

综合物理实验辅助材料

实验二 迈克耳逊干涉仪与光学相关测量

迈克耳逊干涉仪是由美国物理学家 Albert A. Michelson 发明的一种光学干涉仪器。利用这种干涉仪器，迈克耳逊与莫雷合作完成了著名的迈克耳逊-莫雷实验，否定了当时盛行的以太理论，并启动了一系列的研究，最终导致了爱因斯坦的狭义相对论。

迈克耳逊干涉仪的基本原理就是利用分光镜将一束入射光波分成透射和反射的两束光波，然后利用两个平面镜的反射，使得这两束光波再回到分光镜上，并且使得再次经过分光镜透射和反射的光波相遇。由于相遇的两束光波是由入射光波通过分振幅产生，两者之间存在着一定的相位关系，这种相位关系可以由相遇时形成的干涉光强信息呈现出来。基于这样的原理，迈克耳逊干涉仪被发展成多种实验检测技术和仪器设备。例如，类似于当年的迈克耳逊-莫雷实验，用于引力波检测的 LIGO 大科学装置实际上就是一个巨大无比的迈克耳逊干涉仪，检测的是时空介质的改变；超短光脉冲的自相关测量技术和傅里叶变换光谱仪在原理上就是通过精确控制迈克耳逊干涉仪的一个平面镜移动来实现对入射光波本身的测量；光学相干断层成像术则在原理上是将迈克耳逊干涉仪的一个平面镜换成生物样品来实现对生物样品的三维成像。迈克耳逊干涉仪诸多的重大应用在于它所实现的分振幅干涉实际上进行的是两束光波的相关运算，光波本身的性质和介质的影响隐含在相关运算的结果中，即干涉光强的分布和变化中。深刻理解这种相关运算所包含的物理意义非常重要。

针对上述的应用背景，本实验扩展了常规教学的迈克耳逊干涉仪，不但可以方便地实现基本的定域和非定域干涉，还可以在实验技术和方法上探讨一些特殊的科技应用，从而达到加深对迈克耳逊干涉仪原理及其光学相关测量的理解。

（一）实验装置

实验装置如图 1 所示，可以分成光源模块、迈克耳逊干涉模块、数据采集模块和连接光路等四个部分。

光源模块包含有激光器、卤素灯和高压汞灯等三个光源。其中，激光器发射的光束作为很好的准直光线，用来进行实验装置的调整。若将激光扩束物镜置入光路，则可获得激光点光源，再置入准直透镜，可以调出大截面的平行激光束，射入干涉仪。卤素灯和高压汞灯发出的光分别耦合进一段光纤中，光纤的出光端口很小，射出的光可近似看成点光源。将光纤出光端口置入光路，获得准白光点光源，再置入准直透镜，可以调出准平行白光，射入干涉仪。

迈克耳逊干涉模块的结构和调节方法如同一台实验教学型的迈克耳逊干涉仪，特殊的必要改进是为了提高机械结构的精度和调节上的可靠性。除了 M_1 和 M_2 两个平面镜的精确调节外， M_1 镜子的定向平稳移动至关重要。另外，为了尽量减小外界振动对光路的影响，主体光路安排在一个主动减振型的小平台上，而整个实验装置安置在一个被动减振的大光学平台上。改进后实验装置不仅保留了原有干涉仪的基本结构和调节方法，可以进行常规的非定域与定域干涉观测，更重要的是要通过分振幅干涉方便地进行光波的相关测量。

在图 1 所示的光路中，如果通过调节使得激光或白光的点源处在准直透镜的焦点上，那么就可以用平行光波射入干涉仪。如果调节好干涉仪使得两个平面镜相互垂直并且与分光镜或补偿镜成 45°角，那么，垂直入射在两个平面镜上的平面光波经反射后完全重合，形成一个均匀的叠加光场，其光强随着 M_1 镜子的移动而改变。

数据采集模块由光探测器+计算机组成。计算机通过控制步进电机来驱动 M_1 镜子精确移动，并通过光探测器采集随 M_1 镜子移动而改变的干涉光场强度。

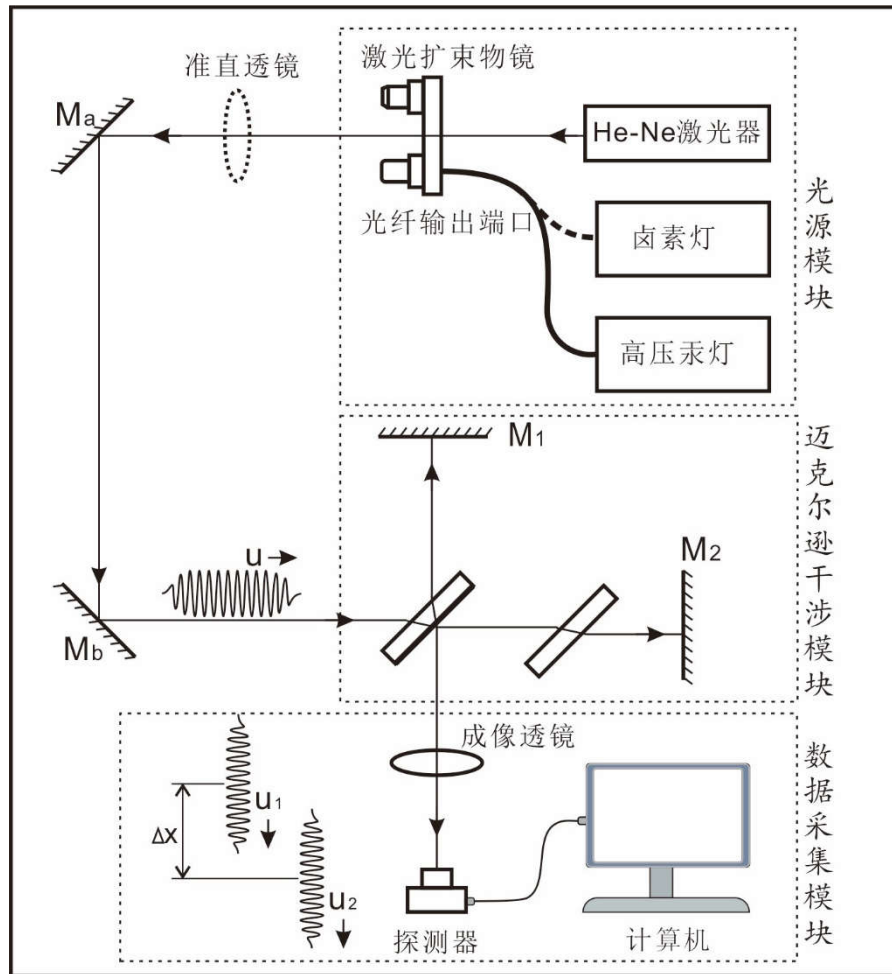


图 1、实验装置示意图

相关运算在数学上定义为两个函数的积分运算，比如 $u_1(x)$ 与 $u_2(x)$ 的相关运算表示为

$$u_1(x) \star u_2^*(x) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(t) u_2^*(t - x) dt$$

其结果仍然是一个函数， $u(x) = u_1(x) \star u_2^*(x)$ 。如果这两个函数均可傅里叶展开，即

$$u_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G_1(k) e^{ikx} dk, \quad u_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G_2(k) e^{ikx} dk,$$

其中略去了无关紧要的常熟。这样，两个函数的相关运算就可以表述为

$$\begin{aligned}
 u_1(x) \star u_2^*(x) &= \iiint_{-\infty}^{\infty} G_1(k) G_2^*(k') e^{i(k-k')t - 2\pi i k' x} dt dk dk' \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} G_1(k) G_2^*(k) e^{-ikx} dk, \quad \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

其中利用了 $\int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k-k')t} dt \approx \delta(k-k')$ 。另外, 如果两个函数相同, 即 $u_1(x) = u_2(x) = u(x)$, 则有

$$u(x) \star u^*(x) = \int_{-\infty}^{\infty} |G(k)|^2 e^{-ikx} dk. \quad \dots\dots\dots (2)$$

迈克尔逊的分振幅干涉可以用来进行**光学相关运算**, 其最简洁的方式就是将待测光波调整成平行光, 并使其按图 1 所示的方式入射迈克尔逊干涉仪。设入射的平面光波 $u(x, t)$ 为一个无色散波包, 且可以表示为

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{i(kx - \omega t)} dk$$

其中 $k = 2\pi\nu$ 且 $\nu = 1/\lambda$ 为波数, λ 为波长。按 1:1 的分光比分振幅后得到 $u_1(x)$ 和 $u_2(x)$, 则 $|u_1(x)| = |u_2(x)| = |u(x)|/2$ 。 $u_1(x)$ 和 $u_2(x)$ 经历不同路径后相遇时, 传播方向相同, 但有光程差 Δx , 叠加的光场为

$$\begin{aligned}
 U(x, \Delta x, t) &= u_1(x, t) + u_2(x + \Delta x, t) \\
 &= \frac{1}{2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{i(kx - \omega t)} dk + \int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{i(kx - \omega t)} e^{ik\Delta x} dk \right).
 \end{aligned}$$

则 t 时刻光强为 $|U(x, \Delta x, t)|^2 = \frac{1}{4} \{ \iint_{-\infty}^{\infty} A(k) A^*(k') e^{i[(k-k')x - (\omega - \omega')t]} dk dk' +$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} A(k) A^*(k') e^{i[(k-k')(x+\Delta x) - (\omega - \omega')t]} dk dk' +$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} A(k) A^*(k') e^{i[(k-k')x - (\omega - \omega')t]} e^{-ik\Delta x} dk dk' +$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} A^*(k) A(k') e^{-i[(k-k')x - (\omega - \omega')t]} e^{ik\Delta x} dk dk' \}.$$

通常所说的光强实际上是瞬时光强在一段时间 T 的平均值, 即 $I(x, \Delta x) = \frac{1}{T} \int_0^T |U(x, \Delta x, t)|^2 dt$ 。

利用 $\frac{1}{T} \int_0^T e^{\pm i k(\omega - \omega')t} dt \approx \delta(\omega - \omega')$ 得到

$$I(\Delta x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |A(k)|^2 dk + \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} |A(k)|^2 e^{-ik\Delta x} dk + \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} |A(k)|^2 e^{ik\Delta x} dk.$$

由 (1) 或 (2) 式可以知道, 上式第二、三项的积分正是入射光稳态波包的自相关函数。由

于 $\overline{I(\Delta x)} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} I(\Delta x) d\Delta x = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |A(k)|^2 dk$, 所以

$$I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)} = \frac{1}{4} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} |A(k)|^2 e^{-ik\Delta x} dk + \int_{-\infty}^{\infty} |A(k)|^2 e^{ik\Delta x} dk \right\}$$

这是相对干涉光强随光程差的变化。两边做傅里叶变换得到

$$\mathcal{F}\{I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)}\} = \frac{1}{4} \{|A(-k)|^2 + |A(k)|^2\},$$

考虑到推导过程中略去的一些常数因子, 上式应表示成

$$\mathcal{F}\{I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)}\} = c_0 \{|A(-k)|^2 + |A(k)|^2\}, \quad \dots\dots\dots (3)$$

其中 c_0 为常数。(3) 式表明, 相对干涉光强函数的傅里叶变与入射光的光谱强度分布之间存在线性关系。这样, 通过测量干涉光强随光程差的变化就可测得入射光波的光谱强度分布函数。

相对干涉光强也可以表示成

$$I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)} = c_0 \int_{-\infty}^{\infty} |A(k)|^2 \cos(k\Delta x) dk, \quad \dots\dots\dots (4)$$

对于特殊的光谱强度分布, 可以得到相对干涉光强变化的一些基本特征, 如下列情形:

- (1) 单谱线光谱, 即 $|A(k)|^2 = \delta(k)$, 则有

$$I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)} = c_0 \cos(k\Delta x)$$

- (2) 双谱线光谱, 即 $|A(k)|^2 = a\delta(k - k_a) + b\delta(k - k_b)$, a, b 和 k_a, k_b 均为常数, 则有 $I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)} = c_0 [a\cos(k_a\Delta x) + b\cos(k_b\Delta x)]$ 。若 $a=b$, 则有

$$I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)} = 2ac_0 \cos\left[\left(\frac{k_a - k_b}{2}\right)\Delta x\right] \cos\left[\left(\frac{k_a + k_b}{2}\right)\Delta x\right]$$

- (3) 连续宽光谱, 即 $|A(k)|^2 = \begin{cases} A_0, & k \in (k_a, k_b) \\ 0, & k \notin (k_a, k_b) \end{cases}$, A_0 和 k_a, k_b 均为常数, 则有

$$I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)} = c_0 A_0 \int_{k_a}^{k_b} \cos(k\Delta x) dk \approx \alpha \delta(\Delta x), \quad \alpha \text{ 为常数。}$$

(二) 实验内容

所有实验内容均在图 1 所示的装置上进行, 具体有如下几个方面:

- (1) 先用激光束调节光路和迈克尔逊干涉仪, 然后在平面镜 M_0 前或后放置扩束镜, 将激光束转换成准球面光波, 观察非定域干涉现象。此后, 在光路中放置毛玻璃屏, 将球面光波变成漫散射光波照射在干涉仪, 观察定域干涉现象。
- (2) 撤去放置的扩束镜和毛玻璃屏, 将图 1 所示的激光扩束物镜移入光路, 将激光束变

成准球面波,然后将图示的准直透镜移入光路并调节之,将准球面波调成平行光波。观测此平行光波经迈克尔逊分振幅干涉的光强随光程差的变化。

- (3) 将光纤输出端口置入光路,点亮卤素灯,调节准直透镜,形成准直平行白光光束,入射干涉仪,观测准直白光光波经迈克尔逊分振幅干涉的光强随光程差的变化。
- (4) 将卤素灯切换成高压汞灯,调节准直透镜,调出平行光波,入射干涉仪,观测其输出干涉光强随光程差的变化。然后加入透黄光的滤色片,用汞灯的平行黄光光波入射干涉仪,再观测其输出干涉光强随光程差的变化。

(三) 实验要求

除了对非定域干涉和定域干涉的定性观察外,实验的主要内容是调节光路,分别实现单线谱光波(激光),双线谱光波(汞黄光)和连续宽谱光波(卤素灯白光)以平面光波形式入射干涉仪,并观测干涉仪输出的干涉光强随光程差的变化。在平面光波射入干涉仪的条件下,仔细调整干涉仪,使得出射的两平面光波同方向重合叠加,就会得到均匀分布的干涉光场。图1中设置的成像透镜将这个均匀分布的干涉光汇聚到光探测器,测得的光强数据存储到计算机。分别测得上述三种光波的相对干涉光强随光程差变化函数 $I(\Delta x) - \overline{I(\Delta x)}$ 是实验的基本要求。更进一步的要求是:

- (1) 利用测得氦氖激光($\lambda = 632.8\text{nm}$)的相对干涉光强,对 M_1 反射镜的机械移动距离进行校准和定标。
- (2) 利用测得汞黄光的相对干涉光强,通过傅里叶变换求其光谱强度分布,探讨傅里叶变换光谱仪的原理和应用问题。
- (3) 分析测得卤素灯光的相对干涉光强的特征,探讨光学干涉断层成像的原理与应用问题。

(四) 参考材料

- (1) 吕斯骅,段家祗,张朝晖.新编基础物理实验[M].北京:高等教育出版社,2013:252-262,410-418.
- (2) 关于“傅里叶变换光谱仪”(FTS)和“光学干涉断层成像”(OCT),自行上网查找文献。