

用迈克尔逊干涉仪测量液体的折射率

罗质华

摘 要 本文提出了在迈克尔逊干涉仪上测量液体折射率的一种新方法,它具有原理简单,实验方便,结果较精确的优点。

关键词 液体 折射率 迈克尔逊干涉仪

折射率是物质的一种重要光学常数,在生产和科学研究的许多部门中都会遇到折射率的测量问题。测定液体折射率方法很多,下面介绍用迈克尔逊干涉仪测量液体折射率的方法。

1. 实验装置简介

用迈克尔逊干涉仪测量液体折射率的原理图如图 1 所示。 M_1 和 M_2 是相互垂直的两个平面反射镜, M_2 是固定的, M_1 由精密丝杆控制,可沿臂轴前后移动, P_1 是分光板, P_2 是补偿板, S 是光源(纳光灯和白炽灯), F 为毛玻璃, L_1 、 L_2 是盛有待测液体的玻璃槽。其结构如图 2 所示。图 2 (a) L_1 的俯视图和正视图,以及大小尺寸,图 2 (b) 为 L_1 的立体图。 L_2 的结构基本上与 L_1 相同,不同之处在于其盛载待测液体的体积比 L_1 的小,即槽内 b' 边的尺寸比 L_1 的 b 边小 $t=b-b'$ 。

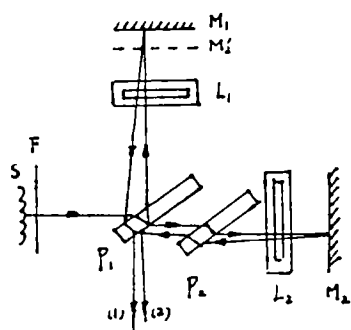
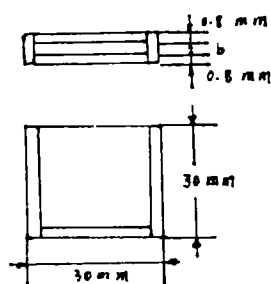
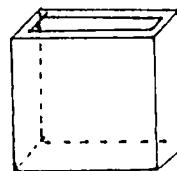


图 1



(a)



(b)

图 2

2. 实验原理

以白光为光源, 当用白炽灯照射迈克尔逊干涉仪时, 由于白炽灯的灯光包含各种波长, 其相干长度仅为波长的数量级。只有在 M_1 和 M_2' 相交, 且使光束 (1) 和光束 (2) 的光程相等, 才能出现白光干涉条纹, 其条纹是等厚干涉条纹, 一般只看到十几条, 中心有二、三条反衬度较大的黑白条纹, 而两侧是彩色的直条纹, 中心条纹为零级条纹, 与 M_1 和 M_2' 的交线对应。因此, 利用白光干涉条纹的出现, 来确定迈克尔逊干涉仪两臂“等光程点”的位置。实验中, 缓慢移动 M_1 镜位置, 使白光干涉条纹的零级条纹出现在视场中央, 并读出 M_1 镜的位置。

将装有待测液体的玻璃槽 L_1 、 L_2 按图 1 的位置插入, 使之占据视场, 被占视场由于 L_1 、 L_2 的插入使得光路 (1) 的光程大于光路 (2) 的光程, 即两臂光程不再相等, 此时白光干涉条纹消灭。

继续移动 M_1 镜, 缩短 M_1P_1 之间的几何距离, 使白炽灯的干涉条纹再次出现在视场中央, 这时光束 (1) 和 (2) 的光程再次相等, 并读出此时 M_1 镜的位置。那么 M_1 镜所移动的距离 Δd 正好等于插入 L_1L_2 使光束 (1) 和 (2) 所产生的光程差的一半。设液体的折射率为 n_x , 则有 (取空气折射率 $n=1$)。

$$2\Delta d = 2(n_x - 1)(b - b') \quad (1)$$

若在移动 M_1 时同时加入钠光灯, 则相应地扫过视场的钠光干涉条纹数为 N , 则有

$$\Delta d = \frac{1}{2}N\lambda \quad (2)$$

那么, 由 (1)、(2) 式可得

$$n_x = \frac{N\lambda}{2(b - b')} + 1 \quad (3)$$

由 (1) 式可得

$$n_x = \frac{\Delta d}{b - b'} + 1 \quad (4)$$

利用 (4) 式可求出待测液体的折射率 n_x 。在迈克尔逊干涉仪的测微螺旋有缺陷的情况下, 也可用 (3) 式求待测液体的折射率 n_x 。此时应将钠光灯迭加在白炽灯下, 在移动 M_1 过程中, 数出扫过视场的钠光干涉条纹数 N 即可。

3. 实验方法和实验结果

3.1 实验方法

首先移动 M_1 镜, 使其处于 $M_1P_1 > M_2'P_1$ 的位置, 用钠光灯作光源, 调节 M_1 、 M_2 , 使 M_1 、 M_2' 间有一微小夹角, 调出定域干涉条纹, 继续调微动手枪, 改变 M_1 位置, 使条纹向略有弯曲的曲率中心方向移动 (即 M_1 向 M_1' 靠近), 这时干涉条纹渐渐变直。如果继续按此方向移动 M_1 镜, 则干涉条纹又向相反方向弯曲, 即单方向移动 M_1 镜时, 条纹

由图 3 (a) 变成图 3 (b), 又变为图 3 (c), 其中图 3 (b) 是等厚干涉条纹。

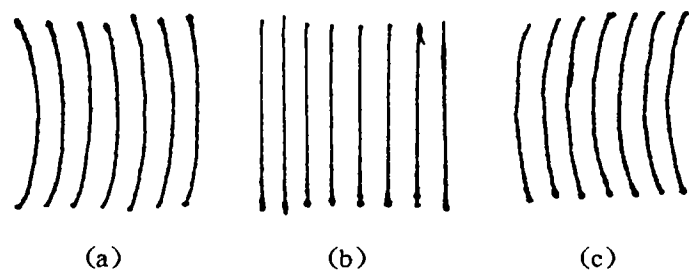


图 3

在钠光照明的基础上, 当出现直条纹时, 将白炽灯迭加在钠光灯上同时照射迈克尔逊干涉仪, 继续缓慢移动 M_1 镜, 直到出现彩色干涉条纹 (即白光干涉条纹), 并使彩色条纹的对称中心 (对应反衬度较大的黑白条纹) 位于视场中心, 记下此时 M_1 镜位置读数 x_1 。

将装有待测液体的玻璃横 L_1 、 L_2 置入光路中, 并使 L_1 、 L_2 分别平行 M_1 和 M_2 。这时由于光路 (1) 的光程大于光路 (2) 光程, 故白光干涉条纹消头。缓慢向原方向移动 M_1 镜, 使白光干涉条纹再次出现在视场中央, 读出 M_1 的位置 x_2 , 则 $\Delta d = |x_2 - x_1|$, 将数据代入 (4) 式可算出待测液体的折射率 n_x 。

由于测量中, 不易判断中心干涉条纹的位置, 致使 M_1 的位置不易读准。为此, 可多次重复上述过程, 求出折射率 n_x 的平均值。

3.2 实验结果

用 WSM-100 型迈克尔逊干涉仪做实验, 测量液体的折射率。以水、乙醇、甲醇作为待测液体, 测得 Δd 分别为: $\Delta d_{\text{水}} = (0.0832 \pm 0.0004) \text{ mm}$; $\Delta d_{\text{乙醇}} = (0.0907 \pm 0.0005) \text{ mm}$, $\Delta d_{\text{甲醇}} = (0.0819 \pm 0.0003) \text{ mm}$, 又用读数显微镜测得 $b - b' = (0.252 \pm 0.003) \text{ mm}$, 根据 (4) 式可得

$$\frac{\delta n_x}{n_x} = \frac{1}{\Delta d + (b - b')} [\delta (\Delta d) + \delta (b - b') \cdot \frac{\Delta d}{b - b'}] \tag{5}$$

物质名称	温度 $^{\circ}\text{C}$	用迈克尔逊干涉仪测得折射率 ($\lambda = 5500 \text{ \AA}$)	一些液体的折射率 ($\lambda_D = 5.893 \times 10^{-7} \text{ m}$)
水	20 $^{\circ}$	1.330 ± 0.006	1.333
乙醇	20 $^{\circ}$	1.360 ± 0.006	1.362
甲醇	20 $^{\circ}\text{C}$	1.325 ± 0.005	1.328

将 $b-b'$ 及各种待测液体的 $\Delta b \Delta d$ 分别代入 (4) 式和 (5) 式, 可得到各种待测液体的折射率如表所示, 并与该物质的标准折射率比较。可见在测量误差范围内, 用迈克尔逊干涉仪测出的折射率具有较高的精度。实验中的误差来源于 $b-b'$ 的测定和白光零级干涉条纹在视场位置的确定。由 (5) 式可见, 适当加大 $b-b'$, 可以减少测量 Δd 和 $b-b'$ 带来的误差, 但 $b-b'$ 太大时, 又会由于介质的色散而影响判断零级干涉条纹的位置。在实验中, 没有插入介质时, 较易确定白光零级干涉条纹位置, 只要将彩色条纹中的中央条纹 (对应二、三条黑白条纹) 调至视场中央即可, 但当插入介质后, 由于介质的色散导致彩色条纹的中央条纹不十分明显, 因此较难准确地判断白光零光程差位置, 以致使测出的 Δd 有较大的误差, 见 Δd 的测量结果。在确定 n_x 对应的波长时, 由于用了白光零光程差干涉条纹在视场的出现来确定 Δd 并求出 n_x , 故粗略认为, 测出的 n_x 是相应于白光的中心波长 ($\lambda=5500\text{\AA}$) 的折射率。这对于测量精度要求不高或作半定量测量时, 所得的 n_x 值在误差范围内仍是具有一定的意义。然而, 在光学测量中, 一般的物质折射率 n 是对黄光 ($5.893 \times 10^{-7}\text{m}$) 而言的, 因此, 当要利用本文的实验装置测出对黄光 ($5.893 \times 10^{-7}\text{m}$) 的折射率时, 可采用类似方法及利用纳光灯的双线特征进行测量, 也可得到精度较高的实验值, 测量原理参见本文 4.5 节中的讨论。

4. 对实验中几个问题的讨论

4.1 在实验中, 只用 L_1 而不用 L_2 , 能否测出液体折射率。如果在光路中, 只插入 L_1 , 则两束光因插入 L_1 而产生的光程差为 $2(2an_0 + bn_x)$, 其中 n_0 为玻璃片的折射率, a 为玻璃片的厚度, n_x 为液体的折射率, 由于玻璃和液体都是有色散作用, 即对不同波长的光来说, 折射率不同, 在可见光范围, 折射率的变化约为 2%, 也就是说, 不同波长的光经过同样的几何路程, 有不同的光程, 而光束 (1) 通过玻璃和液体 (即 L_1), 光束 (2) 则没有, 因此, M_1 镜就不可能找到一个位置, 对于各种波长的光束来说, (1)、(2) 两光束都是等光程, 故当束光相干时, 彩色条纹的反衬度较低, 甚至看不到白光干涉条纹, 只有加了 L_2 作补偿, 才能出现白光干涉的彩色条纹。

4.2 插入 L_1 、 L_2 前, 调整 M_1 镜的位置, 可以得到等原干涉的彩色条纹。加入 L_1 、 L_2 后, 由于光束 (1) 的光程比光束 (2) 的大, 若缩短光束 (1) 的光程, 仍可调出彩色干涉条纹, 但这时的条纹已不再是等厚干涉条纹。分析如下: 当插入 L_1 、 L_2 后, 等厚条件和等光程条件均被破坏, 对观察者来说, M_1M_2 的虚像位置都将发生变化, 都向观察者近了, 如图 4 中 $M_1'M_2''$ 所示, 根据折射率定律, 可计算出 $M_1'M_2''$ 的距离为

$$\Delta x = (b-b') \frac{n_x - 1}{n_x}$$

其中 n_x 为液体的折射率, 由于 $b-b' > 0$, 即 $\Delta x > 0$, 所以 M_1' 与 M_2'' 不相交, 又由于光束 (1) 的光程比光束 (2) 的光程增加了 $2(n-1)(b-b')$, 等光程的破坏导致白光干涉彩色条纹消失。为了恢复白光条纹, 必须缩短 M_1 光路, 使 M_1 向观察者方向移动, 这时 Δx 更加增大。由此可见, 这时白光干涉条纹不再是等厚直条纹, 一般是弯曲的彩色条

纹,适当调节 M_1 镜的角度,可调出等倾干涉的同心圆条纹。

4.3 在制作 L 时,应选用表面光滑的优质玻璃片,厚度不宜太厚,约为 $0.6\text{mm} \sim 0.8\text{mm}$,槽内 b 的厚度约为 $0.8 \sim 1.0\text{mm}$, $b-b'$ 不宜太小,太小了会因 $\Delta d = (n_x - 1)(b - b')$ 过小而引入较大的误差,但也不能过大,过大会由于液体的色散而导致彩色条纹模糊不清,甚至看不见彩色干涉条纹。 $b-b' \approx$ 或 $\leq 0.1 - 0.2\text{mm}$ 时实验效果较理想。

4.4 插入 L_1 、 L_2 时可用橡皮泥作固定,且 L_1 、 L_2 要分别与 M_1 、 M_2 保持平行。

4.5 上述测液体折射率方法是利用了白光的亮光谱来辨认迈克尔逊干涉仪光程差为零的干涉条纹,来确定插入 L_1 、 L_2 后所增加的光程,从而算出液体的折射率。那么如不用白灯作光源,只用钠光灯作光源能否在迈克尔逊干涉仪上测出液体的折射率呢?一般地说,若只用钠光灯作光源,当插入 L_1 、 L_2 后,干涉条纹的移动是个突变过程,因此无法确定由于光程变化所引起干涉条纹移动的数目。但若利用钠光灯双线的特征,仍是可以利用迈克尔逊干涉仪测出液体的折射率,只要先调节 M_1 镜位置,使干涉条纹的视见度为零,然后再按图 1 插入 L_1 、 L_2 ,由于 L_1 、 L_2 的插入增加了两束光的光程差为 $2(n_x - 1)(b - b')$,使视场视见度不再为零。当移动 M_1 镜的距离 Δd (由迈克尔逊干涉仪上测出),并使 $\Delta d = (n_x - 1)(b - b')$,此时视场见度又恢复到零。利用上式可计算出液体的折射率 n_0 。

采用在光路中插入 L_1 、 L_2 的方法,可以在普通物理实验室对液体的折射率进行测量。用类似的方法,将透明体制成薄片插入光路中,也可以测量固体的折射率。由于测试的薄片较薄,故只要将薄片插入其中某一光路即可,无需加补偿片。本实验方法简单,结果精度高,可作为普通物理实验的一个补充实验。

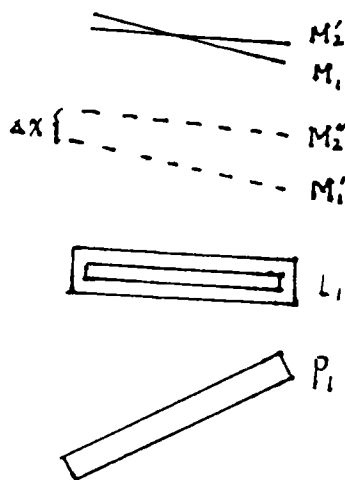


图 4

参考文献

- 1 赫克特等, 光学, 高等教育出版社 1976
- 2 林杼, 普通物理实验, 人民教育出版社
- 3 母国光, 光学, 高等教育出版社