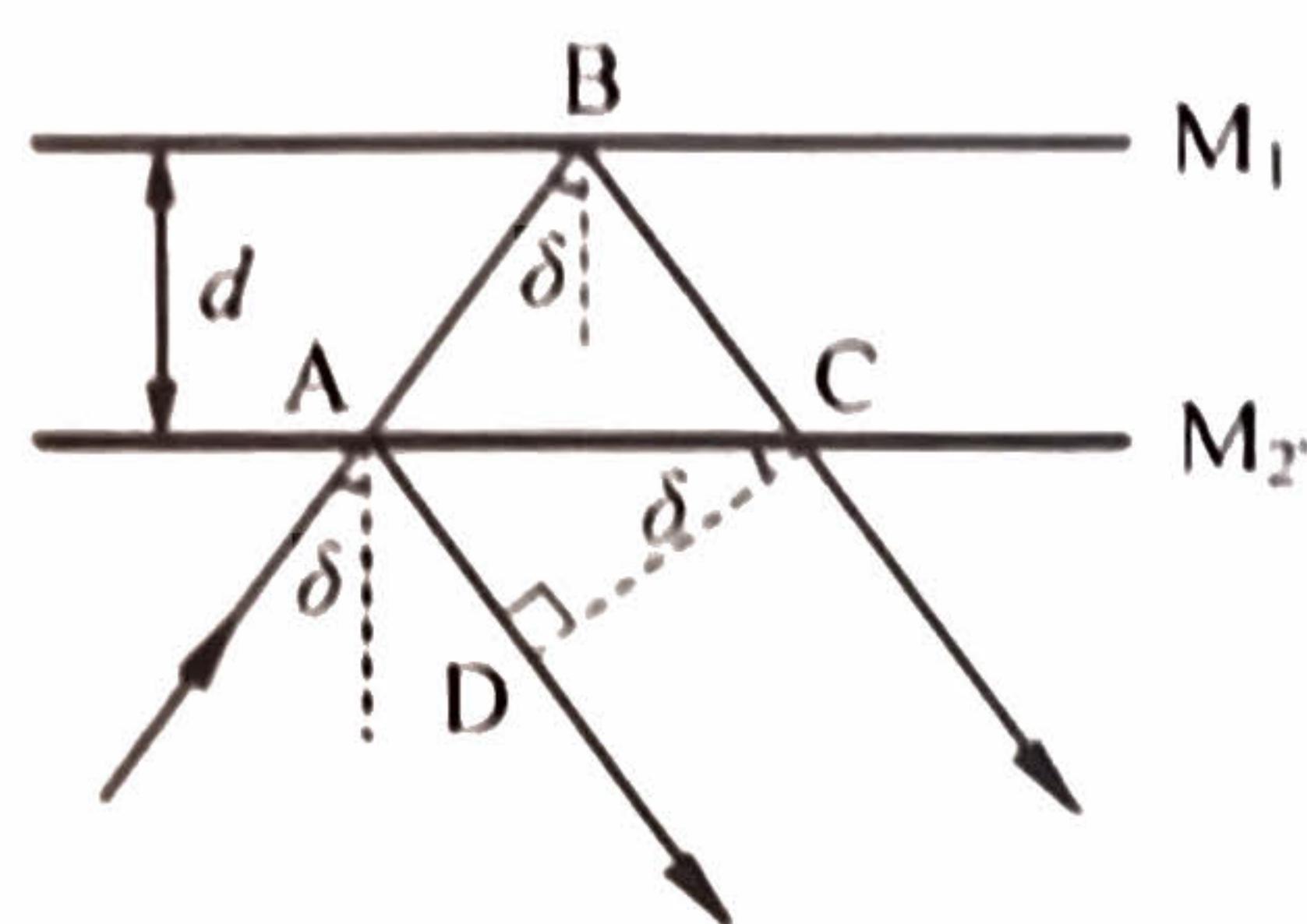


图 3 等倾干涉原理

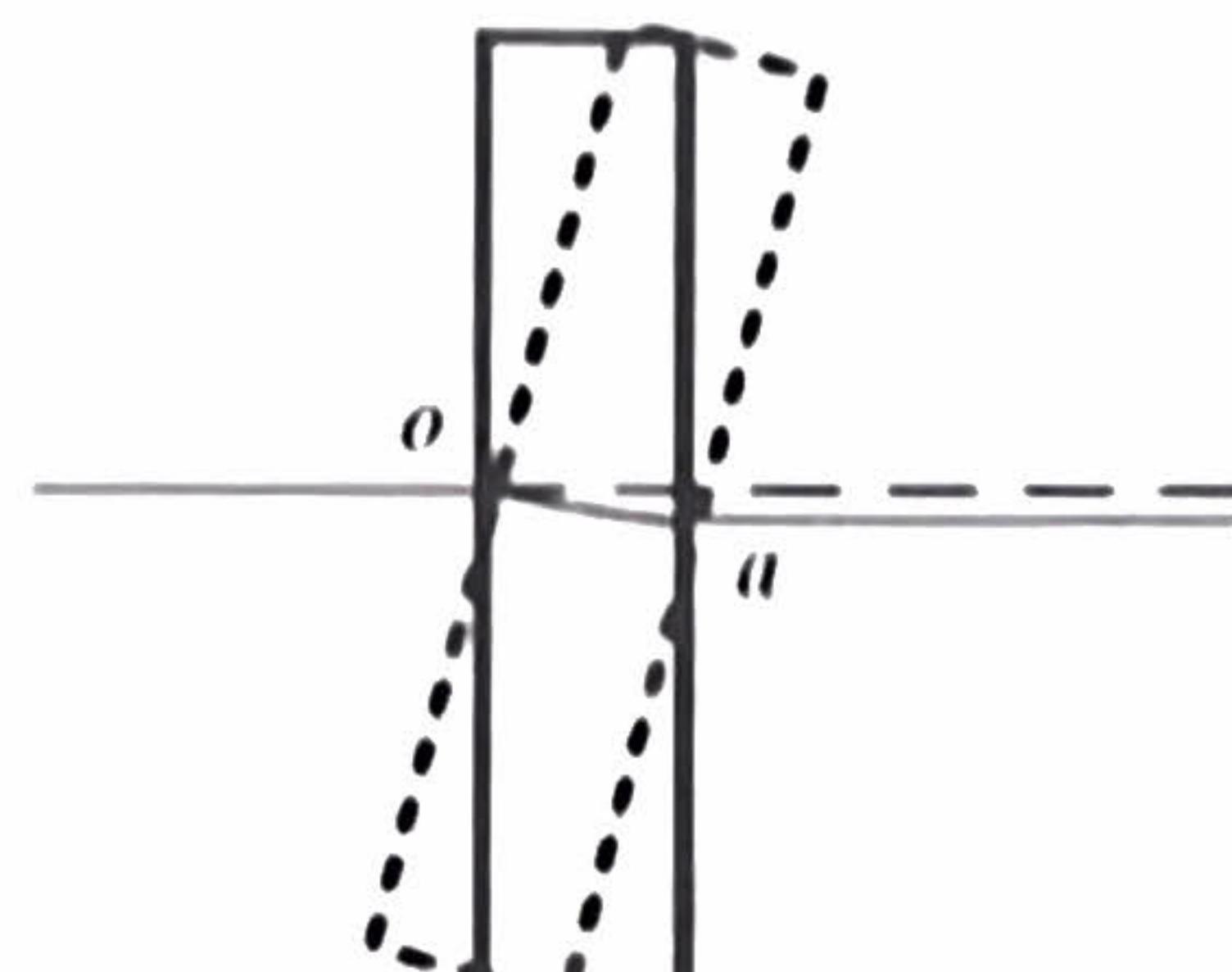


图 4 玻璃薄片转动前后光程变化

4. 用非定域干涉测透明薄片的折射率

若在图 1 所示的分束镜 P_1 与动镜 M_1 之间放一个可转动的底座, 其上放置透明薄片。转动底座带动薄片也转过一个角度 θ , 则光程将发生变化, 如图 4 所示。设转动 θ 角时干涉条纹变化数为 N , 则薄片的折射率为:



实验完毕需将气室的放气旋钮拧松，使指针降至最小值。

[实验内容及步骤]

1. 结合说明书，学习精密干涉仪的调节方法，用 He-Ne 激光器调节出干涉条纹。
 - (1) 按图 5 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. 测量透明薄片的折射率(用旋转样品法)
 - (1) 采用 He-Ne 激光器，调节出干涉条纹，并在旋转底座上安装透明薄片(玻璃或有机片)，薄片与光路垂直(即条纹湮灭和冒出的临界状态)。
 - (2) 旋转底座，记录干涉条纹变化的数目 N 与旋转的角度 θ 。
 - (3) 用螺旋测微计测量透明薄片的厚度，根据式(9)计算薄片的折射率。
3. 测量空气的折射率
 - (1) 采用 He-Ne 激光，将气室安装至迈克尔逊干涉光路且窗口与光路垂直。
 - (2) 调出干涉条纹。关闭气室阀门，向气室内充气至满偏(300mmHg)。
 - (3) 轻轻松开阀门，缓慢放气，记录干涉条纹的变化数 N 及对应的气室压强 Δp ，直至压力表指针归零。该步骤中缓慢放气的操作较难掌握，需反复练习几次。
 - (4) 计算不同压强下空气的折射率，并作折射率~压强关系曲线。

[数据记录及处理]

2. 测量透明薄片的折射率

(1) 薄片厚度的测量

测量次数	1	2	3	4	5	平均值 \bar{t} / mm	实验标准差 $S_{\bar{t}}$ / mm
薄片厚度 t / mm	2.625	2.660	2.611	2.590	2.599	2.617	0.017

3.11
3.11

(2) 条纹变化数与转动角度的关系

条纹变化数 N	90	96	108	127	150	179	204	235	277	295
旋转角度 θ / degree	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

(3) 计算透明薄片的折射率及其实验标准差。

$$\lambda = 632.8 \text{ nm} = 6.328 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

$$t = 2.617 \text{ mm} = 2.617 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

$$\text{由 } n = \frac{ts \sin^2 \theta}{2t(1 - \cos \theta) - N\lambda} + 1 - \cos \theta - \frac{N\lambda}{2t} \text{ 得:}$$

$$n_1 = 1.909134$$

$$n_6 = 1.301035$$

$$n_2 = 1.140498$$

$$n_7 = 1.975317$$

$$n_3 = 1.427303$$

$$n_8 = 1.296458$$

$$n_4 = 1.963643$$

$$n_9 = 1.229341$$

$$n_5 = 1.198527$$

$$n_{10} = 1.945983.$$

$$\bar{n} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{n=10} n_i = 1.538724$$

$$S\bar{n} = \sqrt{\frac{1}{10 \times 9} \sum_{i=1}^{n=10} (n_i - \bar{n})^2} = 0.1141087$$

综上: 折射率为 1.54 ± 0.11

实验标准差为 0.11

3. 空气折射率的测量

(1) 气室玻璃窗之间的距离 $d = 8.90$ cm

(2) 条纹变化数随气室压强的变化关系

条纹变化数 N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
气压表读数 $\Delta P / \text{mmHg}$	300	290	280	270	260	250	240	230	220	210
气体折射率 n	/	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
条纹变化数 N	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
气压表读数 $\Delta P / \text{mmHg}$	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110
气体折射率 n	1.000 415	1.000 411	1.000 408	1.000 406	1.000 404	1.000 402	1.000 400	1.000 399	1.000 398	1.000 397

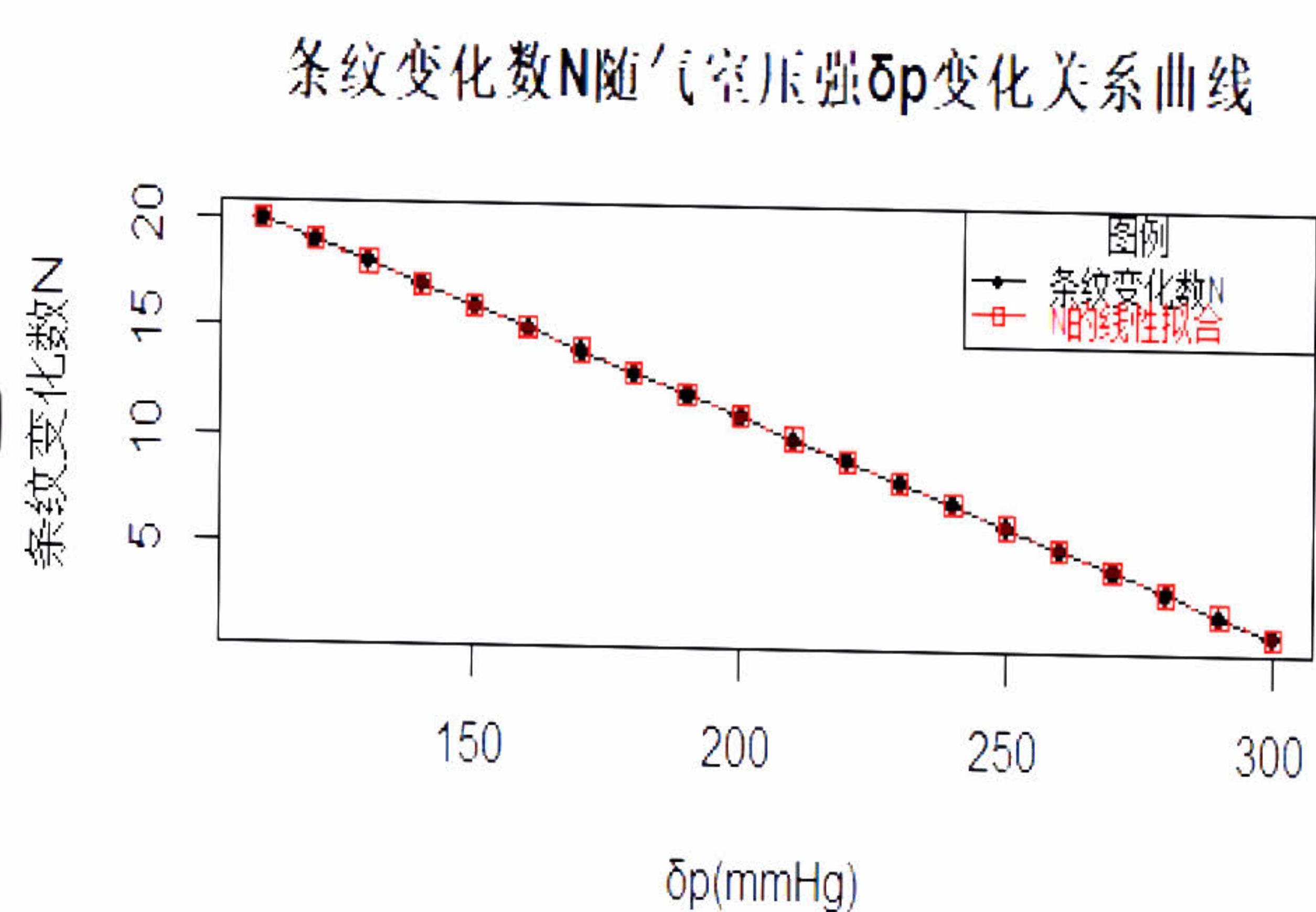
(3) 方法一：作条纹变化数 N 随气室压强 Δp 变化关系曲线，拟合直线得到 $\Delta p=0$ (此时对应的压强为一大气压 1atm) 时的条纹变化数 N_0 ，再计算出 1atm 下空气的折射率。方法二：直接作折射率 n 随气室压强 Δp 的变化关系曲线，拟合曲线求 1atm 下空气的折射率。上述两种方法任选一种进行数据处理，注意气压表测量的是气室内气体压强与环境压强（即 1atm）的差值 Δp 。

方法一变量间为线性关系，方法二不是，故选择方法一拟合。

得条纹变化数与气压表读数关系如图。

拟合直线可得 斜率 = -0.1，截距 = 31 即 $N_0 = 31$ 。由公式 $n = 1 + \frac{N_0 \lambda}{2d} \cdot \frac{P_{\max}}{P_{\max} - \Delta p}$ 得。

$$n \approx 1.00389.$$





[实验后思考题]

1. 如何测量透明液体的折射率？请提出实验方案并说明其合理性。
2. 当空气的温度改变时，空气的折射率也会改变的，这种情况下应如何确定空气的折射率？
3. 测透明薄片折射率的实验中，如何判断透明薄片与光路垂直？
4. 试推导本实验中透明薄片折射率的计算公式（式 5）。
5. 有兴趣的话，可以检索引力波探测的 LIGO 相关资料。

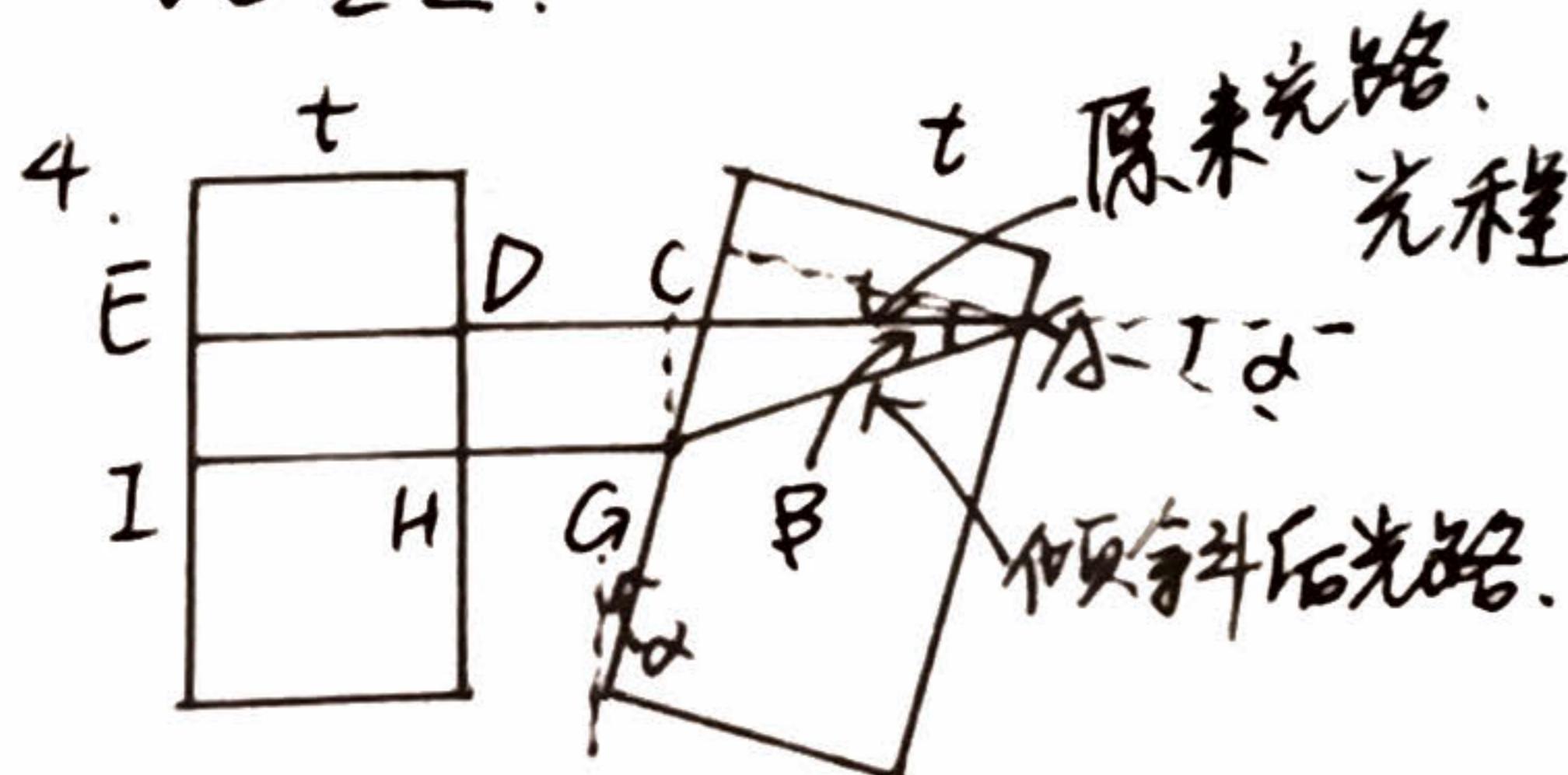
1. 实验方案：打开激光器，调节出干涉条纹后，把旋钮指针放置于分光镜和可移动反光镜之间。把装满待测液体的比色皿放置到旋钮指针上。调整光路与比色皿器壁垂直。记录从初始角度 θ_0 到终点角度 θ_1 内条纹变化数 N_1 ，用相同方法读取 θ 范围内条纹变化数 N_2 。

$$n_{\text{液体}} = \frac{t \sin^2 \theta}{2t(1-\cos \theta) - \Delta N \lambda_0}$$

其中 $\Delta N = N_1 - N_2$ ， λ_0 为激光波长， t 为比色皿前壁至后壁内表面间的长度。 θ 为光线入射角度即指针转过角度。

2. 保持气室压强恒定，用恒温装置调节与保持气室温度恒定进行测量。若温度变化不太大且对室光折射率影响不明显时，多次测量求平均即可。

3. 调节旋钮底座，当干涉条纹处于湮灭和冒出的临界状态时，透明薄片与光路垂直。



折射定律 $n_0 \sin \alpha = n \sin \beta$.

5. LIGO 即激光干涉引力波天文台，是首即激光干涉仪研究引力波的大型研究机器。

$$\begin{aligned} \text{由几何关系 } GI - AD &= HI - DE \\ \text{光程差 } \Delta &= 2[nAG + n_0GI - (n_0AD + nDE)] \\ &= 2\left\{n \frac{t}{\cos \beta} + n_0t - \left[n_0 \frac{t}{\cos \beta} \cos(\alpha - \beta) + nt\right]\right\} \\ &= 2t\left(\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha} - n_0 \cos \alpha + n_0 - n\right). \end{aligned}$$

其中 $\Delta = N\lambda$.

化简得

$$n = \frac{n_0 \sin^2 \alpha}{2t(1 - \cos \alpha) - N\lambda} + \frac{n_0 - n_0 \cos \alpha - \frac{N\lambda}{2t}}{2}$$

其中 $n_0 = 1$ ，近似得

$$n = \frac{t \sin^2 \alpha}{2t(1 - \cos \alpha) - N\lambda}$$