

实验 法布里-珀罗干涉仪

法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot interferometry, 简称 F-P 干涉仪) 是一种应用多光束干涉原理制成的高分辨率光谱仪器。它具有很高的分辨本领和集光本领, 因此, 常用于分析光谱的超精细结构, 研究光的塞曼效应 (Zeeman effect) 和物质的受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering), 光波波长和波长差的精确测定, 以及激光选模等工作。

【实验目的】

- (1) 了解 F-P 干涉仪的结构、原理及基本特性;
- (2) 学习 F-P 干涉仪的调节方法和技术;
- (3) 利用 F-P 干涉仪进行光学测量。

【实验器材】

F-P 干涉仪、钠光灯、高压汞灯、准直透镜、消色差透镜、干涉滤光片 (绿色, 波长 546.1nm)、读数显微镜、望远镜、F-P 标准具等。

【实验原理】

1. 仪器的基本结构及工作原理

F-P 干涉仪 主要由平行放置的两块平面玻璃板构成 (图 1), 两块玻璃板 G_1 、 G_2 相对的内表面具有极高的平行度 (一般要求表面上各处距理想平面的误差不得超过 $\lambda/40$), 两内表面上各自镀有反射率很高的金属膜层或多介质膜。为了避开 G_1 、 G_2 的未镀膜外表面上反射光产生的干扰, 两块板都做成稍微有点楔形 (楔角一般约为 $5' \sim 30'$)。使用时可利用每块板外套压圈上的三个螺钉 (图中未画出), 将两块板相对的内表面调成相互平行, 在两内表面间形成一平行平面空气层。如果两板内表面的间距是固定的, 则称为 **F-P 标准具**; 若 G_1 、 G_2 的间距可变, 则称为 F-P 干涉仪。

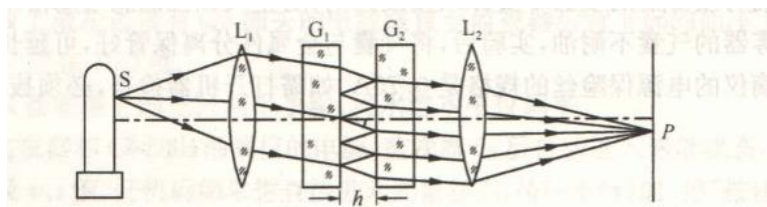


图 1 F-P 干涉仪原理图

本实验的 F-P 干涉仪由迈克耳孙干涉仪改装而成, 如图 2 所示。 G_2 位置固定, G_1 位置可动 (转动粗调或微调手轮, 可使 G_1 沿精密导轨前后移动), 以改变 G_1 、 G_2 内表面的间距。 G_2 右侧还有两个微调螺丝, 以微调 G_2 的方位。

如图 1 所示, 单色的扩展光源位于透镜 L_1 的物方焦平面上, 光源上某点 S 发出的光经 L_1 后成为平行光以小角度入射到板上, 在两块镀膜平面间来回多次反射和透射, 分别形成一系列反射光束 (图中未画出) 及透射光束, 这一系列相互平行并有一定光程差的透射光束经透镜 L_2 会聚, 在 L_2 的像方焦平面上发生多光束干涉。

在透射的诸光束中, 相邻两光束的光程差为

$$\Delta = 2nh \cos i' \quad (1)$$

相应的相位差为

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nh \cos i' \quad (2)$$

式中, h 为 G_1 、 G_2 镀层平面的间距, n 为两镀层平面间物质的折射率 (一般为空气, $n=1$), i' 为在两镀层平面间反射光与平面法线的夹角。

当相邻两光束的光程差为波长的整数倍

$$\Delta = 2nh \cos i' = k\lambda \quad (3)$$

时产生干涉极大值 (亮纹), 这些条纹的形状与迈克耳孙干涉仪产生的等倾干涉条纹相似, 也是同心圆环, 每个亮纹各对应一定的倾角 i' 。但由于迈克耳孙干涉仪是两光束干涉, 而 F-P 干涉仪是多光束干涉, 所以后者的亮纹较前者细锐。条纹细锐的程度常用半值角宽度来衡量。第 k 级亮纹的半值角宽度为

$$\Delta i_k = \frac{\lambda}{2\pi n h \sin i_k} \cdot \frac{1-R}{\sqrt{R}} \quad (4)$$

式中, R 为两板内表面反射膜的反射率。由 (4) 式可见, 反射率 R 越接近于 1, 两板内表面间距 h 越大, Δi_k 就越小, 亮纹就越细锐。

2. F-P 干涉仪的基本特性

(1) 角色散率

$$D_\lambda = \frac{di'}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda \tan i'} \quad (5)$$

表示单位波长差的两谱线分开的角距离。

(2) 色分辨本领

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2\pi h \sqrt{R}}{\lambda(1-R)} \quad (6)$$

$\Delta\lambda$ 是两个刚刚能被分开的细圆条纹的波长差, 常称 $\Delta\lambda$ 为该仪器可分辨的最小波长差。

(3) 自由光谱范围

$$\Delta\lambda_f = \frac{\lambda^2}{2nh} \quad (7)$$

表示入射光的波长在 λ_0 到 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 范围内, 所产生的干涉圆环不发生越级重叠时, 所允许的最大波长范围。自由光谱范围 $\Delta\lambda_f$ 是 F-P 干涉仪的重要参量, 使用时应先估计光源的单色性是否在仪器的自由光谱范围之内。

F-P 干涉仪 G_1 、 G_2 镀层的反射率 R 很高, 亮纹非常细锐, 而且当 G_1 、 G_2 间距 h 较大时, 角色散大, 分辨本领高。但自由光谱区 $\Delta\lambda_f$ 小, 表明 F-P 干涉仪的研究对象只能在很窄的光谱范围内, 此时应采用滤光器或其它分光仪器作为前置滤波, 以便把分离出来的较窄波段的光投射到 F-P 干涉仪上。

3. 用 F-P 干涉仪测量光波波长 (或波长差)

若待测光源中包含有两个波长十分接近的光谱成分, 其值分别为 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$, 且 $\Delta\lambda \leq \Delta\lambda_f$, 则处与 F-P 干涉仪的自由光谱范围内。用焦距为 f 的消色差透镜 (实验中为照相机镜头), 将 F-P 干涉仪的干涉条纹成像 L_2 的后焦面上 (如图 1 所示), 获得一组同心圆环, 每个亮环对应一定的倾角 i' , 干涉亮环的直径 D 和倾角 i' 有如下关系:

$$\cos i' = \frac{f}{\sqrt{f^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \approx 1 - \frac{D^2}{8f^2} \quad (8)$$

将 (8) 式代入 (3) 式, 当 $n=1$ 时, 可得

$$k\lambda = 2h\left(1 - \frac{D^2}{8f^2}\right) \quad (9)$$

令 D_k 、 D_{k-1} 表示对应于波长为 λ 的第 k 级和 $k-1$ 级的环直径, 由上式得 $k\lambda = 2h\left(1 - \frac{D_k^2}{8f^2}\right)$ 和

$$(k-1)\lambda = 2h\left(1 - \frac{D_{k-1}^2}{8f^2}\right), \text{ 两式相减得}$$

$$\lambda = \frac{h(D_{k-1}^2 - D_k^2)}{4f^2} \quad (10)$$

因此, 若 F-P 干涉仪的间距 h 和透镜焦距 f 已知, 则只要测得该波长相邻级次两干涉圆环的直径平方差 $D_{k-1}^2 - D_k^2$ 即可求得波长 λ 。

若令 D_n 和 D_n' 表示对应于波长为 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 的同一级 (级数为 k_n) 干涉环的直径, 由

$$(9) \text{ 式可得 } \lambda = \frac{2h}{k_n}\left(1 - \frac{D_n^2}{8f^2}\right) \text{ 和 } \lambda + \Delta\lambda = \frac{2h}{k_n}\left(1 - \frac{D_n'^2}{8f^2}\right), \text{ 两式相减得}$$

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{k_n}\left(\frac{D_n^2 - D_n'^2}{8f^2}\right) \quad (11)$$

在我们的实验条件下, k_n 是一个很大的数, 且测量时只测中心附近若干环的直径, 故 k_n 变化不大, 可近似用中心亮环的级数代替, 故有 $2h = k_n\lambda$, 将其代入 (11) 式, 得

$$\Delta\lambda = \lambda\left(\frac{D_n^2 - D_n'^2}{8f^2}\right) \quad (12)$$

若 F-P 间隔 h 已知, 则将 (10) 式代入 (12) 式得

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2h}\left(\frac{D_n^2 - D_n'^2}{D_{k-1}^2 - D_k^2}\right) \quad (13)$$

式中, $(D_n^2 - D_n'^2)$ 为不同波长但同一干涉级次所对应的干涉环的直径平方差, $(D_{k-1}^2 - D_k^2)$ 是同一波长相邻两级次干涉圆环的直径平方差。

【实验内容】

1. 调节 F-P 干涉仪获得等倾干涉条纹

以钠光灯扩展光源照明 F-P 干涉仪, 取 G_1 、 G_2 两内表面间距 h 约为 5mm。在 G_1 前立一小针, 用眼睛接受透射光, 通过 F-P 观察小针近 F-P 多次反射后形成的一系列像。仔细调节 G_1 、 G_2 外套压圈上的 6 个螺钉, 使所有针像完全重合, 这时可看到干涉条纹 (大多数情

况下为弧形的等厚干涉条纹),再慢慢调节6个螺钉,使之变为同心圆环的等倾条纹。之后,再仔细调节 G_2 右侧的两个微调螺丝,使干涉环呈圆形且清晰,直到眼睛上下,左右移动时各圆的大小基本不变,且圆环整体随眼移动。

再在钠光灯和干涉仪间加入透镜 L_1 ,使灯大致位于 L_1 的焦面上,将小针移出光路,用望远镜观察等倾干涉条纹,调节 G_2 的两个微调螺丝,在望远镜中看到清晰的干涉圆环。

2. 观察钠黄光双线的精细结构并测量钠黄光的波长差

(1) 仍用钠光灯作光源,首先观察干涉亮环的细锐程度,将观察到的干涉图样与迈克耳孙干涉仪等倾干涉条纹进行比较,分析条纹细锐度与什么因素有关。

(2) 再仔细看,是否有两套同心亮圆环?说明钠黄双线是否被分开?然后顺时针缓慢移动粗调手轮,改变 G_1 、 G_2 的间距,观察两套同心亮环间相对移动的情况,试加以解释。

提示:当 $k_1\lambda_1 = (k_2 + 1/2)\lambda_2$ 时,一套圆环位于另一套圆环的中间位置;而当 $k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2$ 时,只有一套同心圆环。

(3) 顺时针缓慢移动粗调手轮,改变 G_1 、 G_2 的间距,观察干涉条纹的间距、条纹的细锐度与 h 的关系。

(4) 根据由第(2)所观察到的现象,设计一种测量钠黄双线波长差的方法,然后测量出结果,并与迈克尔逊干涉仪测量钠黄双线波长差的方法进行分析比较。

3. 用 F-P 干涉仪测量光波波长

自行设计实验方案,用 F-P 干涉仪测定汞灯加滤光片(546.1nm)后的光波波长。实验提供高压汞灯、钠光灯、干涉滤光片(546.1nm)、消色差透镜、读数显微镜。

4. 测量 F-P 标准具的间距 h (选做)

实验室有一旧标准具,其标签上的参量 $R=80\%$,而 h 已模糊不清,请设计一实验方案,测量次标准具的间距 h ,实验室提供钠光灯、消色差透镜、读数显微镜。

【习题】

(1) 为什么 F-P 干涉仪的分辨本领和测量精度比迈克耳孙干涉仪的高?

(2) F-P 干涉仪中,设反射率 $R=80\%$,当 G_1 、 G_2 的间距 $h=2\text{mm}$ 时,试估算钠黄双线能否被分开。若能分开,那么被分开的钠黄双线的两套亮环发生越级重叠了吗?