

实验 34* 牛顿环

牛顿在光学领域做出的一项重要发现是“牛顿环”。他在深入研究胡克对肥皂泡薄膜色彩问题的研究后，提出了这一概念。在光学上，牛顿环是一种薄膜干涉现象。尽管牛顿发现了牛顿环并进行了精确的定量测定，可以说已经接近光的波动说的边缘，但由于过分倾向于他的微粒说，他始终无法正确解释这个现象。实际上，这个实验可以成为光的波动说的有力证据之一。

【实验目的】

- 1、掌握牛顿环的调节方法。
- 2、理解等厚干涉。

【实验仪器】

牛顿环仪、读数显微镜、平板玻璃、钠光灯等。

【实验原理】

当垂直单色光照射厚度不均匀的空气薄层时，从空气薄层上下两个表面反射的光束在空气薄层表面附近相遇产生干涉，空气薄层厚度相等处形成相同的干涉条纹，这种干涉现象称为等厚干涉。牛顿环是一种常见的等厚干涉装置。

如图 5.34.1(a)所示，当一块曲率半径 R 很大的平凸透镜放置在一块平面玻璃板上时，就构成了牛顿环仪。在牛顿环仪中，透镜凸面与平面玻璃板之间形成一层以接触点为中心、向四周逐渐增厚的空气薄层。当以平行的单色光垂直照射牛顿环仪时，薄层的上下表面形成的两束反射光将发生干涉（光程差即为该处

空气薄层厚度的两倍) . 形成的干涉条纹是以接触点为中心的明暗相间、内疏外密的同心圆环, 称为牛顿环, 如图 5.34.1(b)所示.

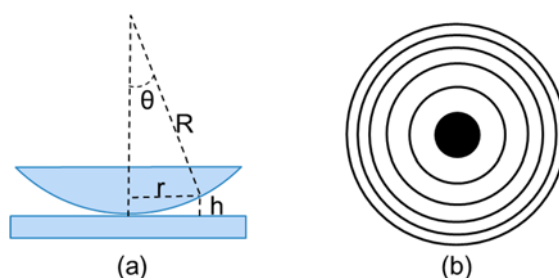


图 5.34.1 牛顿环示意图

由 5.34.1(a)可知, 空气薄层的厚度:

$$h=R-(R^2-r^2)^{1/2}\approx r^2/2R \quad (1)$$

在空气薄层上下表面反射的光所产生的光程差为:

$$\Delta = 2h+\lambda/2 \quad (2)$$

式中附加光程差 $\lambda/2$ 是光从光疏媒质(空气)到光密媒质(平面玻璃板)反射时产生的半波损失(λ 是入射单色光的波长) . 实验时常用暗环作为测量对象 (为什么?), 反射光干涉形成暗环的条件为:

$$\Delta=(2k+1)\lambda/2 \quad (k=0,1,2,3\dots) \quad (3)$$

由(2)和(3) 式可得 k 级暗环处空气厚度满足的条件为:

$$2h=k\lambda \quad (4)$$

由式(1)和(4)可得 k 级暗环的半径为:

$$r_k=(kR\lambda)^{1/2} \quad (5)$$

在平凸透镜与平面玻璃板接触点处, 理论上 h 的值应该为 0, 即暗斑. 然而在实际操作中, 由于牛顿环压紧程度不同, 会导致玻璃形变或镜面上可能存在微小灰尘, 以及平面玻璃板本身存在缺陷等原因, 这些都可能导致干涉环的中心不是 0 级暗斑, 因此很难确定干涉环的级次 k . 为了减小测量误差, 在实验中通常不测量 k 级暗环的半径, 而是测量距中心较远的两个暗环的直径 d_m 和 d_n .

由式(5)可得 k 级暗环的直径为: $d_k=(4kR\lambda)^{1/2}$, 进而推出

$$d_m^2 - d_n^2 = 4(m-n)R\lambda \quad (6)$$

如果光源波长已知, 由式 (6) 可求出平凸透镜的曲率半径:

$$R = (d_m^2 - d_n^2) / 4(m-n)\lambda \quad (7)$$

由于在实验中牛顿环的中心较难确定, 要准确测出直径是困难的. 但根据平面几何的勾股定理可以证明:

$$(A'A)^2 - (B'B)^2 = (C'C)^2 - (D'D)^2 \quad (8)$$

即测量弦长和直径是一样的, 测量线可以不经过干涉环的中心 (见图 5.34.2) .

(但测量时显微镜内十字准线的竖线要垂直读数尺, 如何达到此要求?)

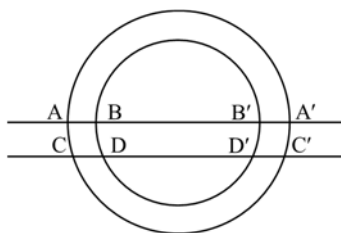


图 5.34.2 测量线示意图

【实验内容】

1. 将牛顿环调好.
2. 观察并记录牛顿环的各条暗环, 计算曲率半径.

【实验步骤与数据记录】

1. 牛顿环的调节

(1) 如图 5.34.3 所示, 本实验采用钠光灯 S 作为单色光源, 需将其放置于显微镜的正前方. 在实验前, 钠光灯需要预热约 5 分钟. 一旦正常工作, 钠光灯发出的光会照射到读数显微镜镜筒 M 上的 45° 半反射镜 F 上. 通过左右旋转半反镜 F , 可以使显微镜中的光场最亮, 并且有一部分反射光会近乎垂

直地射入牛顿环仪 N 中.

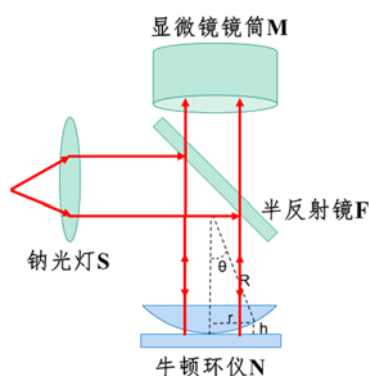


图 5.34.3 牛顿环光路示意图

(2) 首先, 将读数显微镜的镜筒置于刻度尺的中央位置, 并确保垂直对准 N 的中心. 接着, 调节目镜, 使十字准线变得清晰. 然后, 上下调节镜筒, 直到可以看到清晰的牛顿环. 接下来, 转动读数显微镜的读数鼓轮, 将镜筒左右移动, 使得十字准线交点大致通过牛顿环的中心. 请注意, 十字准线的竖线应与镜筒移动方向垂直.

2. 曲率半径的测量及计算

(1) 先转动读数鼓轮, 将十字准线移至 22 环, 然后再回到 20 环进行读数. 接着, 从左 20 环开始, 沿一个方向依次测量到右侧 20 环, 或者反过来. 在测量过程中, 需要注意将十字准线对准牛顿环各条暗环的中央, 即暗环最暗处, 并且要消除读数显微镜的视差和螺距误差. 请勿在测量过程中反转方向.

(2) 用逐差法计算直径平方差 Δd^2 的平均值代入公式(7), 求出 R.

【注意事项】

1. 在关掉钠光灯后, 若要重新开启必须间隔 5 min 以上.
2. 调节显微镜上下位置时, 一定要从下往上调, 以免损坏玻璃片、物镜和

待测物.

3. 牛顿环仪上的三个螺丝不要旋得过紧, 以防发生形变.
4. 测量过程中测微鼓轮不许倒转, 以消除螺距差.

【思考题】

1. 若所看到的牛顿环内凹或外凸, 这说明了什么?
2. 若圆环中心是亮斑而不是暗斑, 产生的原因是什么? 对测量结果有无影响?
3. 为什么牛顿环的干涉条纹是内疏外密的?

【物理史话】



托马斯·杨 (Thomas Young, 1773 年-1829 年) 英国医生、物理学家, 光的波动说的奠基人之一.

1801 年他进行了著名的杨氏双缝实验, 发现了光的干涉性质, 证明光以波动形式存在, 该实验被

评为“物理最美实验”之一. 19 世纪初, 英国科学家托马斯·杨用光的波动说圆满地解释了牛顿环实验. 二十世纪初物理学家将杨的双缝实验结果和爱因斯坦的光量子假说结合起来, 提出了光的波粒二象性, 后来又被德布罗意利用量子力学引申到所有粒子上.

实验 35* 迈克尔逊干涉实验

迈克尔逊干涉仪是由美国物理学家迈克尔逊和莫雷于 1883 年合作设计制造的一种精密光学仪器, 旨在研究“以太”漂移现象. 该仪器采用分振幅法产生双光

束进行干涉，设计巧妙，具有丰富的实验思想，对物理学发展具有重大的历史意义。利用该仪器原理，研制出了多种专用干涉仪，在光谱线精细结构的研究和用光波标定标准米尺等实验中都有着重要的应用。本实验要求学生了解迈克尔逊干涉仪的基本结构，掌握调节技巧，通过等倾条纹的变化测量激光波长。

【实验目的】

- 1、掌握迈克尔逊干涉仪的调节方法。
- 2、学会用迈克尔逊干涉仪测定激光波长。

【实验仪器】

He-Ne 激光源、迈克尔逊干涉仪（图 5.35.1，1:主尺；2:反射镜调节螺丝；3:移动反射镜 M1；4:分光板 G1；5:补偿板 G2；6:固定反射镜 M2；7:读数窗；8:水平拉簧螺钉；9 :粗调手轮；10.屏；11.底座水平调节螺丝）。

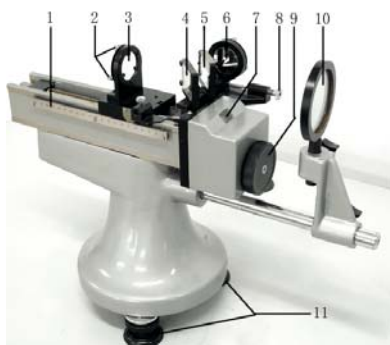


图 5.35.1 迈克尔逊干涉仪的结构图

【实验原理】

1. 迈克尔逊干涉仪的光路

图 5.35.2 中, M_1 和 M_2 是两个平面反射镜, 分别放置在相互垂直的两个臂上. 其中 M_2 是固定的, 而 M_1 则由精密丝杆控制, 可以前后移动. 移动的距离可以通过刻度尺和刻度转盘读出, 这两个刻度盘由粗读和细读两组组合而成. 在两臂轴线相交处, 有一块与两轴成 45° 角的平行平面玻璃板 G_1 . 它的后表面上镀有半反射膜 (一般镀银), 以便将一束垂直的入射光分成两束振幅接近相等的反射光①和透射光②. 因此, G_1 也被称为分光板. G_2 也是平行平面玻璃板, 与 G_1 平行放置. 它的厚度和折射率均与 G_1 相同. 由于 G_2 补偿了光线①和②因穿越 G_1 次数不同而产生的光程差, 所以被称为补偿板. 如果没有 G_2 , ①光需要穿过 G_1 三次, 而②光只需要穿过 G_1 一次, 这样两束光线在 E 处会存在较大的光程差. 加上 G_2 后, ②光往返穿过 G_2 板两次, 从而使得②光与①光在玻璃介质中的光程相同.

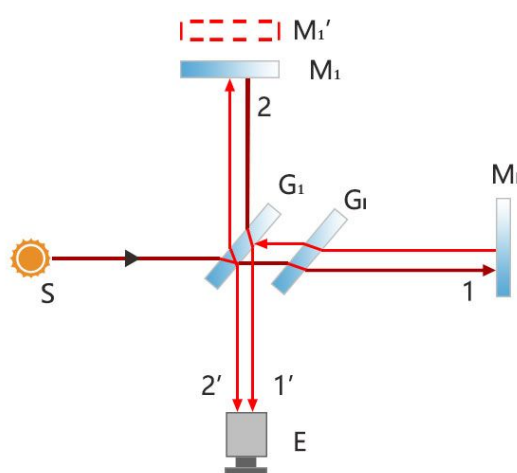


图 5.35.2 迈克尔逊干涉仪的光路示意图

2. 面光源产生的干涉条纹

从面光源 S 射来的光经过迈克尔逊干涉仪的 G_1 处时, 会分成反射光和透射光. 反射光①经过 G_1 反射后, 向着 M_1 前进; 透射光②则穿过 G_2 , 向着 M_2 前进. 这两束光分别在 M_1 和 M_2 上反射后, 逆着各自的入射方向返回, 最终汇

聚在 P 处. 由于这两束光是相干光, 因此在 P 处的观察者就能够看到干涉条纹.

当观察者从 P 处向 G1 看去时, 除了直接看到 M1 外, 还能看到 M2 在 G1 中的虚像 M'2. 因此, ①光和②光就好像是从 M1 和 M'2 反射回来的两束光. 因此, 迈克尔逊干涉仪中的干涉现象与厚度为 d 的空气膜产生的干涉现象相同, 其中 d 为 M1 和 M'2 虚像之间的间隔.

3. 等倾干涉条纹

当 M1 和 M'2 平行时(此时 M1 和 M2 严格互相垂直), 将观察到环形的等倾干涉条纹.

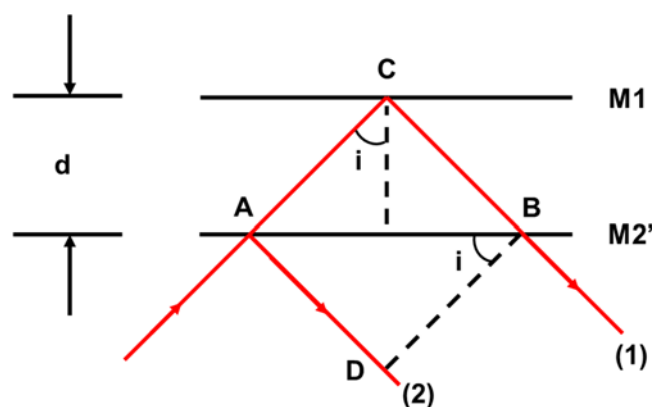


图 5.35.3 等倾干涉光路图

由 M2 和 M1 反射的两束光到 P 处的光程差为 (见图 5.35.3)

$$\Delta = AC + CB - AD$$

由于 $AC = CB = d / \cos i$, $AD = AB \sin i = 2 d \tan i \sin i$

$$\text{所以} \quad \Delta = 2 d \cos i \quad (1)$$

其中 i 为反射光 (1) 在平面镜 M1 上的入射角.

根据光的干涉加强和减弱的条件

$$2 d \cos i_k = k\lambda \text{ 时, 为干涉明条纹} \quad (2)$$

$$2 d \cos i_k = (2k+1) \lambda / 2 \text{ 时, 为干涉暗条纹}$$

在上述公式中, $k=0,1,2,\dots$ 表示干涉级次. 当 d、 λ 固定时, 干涉级次 k 会随着

倾角 i 的变化而改变. 由于所有具有相同倾角的光线的光程差都相同, 因此它们对应于同一干涉级次 k , 这种干涉被称为等倾干涉. 干涉图案是以光轴为中心的同心圆环, 中心的干涉级次最高, 向外干涉级次逐渐降低.

当 k 、 λ 固定时, 如果缩小 d , 则必须减小倾角 i , 因此干涉圆环会缩小并逐渐消失, 条纹变得更宽、间隔更大. 当 $d=0$ (即 $M1$ 与 $M'2$ 重合) 时, 整个视场都是均匀的, 看不到干涉圆环. 当 d 增加时, 必须增加倾角 i , 因此干涉条纹会向外扩展, 中心会不断涌出新的圆环, 条纹变得更细、间隔更小. 每当 $M1$ 和 $M'2$ 的间距 d 变化 $\lambda/2$ 时, 就会涌现 (或消失) 一个条纹.

因此, 当 $M1$ 移动时, 如果有 N 个条纹陷入中心, 则表示 $M1$ 相对于 $M'2$ 向前移动了

$$\Delta d = N\lambda/2 \quad (3)$$

反之, 若有 N 个条纹从中心涌出来时, 则表明 $M1$ 相对于 $M'2$ 移远了同样的距离. 如果精确地测出 $M1$ 移动的距离 Δd , 则可由式(3)计算出入射光波的波长.

4. 等厚干涉条纹

如果 $M1$ 和 $M2$ 不垂直, 而 $M1$ 和 $M'2$ 之间有微小夹角, 就会形成一个空气楔形 (如图 5.35.4 所示), 从而能够观察到近似平行的直线干涉条纹, 即等厚干涉条纹. 在远离中央条纹的位置, 这些条纹会发生弯曲, 向中央条纹凸出.

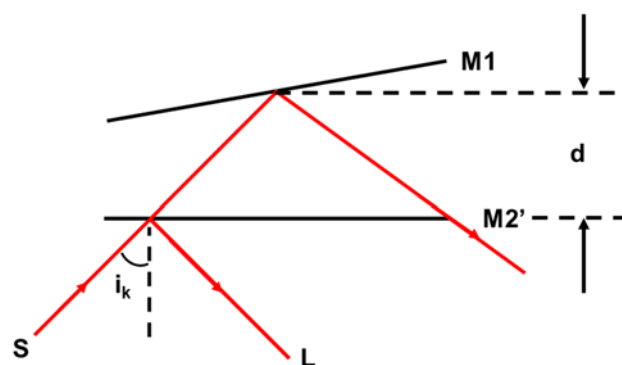


图 5.35.4 等厚干涉光路图

【实验内容】

1. 将迈克尔逊干涉仪调好.
2. 观察并记录干涉中心周期变化对应的反射镜位置变化, 计算激光波长.

【实验步骤与数据记录】

1. 点光源非定域干涉现象观察

调整激光器, 使其位于分光板和 M2 镜的中心线上且高度相等. 转动粗调手轮, 使 M2 与 M1 镜距离分光板 G1 的中心大致相等. 在光源和分光板 G1 之间插入毛玻璃, 透过 G1 直视 M1 镜, 可以看到两排光点. 仔细调节 M2 镜后面的三个调节螺丝, 使两排光点重合. 当两排光点完全重合时, 去掉毛玻璃, 插上观察屏, 就会看到明暗相间的干涉圆环.

如果干涉环模糊, 可以轻轻转动粗调手轮, 改变 M1 镜的位置, 干涉环就会出现. 再仔细调节 M2 镜的两个拉簧螺丝, 将干涉环中心调到视场中央. 只有当干涉环中心随观察者的眼睛左右、上下移动而移动, 但干涉环的大小不变, 圆心没有“涌出”或“陷入”的现象时, 观察到的干涉条纹才是严格的等倾干涉条纹.

2. 激光波长的测定

通过转动手轮, 将干涉中心调至最暗或最亮, 记录下反射镜 M1 的位置. 之后, 每转动 100 个单位记录一个读数, 共记录 10 个数. 在记录时要注意消除螺距差 (即空程差). 采用逐差法, 根据式 (3) 计算 He-Ne 激光器的波长, 并将结果与标准值 (632.8 nm) 进行比较, 求出相对误差.

3. 观察等厚干涉

在等倾干涉的基础上，移动 M1 镜，使干涉环由细密变粗疏，直到整个视场条纹变成等轴双曲线形状时，说明 M1 与 M'2 接近重合。细心调节水平和垂直拉簧螺丝，使 M1 与 M'2 有一很小夹角，视场中便出现等厚干涉条纹。观察和记录条纹的形状和特点。

【注意事项】

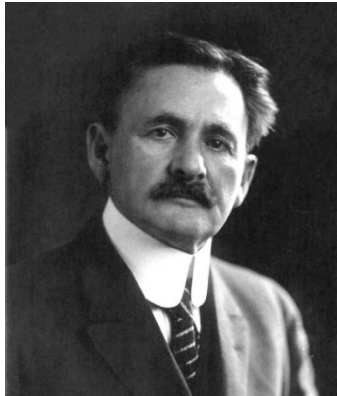
1. 迈克尔逊干涉仪系精密光学仪器，使用时动作要轻、要缓，尽量使身体部位离开实验台面，以防震动。严禁手摸光学元件的光学表面，不要对着仪器说话、咳嗽等。
2. 激光束光强极高，切勿用眼睛直接观看。
3. 仪器零点的调整方法：将微调手轮沿某一方向(如顺时针方向)旋至零，再沿同一方向转动粗调手轮，让读数窗口基准线对准任一刻度，然后旋转微调手轮一周，检查读数窗中的刻度，如刚好转动一格就已调好。
4. 空程差消除方法：测量时，微调鼓轮只向一个方向转，中途不倒退。
5. 切记不要调节分光板 G1、补偿板 G2 和动镜 M1 后面的螺丝。
6. M2 镜后的调节螺丝不要旋得过紧，以防镜片受压变形或损坏螺丝。仪器不用时，M2 的两个拉簧调节螺丝要旋至放松状态，即不要把拉簧拉长。

【思考题】

1. 调节迈克尔逊干涉仪时看到的亮点为什么是两排而不是两个？两排亮点是怎样形成的？
2. 实验中毛玻璃起什么作用？为什么观察钠光等倾干涉条纹时要用通过毛玻璃的光束照明？

3. 等倾干涉环里边的级次高还是低？为什么牛顿环中心的条纹级次最小？
4. 用迈克尔逊干涉仪观察干涉现象时， M_1 与 M_2 的距离 d 有无限制？

【物理史话】



阿尔伯特·亚伯拉罕·迈克尔逊 (Albert Abraham Michelson, 1852 年 12 月 19 日-1931 年 5 月 9 日), 美国物理学家. 迈克尔逊主要从事光学和光谱学方面的研究, 他以毕生精力从事光速的精密测量, 在他的有生之年, 一直是光速测定的国际中心人物. 他发明了一种用以测定微小长度、折射率和光波波长的干涉仪 (迈克尔逊干涉仪), 在研究光谱线方面起着重要的作用. 因发明精密光学仪器和借助这些仪器在光谱学和度量学的研究工作中所做出的贡献, 被授予了 1907 年度诺贝尔物理学奖.