

实验 41 迈克耳孙干涉仪的使用

1881 年迈克耳孙 (Michelson, A. A. 1852-1931) 制成可以测定微小长度、折射率和光波波长的第一台干涉仪。后来,他又用干涉仪做了 3 个闻名于世的重要实验:迈克耳孙—莫雷 (Morley, E. W. 1838-1923) “以太” 漂移实验, 实验结果否定了“以太”的存在, 解决了当时关于“以太”的争论, 并确定光速为定值, 为爱因斯坦 (Einstein, A. 1879-1955) 发现相对论提供了实验依据; 迈克耳孙与莫雷最早用干涉仪观察到氢原子光谱中巴耳末系的第一线为双线结构, 并以此推断光谱线的精细结构; 迈克耳孙首次用干涉仪测得镉红线波长 ($\lambda = 643.84696\text{nm}$), 并用此波长测定了标准米的长度 ($1\text{m} = 1553164.13$ 镉红线波长)。此外, 迈克耳孙干涉仪在近代物理和近代计量技术中起了重要作用, 利用相干光在干涉仪上分成两支的特点, 可以在一支光路中加入待研究的物质。例如, 加入气体盒来测定气体折射率。现代, 迈克耳孙干涉仪也用于傅里叶变换光谱研究。今天迈克耳孙干涉仪已被更完善的现代干涉仪取代, 但它的基本结构仍然是许多现代干涉仪的基础。我国第一台教学用迈克耳孙干涉仪是天津大学物理系研制的。

【预习重点】

- (1) 迈克耳孙干涉仪的构造原理和调节使用方法。
- (2) 薄膜的等倾干涉和等厚干涉。
- (3) 改变光程差的大小对等倾干涉的影响。

【实验目的】

- (1) 了解迈克耳孙干涉仪的结构, 并掌握其调节方法。
- (2) 了解干涉仪的应用, 会使用干涉仪进行相关测量。

【实验仪器】

迈克耳孙干涉仪、低压钠灯、白炽灯、带“T”标志的毛玻璃片。

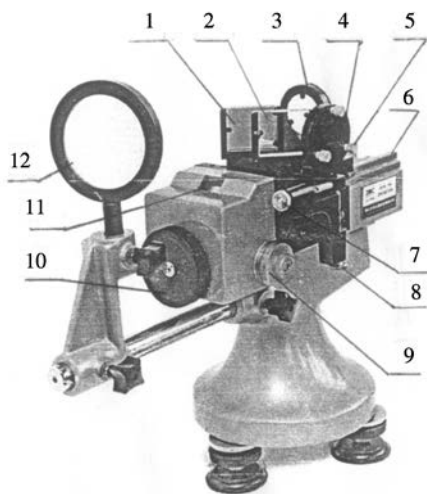


图 41-1 迈克耳孙干涉仪

1-分束器 G_1 ; 2-补偿板 G_2 ; 3-可动反射镜 M_1 ; 4-固定反射镜 M_2 ; 5-反射镜调节螺丝; 6-导轨; 7-水平拉簧螺丝; 8-垂直拉簧螺丝; 9-微调手轮; 10-粗调手轮; 11-读数窗口; 12-光屏

迈克耳孙干涉仪是根据分振幅干涉原理制成的精密实验仪器,主要由4个高品质的光学镜片和一套精密的机械传动系统装在底座上组成(图41-1)。其中作为分束器的 G_1 是一面镀有半透膜的平行平面玻璃板,与相互垂直的 M_1 和 M_2 两个反射镜各成 45° 角,它使到达镀膜处的光束一半反射一半透射,分为两个支路I和II(图41-2所示),又分别被 M_1 和 M_2 反射返回分束器会合,射向观察位置E。补偿板 G_2 平行于 G_1 ,是一块与 G_1 的厚度和折射率都相同的平行平面玻璃。它用来补偿光束II在分束器玻璃中少走的光程,使两光路上任何波长的光都有相同的光程差,于是白光也能产生干涉。 M_2 是固定的, M_1 装在拖板上。转动粗调手轮,通过精密丝杠可以带动拖板沿导轨前后移动,导轨的侧面有毫米直尺。传动系统罩读数窗口内的圆分度盘每转动1格, M_1 镜移动 0.01mm ,右侧的微调手轮每转动1个分格, M_1 镜只移动 10^{-4}mm ,估计到 10^{-5}mm 。 M_1 和 M_2 的背后各有3个调节螺丝,可以调节镜面的法线方位。 M_2 镜水平和垂直的拉簧螺丝用于镜面方位的微调。

【实验原理】

1) 等倾干涉环的产生和单色光波长的测量

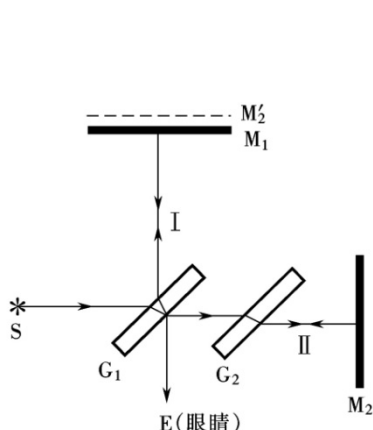


图 41-2 迈克耳孙干涉仪光路

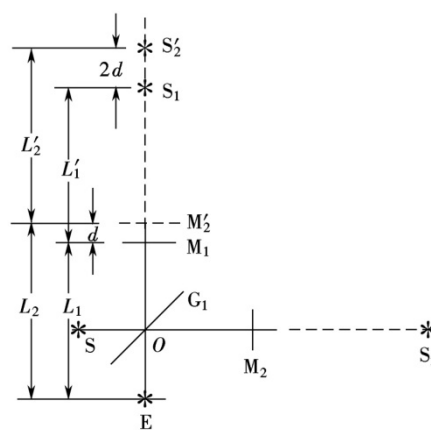


图 41-3 干涉仪光路中的相干虚光源

在图 41-2 的迈克耳孙干涉仪光路中,当 M_1 和 M_2 两镜面相互垂直时,眼睛在E处观察到的反射镜 M_2 的虚像 M_2' 是平行于 M_1 的一个对应平面;而光源S的虚像 S_1 和 S_2' ,则可视作两个相干的虚光源(参见图 41-3),其中 S_1 由 G_1 和 M_1 反射得来,而 S_2' 由 G_1 和 M_2' (等效于 M_2)反射得来。若 M_1 与 M_2' 相距为 d ,则 S_1 与 S_2' 相距为 $2d$ 。因此,眼睛在E处观察到的干涉现象,如同来自 S_1 和 S_2' 两个虚光源的相干光波叠加产生的干涉图样。就扩展光源(例如被钠灯照亮的毛玻璃面 Σ ,图 41-4)而言,发光面上某点S以 i 角入射的光,相当于虚面光源上对应点 S_1 和 S_2' 以 i 角发来二平行光束的叠加,其光程差

$$\delta = 2d \cos i \quad (41-1)$$

表明当 d 一定时,所有倾角相同的光束具相同的光程差,会聚到透镜焦平面处的干涉加强与减弱的情况也相同,所以叫做“等倾干涉”。相同倾角的光束会聚于焦平面以光轴为中心的圆周上,所以干涉条纹为一系列明暗相间的同心圆环。圆心处所对应的入射角 $i = 0$,两相干光束光程差最大($\delta = 2d$),对应的干涉级最高,从圆心向外级次逐环降低(与牛顿环相反)。

当移动平面镜 M_1 的位置,使 M_1 与 M_2' 的距离逐渐增大时,干涉环会一个一个“冒”出来;反之,当 d 减小时,干涉环会一个个向中心“缩”进去。每“冒”出或“缩”进一个干涉环,

相应光程差改变了一个波长，也就是 M_1 镜与 M_2' 间的距离变化了半个波长。若观察到 ΔN 个干涉环的变化，则距离 d 的变化量

$$\Delta d = \frac{\Delta N \lambda}{2} \quad (41-2)$$

因而

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta N} \quad (41-3)$$

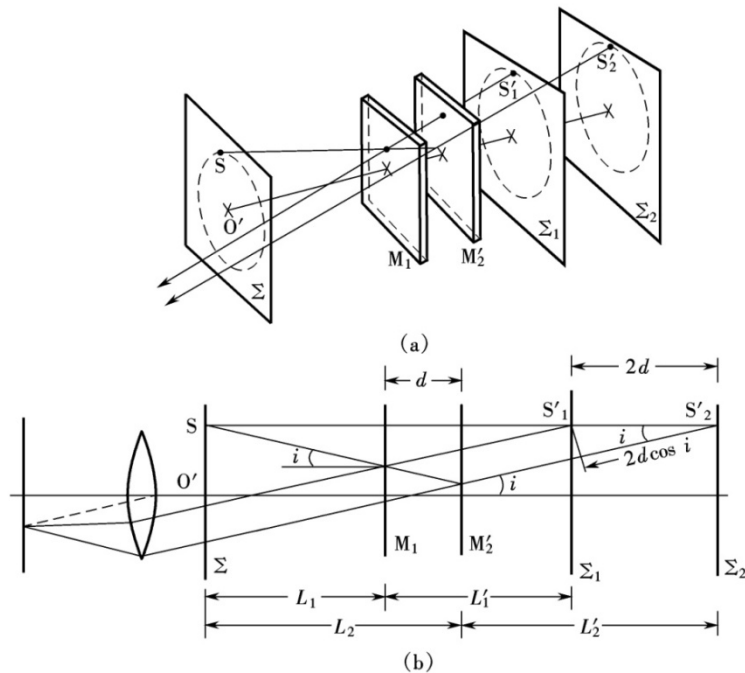


图 41-4 等倾干涉条纹的产生

实际观察干涉条纹时，若以人的眼睛取代图 41-4 中的凸透镜，就能够直接看到干涉环，这时环心总是在眼睛的光轴上，因而随眼睛的移动而移动。

2) 等厚干涉条纹和白光干涉条纹

当 M_1 与 M_2' 相距很近时，把 M_2 镜稍许调斜， M_1 与 M_2' 间形成的劈形膜在扩展光源照射下（因 i 很小视为垂直入射），可形成定位于镜面附近的等厚干涉条纹。由式（41-1）

$$\delta = 2d \cos i = 2d \left(1 - 2 \sin^2 \frac{i}{2} \right) \approx 2d \left(1 - \frac{1}{2} i^2 \right) = 2d - di^2 \quad (41-4)$$

若 M_1 与 M_2' 相交，交线上 $d = 0$ ，所以 $\delta = 0$ 。因光束 II 被 G_1 反射时有相位变化，所以在交线处产生较暗的直条纹，即中央条纹。在交线两侧附近，因 d 很小，而 i 也很小，故式中的 di^2 项可忽略，于是有

$$\delta = 2d \quad (41-5)$$

所以，产生的近似直条纹与中央条纹平行。离交线较远处因 di^2 项的影响增大，条纹发生弯曲，凸向中央条纹。

由于干涉条纹的明暗取决于光程差 δ 与光源波长 λ 之间的关系，故若用白光光源，各种波长的光产生的干涉条纹明暗互相重叠。各色光在中央暗条纹两侧展开，产生多种混合色，

组成彩色条纹，而在较高的干涉级，几乎每一点都有各种颜色的光出现，基本上合成白色，所以白光干涉条纹每侧只见不多几条。

【实验内容及要求】

1) 观察等倾干涉条纹

- (1) 点亮带有毛玻璃窗的钠灯，使毛玻璃片与干涉仪的分束器等高，并正对反射镜 M_2 。
- (2) 检查固定镜 M_2 后的3个调节螺钉以及两个微调拉簧螺钉，使其松紧适中，留有双向调节余量。
- (3) 调节粗调手轮，使两个反射镜与分束器的距离大致相等。这时视场上将出现经 M_1 镜和 M_2 镜反射的两组毛玻璃上的“T”字影像，调节固定镜 M_2 后的调节螺钉，使视场中的两组“T”字像重合，直至视场中出现干涉条纹。若条纹很模糊，或看不到干涉条纹，可转动粗调手轮约半周，再重新调节两“T”字像重合。（实验室已将动镜 M_1 的法线方向与它沿导轨的移动方向调节一致，所以动镜 M_1 后的螺钉不许动了。）调出干涉条纹后，再用两个拉簧螺钉仔细地调节 M_2 镜的方位，把干涉条纹调成环形，环的中心调至视场中央。直到眼睛上下、左右移动时，环心处条纹明暗无明显变化，此时 M_2' 与 M_1 即达到完全平行。

2) 测量钠黄光的波长

- (1) 旋转微调手轮，观察干涉环的“冒”或“缩”现象，直至出现清晰的干涉环。调节微调手轮零点。
- (2) 轻轻旋转微动手轮（沿同一方向旋转，勿回调，可消除空回误差的影响），每冒出（或缩进）20个环读一次 M_1 镜的位置。记录12次，自行设计表格，要求用逐差法计算 Δd ，根据式（41-3）计算钠黄光的波长，并计算不确定度。

3) 观察等厚和白光干涉条纹

慢慢转动粗调手轮，使圆条纹逐渐缩入圆心。直到视场内条纹极少，即 M_1 与 M_2' 已十分靠近时，调节 M_2 镜的拉簧螺丝，使二者竖直相交，转动粗调手轮，使弯曲条纹向圆心方向移动，即逐渐出现直条纹，就是等厚条纹。然后用白炽灯照明毛玻璃，继续缓慢地转动微调手轮，即可见彩色条纹出现。此时挡住钠光，容易辨认中央条纹。描述干涉条纹的形状和颜色分布特点。

【拓展与设计】

用迈克耳孙干涉仪测一厚度已知的薄片玻璃的折射率，先推导实验公式，再进行测量。