

实验二 声光效应与光拍法测光的速度

一、引言

光速是最基本的物理常数之一。光速的精确测定及其特性的研究与近代物理学和实验技术的许多重大问题关系密切。

光速的测量已经有三百多年的历史。1607 年伽利略 (G.Galilei) 做了世界上第一个测量光速的实验。因为当时还没有精确测量极短时间的方法, 所以未能获得确定的结果。但是这个实验的设计思想为后来实验测量光速提供了有益的启示。1849 年法国物理学家斐索 (A.Fizeau) 成功地在地球范围内对光速进行了测量, 他是第一个证明光速可以在实验中测得的人。至此光速的有限性才被人们所公认。1850 年法国物理学家付科 (J.Foucault) 用旋转镜法使光源的像产生位移从而测得光速 $c = 2.98 \times 10^8 \text{ m/s}$, 使光学实验技术产生了重大突破。此后, 测量光速的方法经历了一系列重大改进, 多达几十种。所有这些方法都获得了数值相近的光速值。1960 年出现激光以后, 人们把注意力转向激光, 渴望更精确地测量光速。英国国立物理实验室 (NPL) 和美国国家标准局 (NBS) 在 1970 年最先用激光测量了光速, 其不确定度已达 10^{-9} 。1973 年 6 月, 国际计量局米定义咨询委员会 (CCDM) 推荐了新的光速值为 $c = 299792458 \pm 1 \text{ m/s}$ 。这是当前公认的最准确的光速值。

本实验采用光拍法测定光速, 其目的是使学生理解光拍频波的概念, 了解声光效应的原理及驻波法产生声光频移的实验条件和特点, 掌握光拍法测量光速的技术。

二、实验原理

1. 光拍频波

根据波的叠加原理, 两束传播方向相同, 频率相差很小的简谐波相叠加, 即形成拍。对于振幅都为 E_0 (为讨论方便), 圆频率分别为 ω_1 和 ω_2 , 且沿相同方向(假设为沿 x 方向前行)传播的两束单色光

$$E_1 = E_0 \cos[\omega_1(t - \frac{x}{c}) + \varphi_1], \quad (1a)$$

$$E_2 = E_0 \cos[\omega_2(t - \frac{x}{c}) + \varphi_2], \quad (1b)$$

它们的叠加为

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= 2E_0 \cos\left[\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{c}\right) + \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)\right] \\ &\quad \times \cos\left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{c}\right) + \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)\right]. \end{aligned} \quad (2)$$

当 $\omega_1 > \omega_2$, 且 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 较小时, 合成光波是带有低频调制的高频波, 振幅为

$$2E_0 \cos\left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{c}\right) + \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)\right], \text{ 角频率}$$

为 $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ 。由于振幅以频率 $\Delta f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi}$ 周

期性地缓慢变化, 我们将合成光波称之为光拍频波, Δf 称为拍频。光拍频波的形成和传播如图 1 所示。

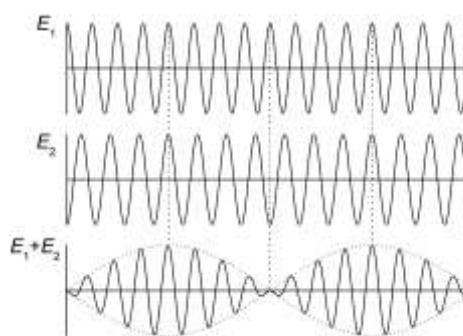


图 1 光拍频波的形成

2. 拍频信号的检测

在实验中, 我们用光电检测器接收光信号。光电检测器所产生的光电流与接收到的光强

(即电场强度 E 的平方)成正比:

$$I = gE^2. \quad (3)$$

式中 g 为光电转换系数。由于光的频率极高 ($f_0 > 10^{14} \text{ Hz}$), 而一般光电器件仅能对 10^8 Hz 以下的光强变化作出响应, 因此实际得到的光电流 I_c 近似为响应时间 τ $\left(\frac{1}{f_0} < \tau < \frac{1}{\Delta f}\right)$ 内光电检测器接收到的光强的平均。

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} I dt \\ &= \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} g \left\{ 2E_0 \cos \left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \left(t - \frac{x}{c} \right) + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right] \right\}^2 dt \quad (4) \\ &= 2gE_0^2 \left\{ 1 + \cos \left[(\omega_1 - \omega_2) \left(t - \frac{x}{c} \right) + (\varphi_1 - \varphi_2) \right] \right\}. \end{aligned}$$

式中, 高频项平均后为零。光电检测器输出的光电流包括直流和光拍频波两部分。滤去直流部分, 即得到频率为 $\Delta f = \frac{1}{2\pi}(\omega_1 - \omega_2)$,

初位相为 $(\varphi_1 - \varphi_2)$, 位相和空间位置有关的简谐拍频信号。

图 2 是拍频光信号 I_c 在某一时刻的空间分布。可见, 在某一时刻 t , 置于不同空间位置的光电检测器将输出不同位相的光电流, 因此, 用比较位相的方法可以间接测定光速。假设在测量线上有两点 x_A 和 x_B , 由(4)式可知, 在某一时刻 t , 当点 x_A 与 x_B 之间的距离等于光拍频波的波长 λ 的整数倍时, 该两点的位相差为:

$$(\omega_1 - \omega_2) \frac{x_A - x_B}{c} = 2n\pi, n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

考虑到 $\omega_1 - \omega_2 = 2\pi \Delta f$, 从而

$$x_A - x_B = n \frac{c}{\Delta f}, n = 1, 2, 3, \dots \text{且} \quad (6)$$

当相邻两个同位相点之间的距离 ($x_A - x_B$) 等于光拍频波的波长 λ , 即 $n=1$ 时, 由(6)式得

$$x_A - x_B = \lambda = \frac{c}{\Delta f}. \quad (7)$$

上式说明, 只要我们在实验中测出 Δf 和 λ , 就可间接确定光速 c 。

3. 利用声光效应产生光拍频波

光拍频波要求相拍的两束光有确定的频率差。本实验通过声光效应使 He—Ne 激光器的 632.8nm 谱线产生固定频差。声光效应原理如图 3 所示。功率信号源输出角频率为 Ω 的正弦信号加在频移器的晶体压电换能器上, 超声波沿 x 方向通过声光介质, 使介质内部产生应变, 导致介质的折射率在时间和空间上发生周期性变化, 成为一位相光栅, 使入射的激光束发生衍射而改变了传播方向, 这种衍射光的频率产生了与超声波频率有关的频率移动, 实现了使激光束频移的目的, 因此我们在实验中可获得确定频率差的两束光。

利用声光相互作用产生频移的方法有两种。一种是行波法, 原理如图 4 所示。在声光介质的与声源相对的端面上敷以吸声材料, 防止声波反射, 以保证在声光介质中只有单向声行波通过。当角频率为 ω_0 的激光束通过声光介质时, 超声波与激光单色波相互作用的结果,

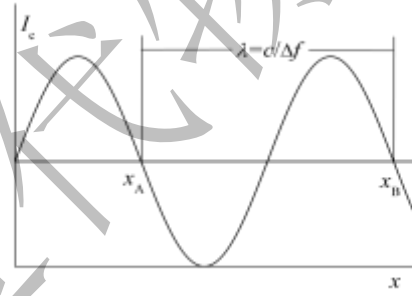


图 2 光拍频波的空间分布

使激光束产生对称多级衍射和频移。第 L 级衍射光的角频率为:

$$\omega_L = \omega_0 + L\Omega. \quad (8)$$

其中+1 级衍射光的角频率 $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$ ，零级衍射光的角频率 $\omega_2 = \omega_0$ ，通过仔细调整光路，可使两束光平行叠加，产生频差为 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = \Omega$ 的光拍频波。

另一种是驻波法，原理如图 5 所示。它是使声光介质的厚度为超声波半波长的整数倍，使超声波发生反射，在声光介质中出现形成驻波场。其结果使入射激光产生多级对称衍射，其衍射光比行波法的衍射效率高得多。第 L 级衍射光的角频率为

$$\omega_{Lm} = \omega_0 + (L + 2m)\Omega. \quad (9)$$

式中 $L, m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 。

驻波法的特点是，除不同衍射级的光波产生频移外，同一衍射级的光波中也包含各种不同的频率成分，但各种成分的强度互不相同。因此从每一级衍射光中都能获得光拍频波，而不需要通过光路的调整使不同频率的光混合叠加。可见驻波法明显优于行波法，在本实验中我们采用驻波法产生频移，各级衍射光中的频率分布和相应的频移量可用扫描干涉仪测量。扫描干涉仪工作原理可参见《He-Ne 激光的纵横模分析和模分裂》实验。

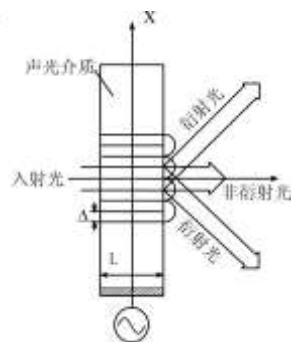


图3 声光效应原理示意图

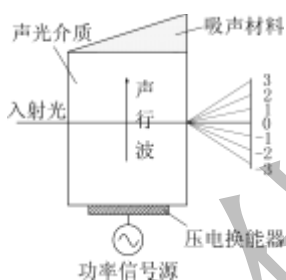


图4 行波法

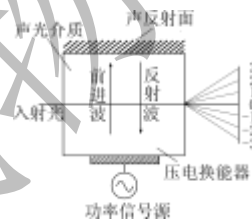
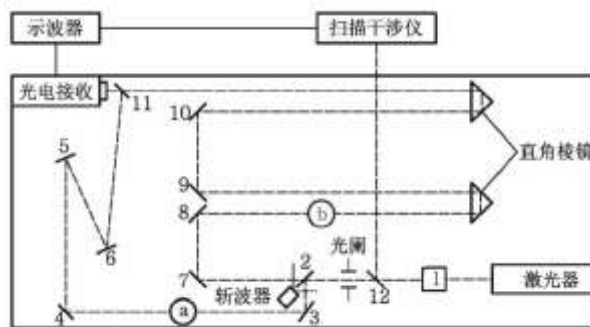


图5 驻波法

三、实验装置

本实验用LM2000C型光速测量仪测定光速。主机结构如图6所示。其中，驱动晶体振动的信号源频率 Ω 约为75MHz。实验中还配备了示波器、共焦球面干涉扫描仪及数字频率计各一台。

光源采用氦氖激光器，输出的波长为632.8nm，功率大于1mW的激光束。激光射入声光调制器后，得到具有2种以上频率的衍射光。取 $L=1$ 的第一级衍射，其中 $m=0, -1$ 两种能量最强的频率成分叠加，可得到拍频为 2Ω 的光拍频波。



1 声光频移器；2、11 半反镜；3~10, 12 全反镜
a 近光路，b 远光路

图6 光速测量仪主机结构示意图

本实验中采用“双光束位相比较法”进行相位比较，具体的电原理框图如图7所示。光拍频信号进入光电二极管后转化为光拍频电信号，经混频、选频放大，输出到示波器的Y输入端。与此同时，将高频信号源的另一路输出信号作为示波器的外触发信号。用位相法测拍频波的波长时，电路的不稳定性、信号强度等各种因素都会产生附加相移，若在测量过程中被测信号强度始终保持不变，则附加相移主要来自电路的不稳定因素。本实验中设置高速

旋转的斩波器，交替遮挡半透半反镜 2 的透射光和反射光，使得某一时刻光电二极管接收并显示在示波器上的要么是近程光路的拍频波，要么是远程光路的拍频波。斩波器速度足够高时，由于人眼的视觉暂留效应及示波器荧光屏的余辉效应，看起来两个拍频波信号是同时显示的。两路光在很短的时间间隔内交替经过同样的电路系统，相互间的相位差仅与两路光的光程差有关，这样就可消除电路附加相移的影响。实验中通过改变远程光的光程，使其波形与近程光波形重合，此时远程光与近程光的光程差即为拍频波长 λ 。

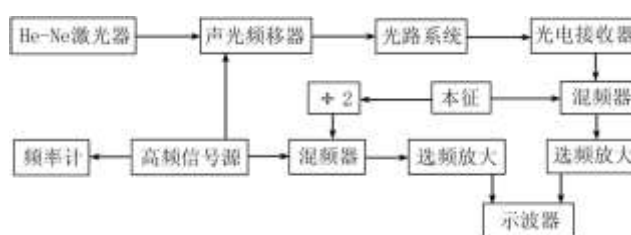


图 7 光拍法测光速的电原理图

四、实验内容

1. 光速仪的检查与调整

检查各光学元件的几何位置。打开激光电源，预热 15 分钟，使激光器的输出功率达到稳定状态。

2. 测量声光效应产生的频移

(1) 按图 8 连接好扫描干涉仪相关电源与信号线。

调节反射镜 12 和扫描干涉仪，使激光束与干涉仪接近准直状态，在示波器上观察激光的模式分布。

(2) 根据扫描干涉仪的自由光谱区确定激光纵模间距，实验所用扫描干涉仪自由光谱标示在仪器上。相关原理与步骤可参见《He-Ne 激光的纵横模分析和模分裂》实验。

(3) 打开信号发生器，调节高频信号发生器输出频率至 75MHz 左右，功率指示在满量程的 60%~100% 之间（功率指示表头中，读数乘以 10 是毫瓦数，即满量程 100 时为 1000mW），并使示波器处于外触发状态。观察 0 级衍射光中频率的分布，微调高频信号发生器的输出频率，记录各频率成分光强度的变化。衍射效率最高时，测量 0 级衍射光中各成分的频率间距和强度分布，并描出相应谱线。

(4) 微调扫描干涉仪水平位置使 ± 1 级和 ± 2 级衍射光分别对正扫描干涉仪的入射小孔，重复上一步内容。

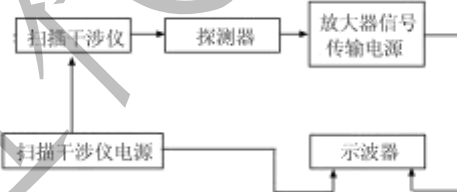


图 8 扫描干涉仪连接示意图

2. 双光束位相比较法测量光速

(1) 取下反射镜 12，粗调光阑和反射镜的中心高度，使其成等高状态；调整光阑及反射镜的角度，使 $+1$ 级或 -1 级衍射光通过光阑后依次投射到各级反射镜的中心点。

(2) 斩波器电源处于关闭状态，手动调节使斩波器遮挡远程光；逐级调节近程光路上各级反射镜，使近程光 ① 通过入光孔中心射入光电二极管，在示波器荧光屏上出现近程光的正弦波形。

(3) 手动调节使斩波器遮挡近程光，逐级细调远程光路上的反射镜，使得直角棱镜在整个导轨上来回移动时，远程光 ② 始终通过入光孔中心射入光电二极管，且示波器荧光屏上出现远程光波形幅度没有明显变化。

(4) 打开斩波器电源，示波器荧光屏上将同时显示远程光和近程光两个正弦波形。注意斩波器转速适中，过快时示波器上波形可能会左右晃动，过慢时两个波形会闪烁。反复调节近程、远程光路的等高共轴，使得示波器上两个波形清晰稳定且幅度相等。调节信号发生器输出频率，当其接近声光转换器的中心频率时，波幅为最大。

(5) 设计实验步骤测量通过双光束位相比较法测出拍频波。

(6) 从数字频率计读出高频信号发生器的输出频率 Ω ，代入公式 $c = \Delta f \cdot \lambda = 2\Omega \cdot \lambda$ 即可求得光速 c 。此时测出的光速是光在空气中的速度，若要计算真空中的光速 c ，参见《光学多道与氢氖光谱》实验中光速的修正方法。

五、注意事项

1. 切忌用手或其它污物接触光学元件表面。
2. 调整光路时，切勿带电触摸激光管电极等高压部位，以免发生危险。
3. 注意避免直射或反射的激光束照射眼睛。

六、思考题

1. 光拍法为什么能测光速？
2. 本实验采用驻波法形成光拍有何好处？
3. 本实验主要误差来源有哪些？按实验中各量的测量精度，估计本实验的误差。
4. 如何进一步提高本实验的测量精度？

参考文献

- [1] 易明. 光学. 北京: 高等教育出版社, 2002
- [2] 安毓英, 刘继芳, 李庆辉. 光电子技术. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [3] 杨小丽. 光电子技术基础. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005