

光拍频法测量光速的实验报告

郑鹏凯^{*}, †

安徽师范大学 物理系, 安徽 241000

【摘要】光速是电磁学和相对论中的基本常数,也是国际单位制中长度单位的定义基础。传统光速测量方案往往需要较长的光程或复杂的计时系统,难以在普通教学实验条件下实现。本实验利用声光效应将氦氖激光束经声光移频器调制,获得频差较小的两束相干光,它们叠加在空间中形成光拍频波;再通过光学元件将拍频光分成近程光路和折叠远程光路两路,利用光电二极管把光拍频波转换为电信号,在示波器上观察两路拍频信号的相位差。通过调节远程光路的光程,当两路拍频信号的相位差为 2π 时,光程差等于光拍波长,由测得的光程差 L 和声光驱动频率 F 计算得到光速 $c = 2FL$ 。实验结果显示,测得的光速数值在一定相对误差范围内与公认值 3.00×10^8 m/s相符,说明光拍频法在有限空间内实现光速精确测量具有较好的可行性与教学价值,同时讨论了光程测量、频率稳定性以及光路调节等因素对实验误差的影响。

【关键词】光速测量, 光拍频, 声光效应, 驻波声光调制, 氦氖激光器

Measurement of the Speed of Light by Optical Beat Method

Pengkai Zheng ,

Department of Physics, Anhui Normal University, Anhui 241000, China

Abstract: The speed of light is a fundamental constant in electromagnetism and relativity, and it is also the basis for the definition of the unit of length in the SI system. Traditional methods for measuring the speed of light usually require a long optical path or sophisticated timing systems, which are difficult to implement in ordinary teaching laboratories. In this experiment, the optical beat method is adopted. A He-Ne laser beam passes through an acousto-optic modulator driven at a radio frequency so that several diffraction components with slightly different optical frequencies are produced. Two coherent beams with a small frequency difference interfere and form an optical beat wave in space. The beat light is split into a near path and a folded far path by optical elements. A photodiode converts the optical beat into electrical signals, and the phase difference between the two beat signals is observed on an oscilloscope. By adjusting the optical path of the far beam, the phase difference is set to 2π , which corresponds to one beat wavelength. From the measured optical path difference L and the driving frequency F , the speed of light is obtained as $c = 2FL$. The measured value agrees with the recommended value 3.00×10^8 m/s within the experimental uncertainty, which demonstrates that the optical beat method is feasible and valuable for compact and accurate measurements of the speed of light in teaching experiments. The main error sources, such as optical path measurement, frequency stability and optical alignment, are discussed.

Key Words: speed of light, optical beat, acousto-optic effect, standing acoustic wave, He-Ne laser

实验时间: 2025-11-28

报告时间: 2025-12-02

† 指导教师

*学号: 23111401194

*E-mail: 23111401194@ahnu.edu.cn

1 引言

光波是频率约为 10^{14} Hz 的电磁波，其传播速度为自然界最基本的物理常数之一。光速不仅在经典电磁学和相对论理论体系中起到核心作用，而且通过 c 的精确定义反过来作为国际单位制中长度单位的计量基准。因此，在教学实验中设计一种物理概念清楚、装置成本适中、能够在实验桌面上完成的光速测量方法，具有重要的物理教育意义和示范价值。

直接利用 $c = s/\Delta t$ 进行测量时，若选取可方便测得的光程 s （例如数量级为波长 λ 的路程），对应的传播时间 $\Delta t = 1/f$ 极短，常规电子计时技术难以给出足够精确的读数。若希望 Δt 在电子学可测量的尺度（如 ns 级以上），则需将“等效波长”提升到米级乃至更长。本实验采用的光拍频法，正是通过产生光频差较小的两束相干光，使其叠加后形成“低频”拍频包络，从而将原本 10^{14} Hz 量级的光频“下变频”到 MHz 量级，使拍频波长达到数米的尺度，利用常规光路与射频频率计便可间接测定光速。

本实验中，氦氖激光束通过声光移频器，在介质中超声波产生的驻波声场作用下发生声光效应，产生多个衍射级及频移分量；在适当选取的衍射级内，不同频率分量叠加形成光拍频波。利用半透镜将拍频光分成近程和折叠远程两路，通过光电二极管与示波器比较两路拍频电信号的相位，测得光程差与拍频，从而得到光速的实验值。本文将对光拍频形成机理、声光调制原理、测量公式推导以及装置结构与实验步骤进行说明，并在此基础上讨论数据处理与误差来源。

2 实验原理

2.1 光拍频波的形成

设有两束沿 x 轴方向传播、偏振方向相同的简谐平面光波，其电场强度分别为

$$E_1(x, t) = E_0 \cos(\omega_1 t - k_1 x + \varphi_1), \quad (1)$$

$$E_2(x, t) = E_0 \cos(\omega_2 t - k_2 x + \varphi_2), \quad (2)$$

其中 E_0 为振幅， ω_1, ω_2 为角频率， $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ ， $k_2 = 2\pi/\lambda_2$ 为波数， φ_1, φ_2 为初相位。若两束光的频差 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 较小且传播方向相同，则叠加

场为

$$E(x, t) = E_1 + E_2. \quad (3)$$

利用三角函数和差公式，可将其写成高频载波与低频包络的乘积形式

$$E(x, t) = 2E_0 \cos\left[\frac{\Delta\omega}{2}(t - \frac{x}{c}) + \frac{\Delta\varphi}{2}\right] \cos\left[\omega(t - \frac{x}{c}) + \varphi\right], \quad (4)$$

其中 $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$, $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。可以看到，电场以平均频率 ω 振荡，同时振幅按频率 $\Delta\omega/2$ 缓慢变化，形成拍频现象。

若两光速均为 c ，则拍频 f_{beat} 与两光束频差满足

$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2}, \quad \Lambda = \Delta\lambda = \frac{c}{\Delta f}, \quad (5)$$

其中 Λ 为拍频波的波长。通过人为控制光频差 Δf 到 MHz 量级，即可使 Λ 达到数米，从而适合以光程差的形式进行测量。

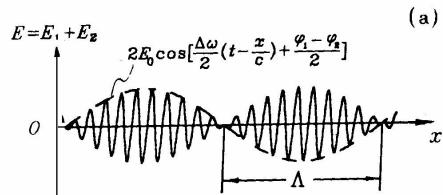


图 1 拍频波场在某一时刻 t 的空间分布

2.2 光拍信号的检测

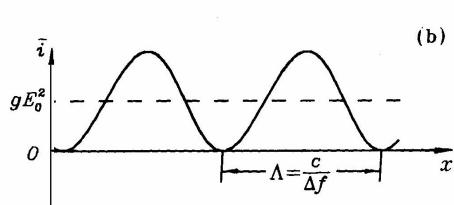
光电探测器（例如光电倍增管）输出的光电流与光敏面上接收到的光强（即电场强度）成正比。记 g 为光电转换常数，则瞬时光电流

$$i(t) = gE^2(x, t). \quad (6)$$

由于可见光频率约为 10^{14} Hz，而光电器件及后续电路的响应带宽通常不超过 10^9 Hz，仪器只能给出在响应时间 τ 内的平均值

$$\bar{i} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau i(t) dt. \quad (7)$$

对 $E^2(x, t)$ 在高频载波周期上求平均，高频项平均为零，仅保留下低频拍频项。这样，探测器输出的电信号包含直流分量和频率为 Δf 的拍频分量。通过滤除直流项，即可得到频率 Δf 、相位随空间位置变动的拍频电信号如图所示。

图 2 拍频波场在某一时刻 t 的空间分布

2.3 声光效应与拍频获得

在透明介质中传播的超声波会在介质内部产生周期性的应变，导致折射率出现空间周期性的微小变化，从而形成相当于位相光栅的结构。当单色激光束穿过该介质时，会发生衍射并伴随频移，这就是声光效应。

若在声光介质一端敷以吸声材料以抑制反射，则介质中形成声行波，激光通过时在空间产生多级对称衍射，其第 L 级衍射光的角频率为

$$\omega_L = \omega_0 + L\Omega, \quad L = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (8)$$

其中 ω_0 是入射光角频率， Ω 是超声波角频率。选取合适光路使零级与 $+l$ 级衍射光汇合起来，即可得到频差为 Ω 的两束光，从而形成拍频。

若在声光介质远端敷以强反射材料，并使介质厚度约为超声波半波长的整数倍，则前进波和反射波在介质中形成驻波声场，介质变成驻波相位光栅。此时第 L 级衍射光中包含多种频率分量

$$\omega_{L,m} = \omega_0 + (L + 2m)\Omega, \quad L, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (9)$$

若功率信号源频率为 $F = \Omega/2\pi$ ，则对应的光频为

$$f_{L,m} = f_0 + (L + 2m)F. \quad (10)$$

在同一级衍射光中，不同 m 取值对应多个频率分量，它们之间的频差一般为 $2F$ 。因此，仅利用同一年级衍射光内部的两个频率分量（如 $m = 0$ 和 $m = -1$ ）叠加，即可得到拍频为

$$\Delta f = 2F \quad (11)$$

的光拍频波。本实验采用的正是驻波法获取拍频，其衍射效率更高且光路结构更为紧凑。

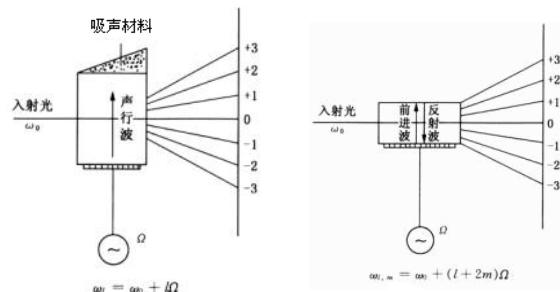


图 3 相拍二光波获得示意图

2.4 光速的测量公式

将获得的拍频光经光学系统分成近程光路和远程折叠光路两束，光电二极管把两路拍频光分别转换为电信号，并送入示波器。在同一时间基准下比较两路拍频信号的相位差 $\Delta\phi'$ ，该相位差与两路光的光程差 L 满足

$$\Delta\phi' = \frac{2\pi}{\Lambda} L \quad (12)$$

其中 Λ 为拍频波长。当通过移动远程光路上的反射镜组，使示波器上两路拍频信号的正弦波形第一次完全重合时， $\Delta\phi' = 2\pi$ ，此时

$$L = \Lambda. \quad (13)$$

由于 $\Lambda = c/\Delta f$ 且 $\Delta f = 2F$ ，可以得到

$$c = \Lambda \Delta f = L \cdot 2F. \quad (14)$$

因此，只要准确测量光程差 L 以及声光驱动信号频率 F ，即可根据上式求得光速 c 。

3 实验装置与步骤

3.1 实验仪器

本实验所用仪器有 CG-IV 型光速测定仪、示波器和数字频率计各一台。

(1) 发射部分

长 250mm 的氦氖激光管输出激光的波长为 632.8nm，功率大于 1mw 的激光束射入声光移频器中，同时高频信号源输出的频率为 75MHZ 左右、功率 1w 左右的正弦信号加在频移器的晶体换能器上，在声光介质中产生声驻波，使介质产生相应的疏密变化，形成一位相光栅，则出射光具有两种以上的光频，其产生的光拍信号为高频信号的倍频。

(2) 光电接收和信号处理部分

由光路系统出射的拍频光，经光电二极管接收并转化为频率为光拍频的电信号，输入至混频

电路盒。该信号与本机振荡信号混频，选频放大，输出到示波器的 Y 输入端。与此同时，高频信号源的另一路输出信号与经过二分频后的本振信号混频。选频放大后作为示波器的外触发信号。需要指出的是，如果使用示波器内触发，将不能正确显示二路光波之间的位相差。

(3) 电源

激光电源采用倍压整流电路，工作电压部分采用大电解电容，使之有一定的电流输出，触发电压采用小容量电容，利用其时间常数小的性质，使该部分电路在有工作负载的情况下形同短路，结构简洁有效。 $\pm 12V$ 电源采用三端固定集成稳压器件，负载大于 $300mA$ ，供给光电接受器和信号处理部分以及功率信号源。 $\pm 12V$ 降压调节处理后供给斩光器之小电机。

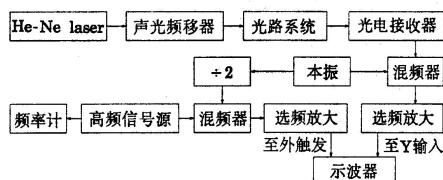


图 4 光拍法测光速的电原理图

3.1.1 光拍法测光速的光路

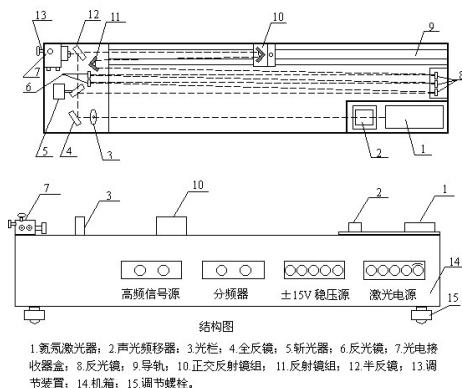


图 5 CG-IV 型光速测定仪的结构与光路示意图

氦氖激光管输出波长 $\lambda = 632.8 nm$ 、功率大于 $1 mW$ 的激光束，经整形后水平射入声光介质。第 0 级衍射光中包含两种频率分量，通过圆孔光阑选出该级光用于产生拍频。近程光路直接由半反镜反射后经反射镜组送入光电二极管；远程光路则通过多次折叠的反射镜组增加光程，最后同样在半反镜处与近程光路汇合，并经同一路光学系统

聚焦到光电二极管的光敏面上。

为了在有限空间内获得约为 $10 m$ 的拍频波长，远程光路采用折叠结构，通过多次反射实现较长的等效光程。斩光器可选择性挡住近程或远程光路，使示波器上可以分别观察对应的一路拍频信号，便于调节光路。

3.2 实验内容及步骤

掌握光拍频法测量光速的原理和实验方法，并对声光效应有一初步了解，通过测量光拍的波长和频率来确定光速。

(1) 调节光速测定仪底座的调平螺丝，使仪器保持水平。检查各光学元件表面清洁，无明显污点。

(2) 按照电路原理图连接示波器、频率计与供电线路，使示波器工作在外触发模式。接通激光电源，调节激光管工作电流至约 $5 mA$ ；接通 $\pm 12 V$ 稳压电源。预热约 15 分钟，使各部分稳定。

(3) 调整高频信号源频率在 $75 MHz$ 左右，并适当调节输出功率，使声光介质中形成稳定驻波声场，观察衍射光斑，选取二级以上较强衍射光斑作为工作状态。

(4) 调整光阑高度和各反射镜角度，使 0 级衍射光通过光阑并准确入射到相邻反射镜的中心，使近程光路基本贯通。

(5) 使用斩光器挡住远程光路，仅保留近程光路。通过微调全反射镜和半反镜，使近程拍频光沿光电二极管前透镜的光轴入射到光敏面上，此时示波器上应出现近程光对应的拍频正弦波形。

(6) 使用斩光器挡住近程光路，仅保留远程光路。调节半反镜与远程光路上的各反射镜、正交反射镜组，使远程拍频光最终与近程光同路入射到光电二极管的光敏面上，示波器上出现远程光对应的拍频波形。

(7) 交替挡住近程/远程光路，反复微调光路与光电二极管方位，使两路拍频信号在示波器上具有相近的幅度和良好的正弦波形。如振幅差异较大，可微调光电二极管前透镜位置，改变入射光强，直到两路波形幅值尽量相等。

(8) 打开两路光路，使两路拍频信号同时显示在示波器屏幕上，缓慢移动安装有正交反射镜的滑块，改变远程光路光程。当观察到两路拍频正弦

波形第一次完全重合时, 记录此时滑块位置, 近程与远程光路的光程差 L 等于一个拍频波长。

(9) 重复上一步若干次, 获得多组 L 值, 并用数字频率计测量对应时刻的高频信号源输出频率 F 。根据 $c_i = 2F_i L_i$ 计算每次测量的光速值 c_i 。

4 实验结果与分析

4.1 拍频信号波形观察

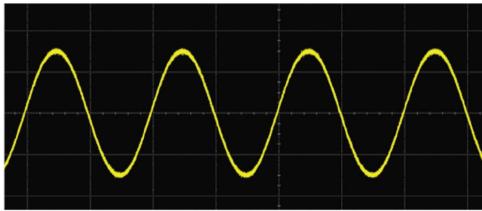


图 6 近程与远程光路拍频电信号的示波器波形

在正确调节光路与电路后, 示波器上可以看到频率稳定的正弦拍频信号。通过调整光路和光电二极管方位, 使两路拍频信号的幅度尽量相等, 对相位比较有利。如图6所示, 当光程差逐渐调整接近拍频波长时, 两路拍频信号的相位差由不整倍数 π 逐步逼近 2π , 在某一位置上两波形完全重合, 此时对应的光程差即为 Λ 。

4.2 光速的计算与不确定度估计

设共获得 n 组 (L_i, F_i) 数据, 每组对应一次光程差调节到两路波形首次重合的状态。第 i 次测得的光速为

$$c_i = 2F_i L_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

对所有测量结果求算术平均

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad (16)$$

并计算标准差估计随机不确定度

$$s_c = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}. \quad (17)$$

若 F 由数字频率计读出, 其分辨率和稳定性通常优于 10^{-6} 量级, 主导误差多来自光程差 L 的测量与滑块重复定位误差。可将频率读数误差 ΔF 和光程测量误差 ΔL 视为相互独立, 对 $c = 2FL$ 作误差传播估算, 相对不确定度近似为

$$\frac{\Delta c}{c} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2}. \quad (18)$$

典型实验中, $\Delta F/F$ 远小于 $\Delta L/L$, 因此提高光速测量精度的关键在于提高光程差测量的准确度与滑块位置重复性的控制。

本次实验在不同初始位置下共进行了 5 组测量, 每组都记录了反射镜一、反射镜二的初末刻度读数以及声光驱动频率。根据公式

$$L_i = 2(x_{a2,i} - x_{a1,i}) + 2(x_{b2,i} - x_{b1,i}), \quad (19)$$

可得第 i 次测量的光程差 L_i (单位为cm, 换算时乘以 10^{-2} 得到米), 再由

$$c_i = 2F_i L_i \quad (20)$$

计算相应的光速值 c_i 。整理后的实验数据与计算结果见表1。(其中 x_{b1} 都为 0cm)

表 1 光拍频法测量光速的数据与结果

序号	x_{a1}/cm	x_{a2}/cm	x_{b2}/cm	L/m	$c/(10^8 \text{ m/s})$
1	1.51	47.21	53.62	1.99	2.98
2	0.00	45.55	54.72	2.01	3.00
3	0.50	46.80	54.30	2.01	3.01
4	0.80	47.10	54.85	2.02	3.03
5	1.20	46.55	55.10	2.01	3.01

由表1可见, 各次测量得到的光程差约为 2.0 m, 高频驱动频率稳定在 $F \approx 75 \text{ MHz}$ 附近, 对应的光速单次测量结果集中在

$$c_i \approx (2.98 \sim 3.03) \times 10^8 \text{ m/s}$$

之间, 波动范围较小。

对 5 次测量结果求平均并估算标准偏差, 可得

$$\bar{c} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 c_i \approx 3.01 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (21)$$

$$s_c \approx 0.02 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (22)$$

即

$$c = (3.01 \pm 0.02) \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (23)$$

其中不确定度取一倍标准偏差。相对标准不确定度约为

$$\frac{s_c}{\bar{c}} \approx 0.66\%.$$

若取公认值 $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$, 本实验测得值与其差值约为

$$\bar{c} - c_0 \approx 1.3 \times 10^6 \text{ m/s},$$

对应的相对偏差约为 0.44%，在本实验装置和读数精度条件下是可以接受的。

4.3 误差分析与讨论

结合上述数据可以看出， F 的相对变化量仅为 10^{-4} 量级，而 L 在不同测量中的变化达到厘米量级，因此总的不确定度主要由光程差的测量误差和“波形第一次重合”这一判据的主观性所决定。具体而言：

一是折叠光路的等效光程由多面反射镜构成，滑块位置读数存在刻度分辨率和机械间隙误差，导致 L 存在系统偏差；二是示波器上判断两路正弦波形完全重合往往需要凭经验，略微偏离就会产生 $\Delta\phi'$ 的误判，从而反映到 L 和 c 的计算中；三是两路光束在光电二极管光敏面上的入射位置和光斑大小不完全相同，也可能引入幅度和相位响应上的细微差别。

从数据分布来看，第 1 组与第 4 组的偏离相对稍大，说明在某些位置上滑块读数或波形重合判断略有偏差，但整体仍然落在 $\pm 1\%$ 范围内。若要进一步提高测量精度，可以：

(1) 提高导轨及滑块刻度的机械精度，减小读数不确定度；(2) 采用数字相位计或锁相技术自动判断相位差，而不是依赖肉眼比较波形；(3) 更精细地调节光路，使两路光束在光电二极管上的重合程度更高。

综合来看，本实验在约 0.5% 的相对偏差水平上给出了与公认值相符合的光速测量结果，达到了近代物理教学对精度的基本要求。

5 结论

本实验采用光拍频法在有限实验空间内测量光速。利用声光移频器在氦氖激光束中引入微小频差，使两束相干光在空间叠加形成拍频包络，通过光电二极管把光拍频转换为可在示波器上观察的电信号，并构建近程与折叠远程两路光程可调的光路系统。在示波器上比较两路拍频信号的相位差，当相位差调整为 2π 时，对应的光程差即为拍频波长，由测得的光程差 L 和声光驱动频率 F 计算得到光速 $c = 2FL$ 。

实验表明，通过多次测量与平均处理，所得光速实验值与公认值 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 在实验不确定度范围内相符，从而验证了光拍频法测量光速的正

确性和可行性。相较于依赖长光程或高速电子计时的传统方案，本方法通过“频率下变频”和“拍频波长放大”的思路，以较短的物理装置长度实现了对光速的间接测定，具有装置紧凑、物理图像清晰、教学演示效果直观等优点。

6 思考题与解答

(1) 什么是光拍频波？

光拍频波是指两束频率很接近、相干且传播方向基本相同的单色光叠加时，总光强在高频振荡的基础上出现按频差 Δf 缓慢起伏的包络；这一由光强包络形成的等效低频波称为光拍频波，其拍频频率为 $\Delta f = |f_1 - f_2|$ ，拍频波长为 $\Lambda = c/\Delta f$ 。

(2) 斩光器的作用是什么？

斩光器相当于一个可控的“光开关”。在本实验中，用它选择性地挡住近程光路或远程光路，使示波器上可以单独观察某一路的拍频信号，便于分别调节光路和光电二极管的位置与光强，同时切断多余光束，减弱杂散光对测量的干扰。

(3) 为什么采用光拍频法测光速？

可见光频率约为 10^{14} Hz ，周期极短，直接用“路程除以时间”的方法在普通电子学条件下几乎无法准确测出传播时间。光拍频法通过声光调制产生频差很小的两束光，使其叠加形成 MHz 量级的拍频波，相当于把极高的光频“下变频”，得到米量级的拍频波长，把对极短时间的测量转化为对米级光程差的测量，从而在桌面尺度装置上就能较精确地求出光速。

(4) 获得光拍频波的两种方法是什么？本实验采用哪一种？

获得光拍频波主要有两种方法：一是在声光介质中只建立声行波，激光经衍射后，从不同衍射级（如 0 级和 ± 1 级）中选取两束频率相差 F 的光，它们叠加产生拍频 $\Delta f = F$ ；二是在声光介质中利用反射形成驻波声场（驻波相位光栅），同级衍射光内部本身就含有频率间隔 $2F$ 的多个分量，从中选取两分量叠加得到拍频 $\Delta f = 2F$ 。本实验采用的是第二种驻波声光相位光栅的方法。

(5) 使示波器上出现两个正弦拍频信号的振幅相等，应如何操作？

先用斩光器挡住远程光路，只让近程光入射光电二极管，调节近程光路中的反射镜、半反

镜和前置透镜位置, 使近程拍频信号在示波器上的幅度合适且波形接近正弦; 再挡住近程光、只让远程光入射, 同样微调远程光路的反射镜与透镜, 使远程拍频信号幅度与近程信号相当; 最后同时打开两路光, 细调光路和光电二极管位置, 使两束光在光敏面上的光斑尽量重合, 这样示波器上两个正弦拍频信号的振幅就基本相等。

(6) 写出光速的计算公式, 并说出各量的物理意义。

本实验中光速的计算公式为

$$c = 2FL. \quad (24)$$

其中, c 为待测光速; F 为声光移频器的高频驱动频率 (射频); L 为近程光路与远程光路之间的光程差, 在示波器上观察到两路拍频信号相位差第一次为 2π 时对应的光程差。此时光程差等于一个拍频波长 Λ , 而 $\Lambda = c/\Delta f$ 、 $\Delta f = 2F$, 代入即可得到上式。

(7) 分析本实验的主要误差来源, 并讨论提高测量精确度的方法。

主要误差来源包括: 折叠远程光路光程差 L 的测量误差 (滑块刻度分辨率有限、导轨和反射镜安装存在机械间隙等); 在示波器上用肉眼判断“两路拍频信号第一次完全重合”带来的主观误差; 两路光束在光电二极管光敏面上重合程度有限, 导致光电响应相位出现微小差异; 以及高频信号源频率 F 的微小漂移和频率计读数误差等。提高测量精度可以通过提高导轨和滑块的机械精度、适当增大光程差 (调到多倍拍频波长再折算) 以减小相对读数误差, 采用更稳定的频率源和高分辨率频率计, 以及使用数字相位计或锁相技术自动测量相位差并精细调整光路, 使两束光在光电二极管上的光斑高度重合等措施来实现。

参考文献

- [1] 崔执凤. 安徽省高校重点课程建设教材近代物理实验 [M]. 芜湖: 安徽师范大学出版社, 2013.