

实验 6-5 迈克耳孙干涉仪

1883 年, 美籍德国物理学家迈克耳孙 (Albert A. Michelson, 1852-1931) 为了研究地球对于“以太”的相对运动而设计制造了一台双光束分振幅干涉实验装置, 他用这台装置与莫雷 (Moley) 合作进行了举世闻名的迈克耳孙-莫雷实验, 该实验得到的地球上“以太风”为零的结果在物理学发展史上有十分重要的意义。后来, 他又用该装置做了许多光的干涉实验, 如首次系统地研究了光谱线的精细结构, 直接用光的波长对米原器进行了比较等。由于这些贡献, 迈克耳孙于 1907 年获得诺贝尔物理学奖。后人称该装置为迈克耳孙干涉仪, 并在此基础上发展出在当今物理学、化学、生物学、医学都有许多重要应用的现代干涉仪器, 如激光比长仪、傅里叶变换光谱仪等。本实验要求学生了解迈克耳孙干涉仪的原理、结构及调节方法, 并在此基础上, 研究定域干涉、非定域干涉、等倾干涉、等厚干涉及光源的时间相干性、空间相干性等重要问题。由于本实验包含极为丰富的实验思想, 其实验操作技巧又无一不与物理原理紧密联系, 故实验前必须认真阅读实验原理和有关参考书, 复习关于光的干涉的许多基本概念。

实验原理

迈克耳孙干涉仪主要由两个相互垂直的全反射镜 M_1 、 M_2 和一个 45° 放置的半反射镜 M 组成。不同的光源会形成不同的干涉情况。

1. 当光源为单色点光源时, 它发出的光被 M 分为光强大致相同的两束光(1)和(2), 如图 1 所示。其中光束(1)相当于从虚象 S' 发出, 再经 M_1 反射, 成象于 S'_1 ; 光束(2) 相当于从虚象 S' 发出, 再经 M_2 反射成象于 S'_2 (M_2 是 M_2 关于 M 所成的象)。因此, 单色点光源经过迈克耳孙干涉仪中两反射镜的反射光, 可看作是从 S'_1 和 S'_2 发出的两束相干光。在观察屏上, S'_1 与 S'_2 的连线所通过点 P_0 的程差为 $2d$, 而在观察屏上其它点 P 的程差约为 $2d\cos i$ (其中 d 是 M_1 与 M_2 的距离, i 是光线对 M_1 或 M_2 的入射角)。因而干涉条纹是以 P_0 为圆心的一组同心圆, 中心级次高, 周围级次低。若 M_1 与 M_2 的夹角偏离 90° , 则干涉条纹的圆心可偏出观察屏以外, 在屏上看到弧状条纹; 若偏离更大而 d 又很小, S'_1 与 S'_2 的连线几乎与观察屏平行, 则相当于杨氏双孔干涉, 条纹近似为直线。无论干涉条纹形状如何, 只要观察屏在 S'_1 与 S'_2 发出的两束光的交叠区, 都可看到干涉条纹, 所以这种干涉称为“非定域干涉”。

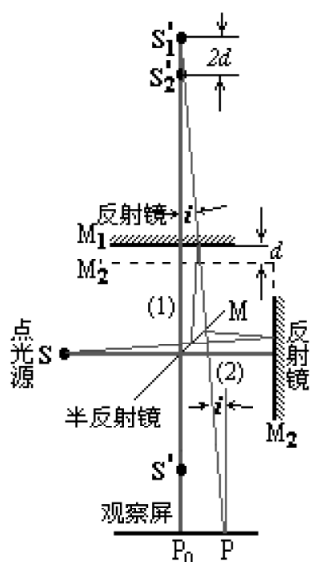
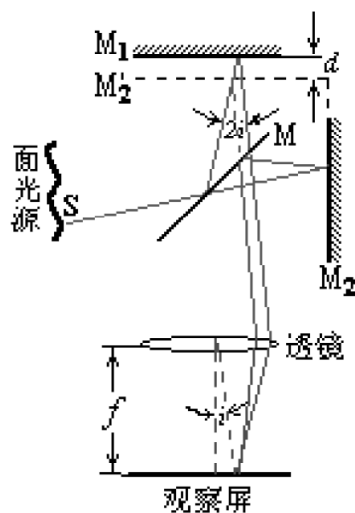
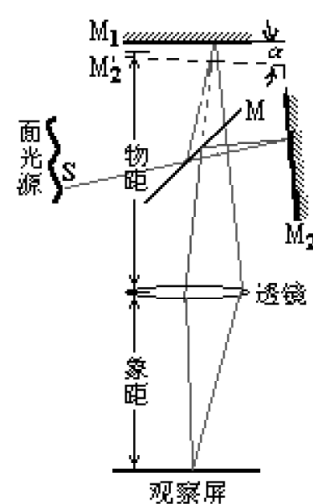


图 1 点光源的非定域干涉



a: 定域在无限远



b: 定域在 M_1 附近

2. 如果改用单色面光源照明, 情况就不同了, 如图 2 所示。由于面光源上不同点所发的光是不相干的, 若把面光源看成许多点光源的集合, 则这些点光源所分别形成的干涉条纹位置不同, 它们相互叠加而最终变成模糊一片, 因而在一般情况下将看不到干涉条纹。只有以下两种情况是例外: ① M_1 与 M_2 严格垂直, 即 M_1 与 M_2 严格平行, 而把观察屏放在透镜的焦平面上, 如图 2(a) 所示。此时, 从面光源上任一点 S 发出的光经 M_1 和 M_2 反射后形成的两束相干光是平行的, 它们在观

察屏上相遇的光程差均为 $2d\cos i$ ，因而可看到清晰而明亮的圆形干涉条纹。由于 d 是恒定的，干涉条纹是倾角 i 为常数的轨迹，故称为“等倾干涉条纹”。② M_1 与 M_2 并不严格垂直，即 M_1 与 M_2 有一个小夹角 α 。可以证明（见参考材料 1），此时从面光源上任一点 S 发出的光经 M_1 和 M_2 反射后形成的两束相干光相交于 M_1 或 M_2 的附近。因此，若把观察屏放在 M_1 或 M_2 对于透镜所成的象平面附近，如图 2(b) 所示，就可以看到面光源干涉所形成的条纹。如果夹角 α 较大而 i 角变化不大，则条纹基本上是厚度 d 为常数的轨迹，因而称为“等厚干涉条纹”。显然，这两种情况都只在透镜的焦平面或象平面上才能看到清晰的条纹，因而是“定域干涉”。

3. 如果用非单色的白光为光源，情况更不相同。无论是点光源或面光源，要看到干涉条纹，必须满足光程差小于光源的相干长度的要求，即 $2d\cos i < \Delta L$ 。对于具有连续光谱的白光， ΔL 极小，因而仅当 $d \approx 0$ 时，才能看到彩色的干涉条纹。这虽然为观察白光条纹带来了困难，却为正确判断 $d=0$ 的位置提供了一种很好的实验手段。

实验装置

实际的迈克耳孙干涉仪如图 3 所示。反射镜 M_1 装在带有一条刻度线的滑块上，滑块通过精密丝杆可在一根导轨上滑动，导轨上有 $0 \sim 100\text{mm}$ 的刻度。旋转粗调手轮，可使 M_1 在导轨上前后移动，手轮与一个大刻度盘连接，刻度盘的刻度可从观察窗读出。粗调手轮的右边还有一个微调轮，上有小刻度盘。大、小刻度盘上均有 100 个刻度，大盘的一格对应于 M_1 移动 0.01mm ；小盘的一格对应于 M_1 移动 0.0001mm 。反射镜 M_2 的前后位置不可移动。它的背面有三个滚花螺丝，用来调节它的方向（粗调）；它的下面还有两个微调螺丝，分别可在 X 方向或 Y 方向进行微调。反射镜 M_1 的背面虽然也有三个滚花螺丝，但已调好（与 M 成 45° 角，与它在精密丝杆上的运动方向垂直），实验中不要动它们。观察屏是一块毛玻璃，可前后移动，也可取下。整个干涉仪安装在底座上，有三个底座螺

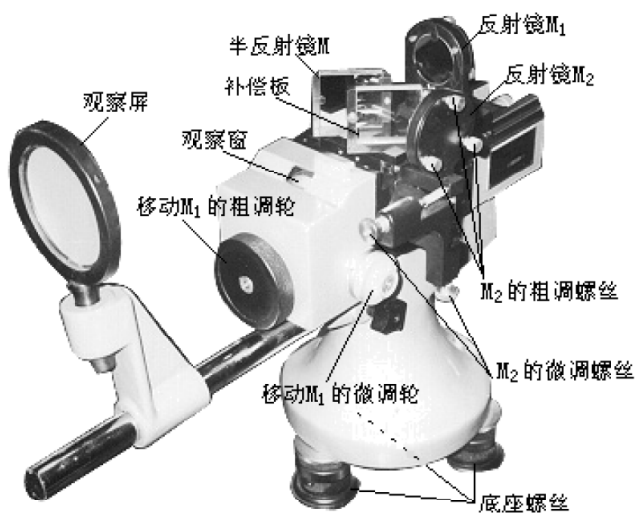


图 3 迈克耳孙干涉仪

丝，可调节它的水平位置。

为了保证 M 是一个平整的半反射镜而不变形，它常用较厚的玻璃板镀半反膜制成，如图 4 中 G_1 所示。这使光束(1)与光束(2)明显的不对称：光束(1)经过该玻璃板三次而光束(2)只经过一次；并且光束(1)与光束(2)中，上下偏离中心 i 角与左右偏离中心 i 角的光束经过玻璃板的光程差也是不同的。这就使 M_1 与 M_2 平行时等 i 角光束的光程差不相等，因而看到的条纹将不是圆形的而可能是椭圆形的；更严重的是由于玻璃的色散，各种波长的光通过玻璃板所经历的光程相差甚远，因而白光的干涉条纹无法形成。为了解决这一问题，迈克耳孙在半反镜的右侧加了一块与半反镜玻璃板完全相同且平行放置的玻璃板 G_2 ，称为“补偿板”，如图 4 所示。它补偿了(1)、(2)两光束在玻璃板中经历的光程差，从而使半反镜玻璃板的影响得以消除。

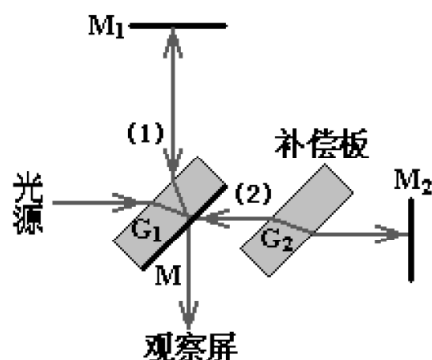


图 4 迈克耳孙干涉仪中的补偿板

实验内容

1. 必做部分：观察与分析 He-Ne 激光的非定域干涉现象，测量该激光的波长。

- 1) 调节 He-Ne 激光器和迈克耳孙干涉仪的相对位置，使光束分别大致照在 M_1 和 M_2 的中央；调节激光器下的螺丝或干涉仪的底座螺丝（但不要调节 M_1 背面的螺丝），使从 M_1 反射的光点返回激光出射处，此时 M_1 与它的入射光大致垂直（为什么？）。从 M_1 反射的光点有三点，应使其中最亮的一点返回激光出射处（为什么？）。

- 2) 调节 M_2 后的三个螺丝, 使 M_2 反射的光点也返回激光出射处。(也有三点, 应使其中最亮的一点返回。) 此时 M_2 也与它的入射光大致垂直, 并与 M_1 大致垂直(为什么?)。在观察屏处观察, 两个最亮的光斑应相互重合。为了看清是否重合, 可把观察屏移远些, 甚至取下观察屏让光束照在墙壁上。
- 3) 在激光器前放一个短焦距透镜, 使光束扩大而能大致照亮整个反射镜。于是在观察屏上应可看到干涉条纹, 记下干涉条纹的形状及条纹宽度等大致情况。
- 4) 前后改变观察屏的位置, 观察条纹是否都清晰? 由此推断该条纹是否定域。
- 5) 继续调节 M_2 的方向并前后改变 M_1 的位置, 使干涉条纹成为圆形。观察并记录圆条纹是如何随 M_1 的位置而变化的? 分析其变化的原因, 并由此推论是 M_1 在前还是 M_2 在前(以离观察者近为前、远为后)? 在条纹长出的方向移动 M_1 约 $4\sim 5\text{mm}$, (注意勿使 M_1 的位置超过它的可移动范围) 观察并记录条纹宽度有何变化? 试解释这种变化。
- 6) 在视场中有若干个圆条纹的情况下, 微调 M_1 , 使条纹陷入或长出 $m=20\sim 50$ 条, 记下 M_1 移动的距离 Δd , 由 $2\Delta d=m\lambda$ 估算出激光的波长。(注意: 微调轮有相当大的螺距误差, 要注意消除。)
- 7) 向圆条纹陷入的方向调节 M_1 , (粗调) 直至圆条纹逐渐变为直条纹, 并开始向反方向弯曲。记下条纹既宽又直时 M_1 的位置 M_{10} 的大致范围, 此时应对应于 S_1 与 S_2 连线与观察屏大致平行, 或 $d\approx 0$ 。(为什么?)

2. 选做部分一: 观察与分析汞灯的定域干涉现象, 测量汞绿光的波长并估测其相干长度。

- 1) 让 M_1 位于 M_{10} 附近, 以低压汞灯加毛玻璃作为光源(即在低压汞灯前放上述实验中的观察屏, 以代替激光器和透镜, 并使它们靠近干涉仪)。
- 2) 在原放观察屏的位置用肉眼直接观察, 应可看到干涉条纹。(仍用观察屏能看到吗? 为什么?) 把干涉条纹调宽, 可看到有黄、绿、蓝、紫等各种颜色。(这说明什么?)
- 3) 在眼前加一块绿玻璃(绿色滤光片), 在视场中有若干个圆条纹的情况下, 上下左右移动你的眼睛, 观察条纹是否有陷入或长出的现象? 这说明什么? 仔细微调 M_2 , 能否在眼睛移动时让各圆环的大小基本不变? 如能做到, 可微调 M_1 , 使条纹陷入或长出 $20\sim 50$ 条, 记下 M_1 移动的距离, 并由此估算出汞灯绿光的波长。
- 4) 让 M_1 与 M_{10} 的距离增加到 $3\sim 5\text{mm}$, 请患有近视眼的同学取下眼镜, 再仔细观察圆条纹是否仍清晰? 改变 M_2 的方向使条纹变为直条纹, 看看直条纹是否清晰?(改变 M_1 的位置, 让直条纹的宽度与圆条纹的宽度大致相同时比较其清晰程度。) 想想为什么? 能否由此推测条纹是否定域? 定域在何处?(眼睛正常的同学, 可戴上一付远视眼镜或用一个凸透镜, 使自己只能看清近处而不能看清远处, 来做此实验。)
- 5) 让 M_1 继续远离 M_{10} , 用正常的视力观察圆条纹或直条纹的清晰程度, 找到干涉条纹基本消失时 M_1 的位置, 由此估测汞绿光的相干长度 ΔL 和它的谱线宽度 $\Delta\lambda=\lambda^2/\Delta L$ 。(请自行导出此公式。)

3. 选做部分二: 测量钠灯中两黄光谱线的波长差

- 1) 令 M_1 回到 M_{10} 附近, 以钠灯加毛玻璃作为光源, 应可看到黄色干涉条纹。
- 2) 按上述方法测出钠黄光的波长 λ 。
- 3) 同一方向移动 M_1 , 可观察到干涉条纹从清晰变模糊又变清晰再变模糊的周期性过程(为什么?), 测量其周期 Δd 。
- 4) 求出钠灯中两黄光谱线的波长差 $\Delta\lambda=\lambda^2/(2\Delta d)$ 。(请自行导出此公式。)

4. 选做部分三: 观察与分析白光干涉现象

- 1) 令 M_1 回到 M_{10} 附近, 把干涉条纹大致调节成直条纹, 条纹间距约 2mm 。
- 2) 以白炽灯加毛玻璃作为光源, 在测出的 M_{10} 范围内极其缓慢地移动 M_1 , 耐心而仔细地寻找出现干涉条纹的位置, 这就是 $d=0$ 的位置(为什么?)。
- 3) 发现干涉条纹后, 微调 M_2 , 使条纹宽度适中, 记下条纹的形状和色彩分布情况。(色彩是否对称? 是否有白色或黑色的条纹? 为什么?)

注意: 实验结束后, 应把 M_2 的各调节螺丝都放松, 以免弹簧长期形变, 失去弹性。

思考题:

1. 为什么从 M_1 和 M_2 返回激光出射处的反射光都有三个光点? 试画出光路图。若半反射镜玻璃的折射率为 1.52, 未镀增透膜, 请粗略估算三个光点的光强比。
2. 如果没有激光, 如何直接用汞灯调出干涉条纹?(即如何使 M_1 与 M_2 接近并大致平行?), 可一

试。

3. 用白光可调出圆条纹吗？可一试。
4. 定域干涉与非定域干涉的形成条件是什么？请设计一个观察激光定域干涉的实验装置，如有条件，可一试。在此实验中，你能较精确地测定干涉条纹究竟定域在何处吗？
5. 等倾条纹与等厚条纹的形成条件是什么？牛顿圈是等倾条纹还是等厚条纹？本实验中你观察到严格的等倾条纹或严格的等厚条纹了吗？请设计一个观察激光等厚干涉的实验装置，如有条件，可一试。
6. 试比较汞灯产生的彩色条纹与白光产生的彩色条纹的区别，并解释之。
7. 能否用迈克耳孙干涉仪测量钠灯黄双线的波长差（此波长差约 0.6nm）？能否用迈克耳孙干涉仪测量玻璃片的折射率？如能，对此玻璃片有何要求？请设计相应的实验装置。如有条件，可一试。

参考材料

1. 章志鸣，沈元华，陈惠芬. 光学（第二版）. 北京：高等教育出版社. 2000，111~113
2. 杨之昌，马秀芳. 物理光学实验. 上海：复旦大学出版社. 1993，8~26
3. 张建卫，蒋玉龙，马秀芳，刘磊，沈元华. 迈克耳孙干涉仪中补偿板对单色光作用的研究. 光学仪器. 1998, 20(2): 24~29
4. 郑仁寿. 迈克耳孙干涉仪干涉条纹的数学表达式. 物理实验. 2000, 20(3): 44~46
5. 栾兰，闪辉，马秀芳，沈元华. 迈克耳孙干涉仪测平行玻片折射率实验的进一步研究. 大学物理. 2000，19(11): 20~23