

## 实验 10 光拍频法和光速的测量

### 引言

光在真空中的传播速度是一个重要的基本物理常数,许多重要的物理概念和物理量都与它有密切的关系。麦克斯韦的光的电磁理论中的常数  $c$ ,一方面等于电荷的电磁单位与静电单位的比值,另一方面它又预示了电磁场的传播速度,即电磁波以光速传播,光是一种电磁波。此后首先被赫兹的实验所证实。历史上围绕运动介质对光的传播速度的影响问题,曾做过许多重要实验;同时在实验上和理论上作过各种探讨,最终导致了爱因斯坦相对论的建立。

光的速度与许多物理量有关,例如电磁学中的真空电容率  $\epsilon_0$  与真空磁导率  $\mu_0$ ,里德伯常数  $R$ ,质子、中子、电子、 $\mu$ 子等基本粒子的质量等。因此光速值的精确测量将关系到许多物理量值精度的提高,它是一项十分重要的课题。自 17 世纪伽利略第一次测定光速以来,在各个时期,人们都用当时最先进的技术和方法来测量光速。

1941 年美国安德森用电光调制法,即利用克尔盒作为一个光开关,调制光束,使光强产生  $1.9 \times 10^7$  赫的变化,测得光速值为  $2.99766 \times 10^8 \text{m/s}$ 。此值的前四位与现在的公认值一致。1966 年卡洛路斯、赫姆伯格用声光频移法,产生光拍频波,测量光拍频波的波长和频率,测得光速  $c = (299,792.47 \pm 0.15) \times 10^3 \text{m/s}$ 。1970 年美国国家标准局和美国国立物理实验室最先用激光作了光速测定。根据波动基本公式  $c = \lambda \nu$ ,之间测量光波波长与光波频率而求得  $c$  的数值。光的波长是用迈克耳孙干涉仪来直接测定;光波的频率是通过一系列混频、倍频、差频技术,利用较低频率的电磁波去测量较高频率,再以较高频率测量更高频率,最后达到测得光频的目的。因此,于 1975 年第十五届国际计量大会提出了真空中光速为:  
 $c = (299,792,458 \pm 1) \text{m/s}$ 。1983 年国际计量局召开的第七次米定义咨询委员会和第八次单位咨询委员会决定,以光在真空中  $\frac{1}{299,792,458}$  秒时间间隔内所传播的距离,作为长度单位米的定义。这样,光速  $c = 299792458 \text{m/s}$  就成了定义性常数,这个值被定义为精确值。直到现在,不少科学发达的国家仍集中了一批优秀的科学家,在提高测量光速的精确度方面进行着工作。

本实验是用声光频移法获得光拍,通过测量光拍的波长和频率,来确定光速。通过实验,学习光拍法测光速的原理和实验方法,同时对声光效应有一初步的了解。

### 实验目的

- 1 理解光拍频的概念
- 2 了解声光调制的基本原理
- 3 掌握光拍法测量光速的技术

### 实验原理

#### 1 光拍的产生和传播

在介质中传播超声波时,由于弹性应变导致介质折射率或介质常数的变化。此时当光通

过介质时会发生衍射现象——声光效应。本实验采用声光调制器将单色激光调制后产生具有一定频差又重叠在一起的两光束，从而方便地获得光拍频。

根据振动叠加原理，两列速度相同、振幅相同、频差较小且同向传播的简谐波叠加即形成拍。拍频波的频率（即拍频）是相叠加的两简谐波的频差。考虑圆频率分别为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ （频差 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 较小）的两光束，为简化讨论，假定它们具有相同的振幅 $E_0$ ，则

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 \cos(\omega_1 t - k_1 x + \varphi_1) \\ E_2 &= E_0 \cos(\omega_2 t - k_2 x + \varphi_2) \end{aligned}$$

式中 $k_1 = 2\pi/\lambda_1, k_2 = 2\pi/\lambda_2$ 为波数， $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 分别为两列波在坐标原点的初相位。若这两列光的偏振方向相同，则叠加后形成

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

上式是沿x轴方向的前进波，其圆频率为 $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ ，振幅为 $2E \cos\left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{c}\right) + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right]$ ，

$E$ 的振幅是时间和空间的函数，以频率 $\Delta f = (\omega_1 - \omega_2)/2\pi$ 周期性的变化，称这种低频率的行波为光拍频波， $\Delta f$ 就是拍频，振幅的空间分布周期就是拍频波长，以 $\Lambda$ 表示。如图1所示。

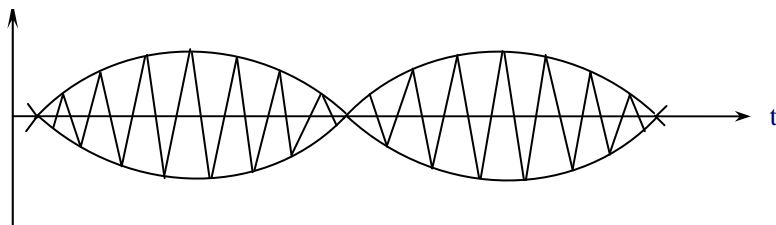


图1 光拍频的形成

因为拍频波的频率较光频率要小得多，所以我们用光电检测器接收拍频波。检测器光敏面上光照反应所产生的光电流系光强（即电场强度的平方）所引起，故光电流为

$$i_o = gE_s^2 \quad (2)$$

$g$ 为接收器的光电转换常数。同时注意，由于光频甚高（ $f_o > 10^{14} \text{ Hz}$ ），光敏面来不及反映频率如此之高的光强变化，迄今仅能反映频率 $10^8 \text{ Hz}$ 左右的光强变化，并产生光电流；

将 $i_o$ 对时间积分，并取对光检测器的响应时间 $t(\frac{1}{f_o} < t < \frac{1}{\Delta f})$ 的平均值。将(1)式代入(2)

式，结果 $i_o$ 积分中高频项为零，只留下常数项和缓变项。即：

$$\bar{i} = gE_0^2 \left\{ 1 + \cos \left[ \Delta\omega \left( t - \frac{x}{c} \right) + (\varphi_1 - \varphi_2) \right] \right\} \quad (3)$$

其中  $\Delta\omega$  是与拍频  $\Delta f$  相应的圆频率， $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  为初相。可见光检测器输出的光电流包含有直流和光拍信号两种成分。滤去直流成分，即得频率为拍频  $\Delta f$ 、位相与初相和空间位置有关的输出光拍信号。

图 2 是光拍信号  $i$  在某一时刻的空间分布，如果接收电路将直流成分滤掉，即得纯粹的拍频信号在空间的分布。这就是说处在不同空间位置的光检测器，在同一时刻有不同位相的光电流输出。这就提示我们可以用比较相位的方法间接地决定光速。

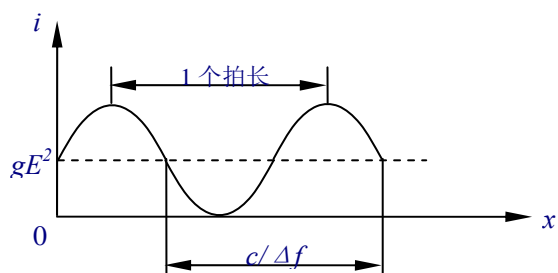


图 2 光拍的分布

事实上，由 (3) 可知，光拍频的同位相诸点有如下关系：

$$\Delta\omega \frac{x}{c} = 2n\pi \quad \text{或} \quad x = \frac{nc}{\Delta f} \quad (4)$$

$n$  为整数，相邻两同相点间的距离为  $\Lambda = c/\Delta f$ ，即相当于拍频波的波长。测定了  $\Lambda$  和光拍频  $\Delta f$ ，即可确定光速  $c$ 。

## 2 相拍二光束的获得

光拍频波要求相拍二光束具有一定的频差。使激光束产生固定频移的办法很多。一种最常用的办法是使超声与光波互相作用。超声（弹性波）在介质中传播，引起介质光折射率发生周期性变化，就成为一位相光栅。这就使入射的激光束发生了与声频有关的频移，后者实现了使激光束频移的目的。

利用声光相互作用产生频移的方法有两种。一是行波法。在声光介质的与声源（压电换能器）相对的端面上敷以吸声材料，防止声反射，以保证只有声行波通过，如图 3 所示。相互作用的结果，激光束产生对称多级衍射。第 1 级衍射光的角频率为  $\omega_1 = \omega_0 + l\Omega$ 。其中  $\omega_0$  为入射光的角频率， $\Omega$  为声角频率，衍射级  $l = \pm 1, \pm 2, \dots$ ，如其中 +1 级衍射光频为  $\omega_0 + \Omega$ ，衍射角为  $\alpha = \frac{\lambda}{\Lambda}$ ， $\lambda$  和  $\Lambda$  分别为介质中的光和声波长。通过仔细的光路调节，我们可使 +1 与 0 级二光束平行叠加，产生频差为  $\Omega$  的光拍频波。这种拍频光波就可以用来达到测量光速的目的。但是这两束光必须平行叠加，因而对光路的可靠性和稳定性提出了较高的要求，相拍二束光稍有相对位移即破坏形成光拍的条件。

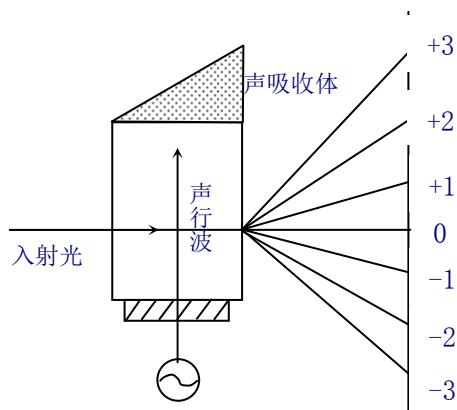


图 3 行波法

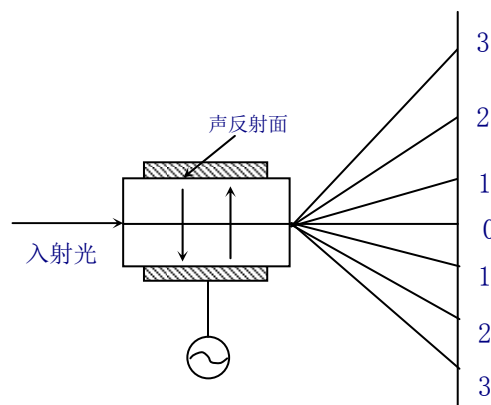


图 4 驻波法

另一种是驻波法，如图 4-4 所示。利用声波的反射，使介质中存在驻波声场（相应于介质传声的厚度为半声波长的整数倍的情况）。它也产生 1 级对称衍射，而且衍射光比行波法时强得多（衍射效率高），第 1 级的衍射光频为

$$\omega_{lm} = \omega_0 + (1 + 2m)\Omega$$

其中  $l, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ，可见在同一级衍射光束内就含有许多不同频率的光波的迭加（当然强度不相同），因此用不到光路的调节就能获得拍频波。例如选取第一级，由  $m = 0$  和  $-1$  的两种频率成分迭加得到拍频为  $2\Omega$  的拍频波。

### 测量原理和方法

我们用位相比较法来测定光速，即根据光拍信号的位相与空间的位置关系，将一束拍频光波分成两束，两光束经不同路径后到达同一光电接收器，如图 4-7 所示。所得两光拍信号则因光程差而产生位相差，从示波器上即可看到如图 5 所示的图像。测定光程差  $\Delta x$  和位相差  $\Delta\varphi$ ，则光速可由下式求出：

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2\pi \cdot \Delta f \cdot \Delta x}{\Delta\varphi}$$

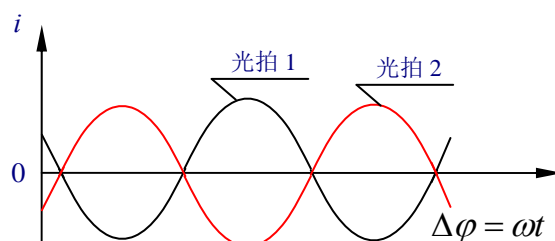


图 5

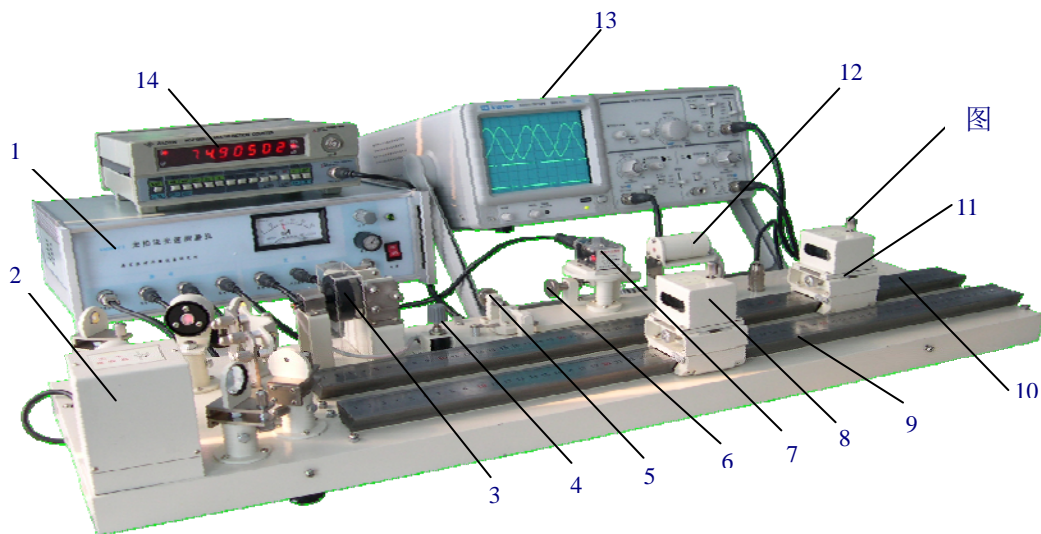
### 实验内容和步骤

- 1 光路调节，反复调节光学系统的各光学部件，使参考光程和测量光程的光打在光电接收器入光孔的中心；
- 2 测量 He-Ne 激光在空气中的传播速度，求取平均值及标准偏差。
- 3 将实验值与公认值相比较，进行误差分析。

### 仪器简介

#### 1 系统组成

LM2000C 光速测量仪由光学平台、光电系统、示波器、电路控制箱和频率计等组成。外形结构如图 6 所示，光学系统如图 7 所示。



1. 电路控制箱 2. 光电接收盒 3. 斩光器 4. 斩光器转速控制旋钮 5. 手调旋钮 1 6. 手调旋钮 2 7. 声光器件 8. 棱镜小车 B 9. 导轨 B 10. 导轨 A 11. 棱镜小车 A 12. 半导体激光器 13. 示波器 14. 频率计 15. 新款 LM2000C 的此处有个棱镜小车横向移动手轮

图 6 机械结构图

## 2 光电系统框图

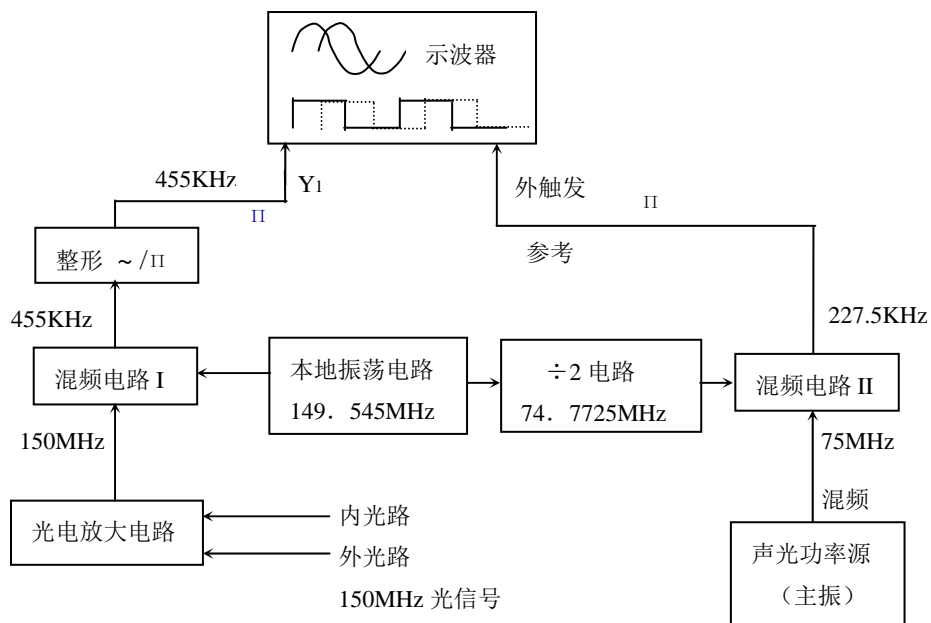


图 7 光电接收系统框

### 3 各部分功能及主要参数

仪器全长	拍频波频率	拍频波波长	可变光程	连续移相范围	移动尺	最小读数	测量精度
0.785 * 0.235m	150MHz	2m	0 - 2.4m	0 - 2 $\pi$	2 根	0.1mm	$\leq 0.5\%(2\pi)$

### 4 双光束位相比较法测拍频波长

用位相法测拍频波的波长，须经过很多电路，必然会产生附加相移。

我们以主控振荡器的输出端作为位相参考原点来说明电路稳定性对波长测量的影响。参见图 9， $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别表示发射系统和接收系统产生的相移， $\varphi_3$ 、 $\varphi_4$  分别表示混频电路 II 和 I 产生的相移， $\varphi$  为光在测线上往返传输产生的相移。由图看出，基准信号  $U_1$  到达测相系统之前位相移动了  $\varphi_4$ ，而被测信号  $U_2$  在到达测相系统之前的相移为  $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi$ ，这样和  $U_1$  之间的位相差为  $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi = \varphi' + \varphi$ ，其中  $\varphi'$  与电路的稳定性及信号的强度有关。如果在测量过程中  $\varphi'$  的变化很小以致可以忽略，则反射镜在相距为半波长的两点间移动时， $\varphi'$  对波长测量的影响可以被抵消掉；但如果  $\varphi'$  的变化不可忽略，显然会给波长的测量带来误差。设反射镜处于位置  $B_1$  时  $U_1$  和  $U_2$  之间的位相差为  $\Delta\varphi_{B1} = \varphi'_{B1} + \varphi$ ；反射镜处于位置  $B_2$  时， $U_1$  与  $U_2$  之间的位相差为  $\Delta\varphi_{B2} = \varphi'_{B2} + \varphi + 2\pi$ 。那么，由于  $\varphi'_{B1} \neq \varphi'_{B2}$  而给波长带来的测量误差为  $(\varphi'_{B1} - \varphi'_{B2})/2\pi$ 。若在测量过程中被测信号强度始终保持不变，则变化主要来自电路的不稳定因素。

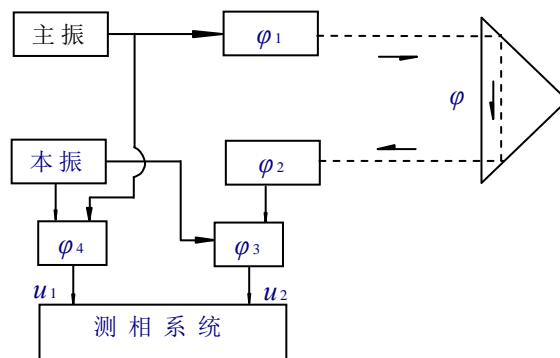


图9 电路系统的附加相移

设置一个由电机带动的斩光器，使从声光器件射出来的光在某一时刻  $t_0$  只射向内光路，而在另一时刻  $t_{0+1}$  只射向外光路，周而复始。同一时刻在示波器上显示的要么是内光路的拍频波，要么是外光路的拍频波。由于示波管的荧光粉的余辉和人眼的记忆作用，看起来两个拍频重叠显示在一起。两路光在很短的时间间隔内交替经过同一套电路系统，相互间的相位差仅与两路光的光程差有关，消除了电路附加相移的影响。

### 5 差频法测相位

在实际测相过程中，当信号频率很高时，测相系统的稳定性、工作速度以及电路分布参量



造成的附加相移等因素都会直接影响测相精度,对电路的制造工艺要求也较苛刻,因此高频下测相困难较大。例如, BX21 型数字式位相计中检相双稳电路的开关时间是 40ns 左右,如果所输入的被测信号频率为 100MHz,则信号周期  $T = 1/f = 10\text{ns}$ ,比电路的开关时间要短,可以想像,此时电路根本来不及动作。为使电路正常工作,就必须大大提高其工作速度。为了避免高频下测相的困难,人们通常采用差频的办法,把待测高频信号转化为中、低频信号处理。这样做的好处是易于理解的,因为两信号之间位相差的测量实际上被转化为两信号过零的时间差的测量,而降低信号频率  $f$  则意味着拉长了与待测的位相差  $\varphi$  相对应的时间差。下面证明差频前后两信号之间的位相差保持不变。

我们知道,将两频率不同的正弦波同时作用于一个非线性元件(如二极管、三极管)时,其输出端包含有两个信号的差频成分。非线性元件对输入信号  $x$  的响应可以表示为

$$y(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots \quad (5)$$

忽略上式中的高次项,我们将看到二次项产生混频效应。

设基准高频信号为:

$$u_1 = U_{10} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (6)$$

被测高频信号为:

$$u_2 = U_{20} \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi) \quad (7)$$

现在我们引入一个本振高频信号:

$$u' = U_0' \cos(\omega' t + \varphi_0') \quad (8)$$

式(6)-(8)中,  $\varphi_0$  为基准高频信号的初位相,  $\varphi_0'$  为本振高频信号的初位相,  $\varphi$  为调制波在测线上往返一次产生的相移量.将式(7)和(8)代入式(5)有(略去高次项)

$$y(u_2 + u') \approx A_0 + A_1u_2 + A_1u' + A_2u_2^2 + A_2u'^2 + 2A_2u_2u'$$

展开交叉项

$$\begin{aligned} 2A_2u_2u' &\approx 2A_2U_{20}U_0' \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi) \cos(\omega' t + \varphi_0') \\ &= 2A_2U_{20}U_0' \left\{ \cos[(\omega + \omega')t + (\varphi_0 + \varphi_0') + \varphi] + \cos[(\omega - \omega')t + (\varphi_0 - \varphi_0') + \varphi] \right\} \end{aligned}$$

由上面推导可以看出,当两个不同频率的正弦信号同时作用于一个非线性元件时,在其输出端除了可以得到原来两种频率的基波信号以及它们的二次和高次谐波之外,还可以得到差频以及和频信号,其中差频信号很容易和其他的高频成分或直流成分分开.同样的推导,基准高频信号  $u_1$  与本振高频信号  $u'$  混频,其差频项为:

$$A_2U_{10}U_0' \cos[(\omega - \omega')t + (\varphi_0 - \varphi_0')]$$

为了便于比较,我们把这两个差频项写在一起,基准信号与本振信号混频后所得差频信号为

$$A_2U_{10}U_0' \cos[(\omega - \omega')t + (\varphi_0 - \varphi_0')] \quad (9)$$

被测信号与本振信号混频后所得差频信号为

$$A_2U_{20}U_0' \cos[(\omega - \omega')t + (\varphi_0 - \varphi_0') + \varphi] \quad (10)$$

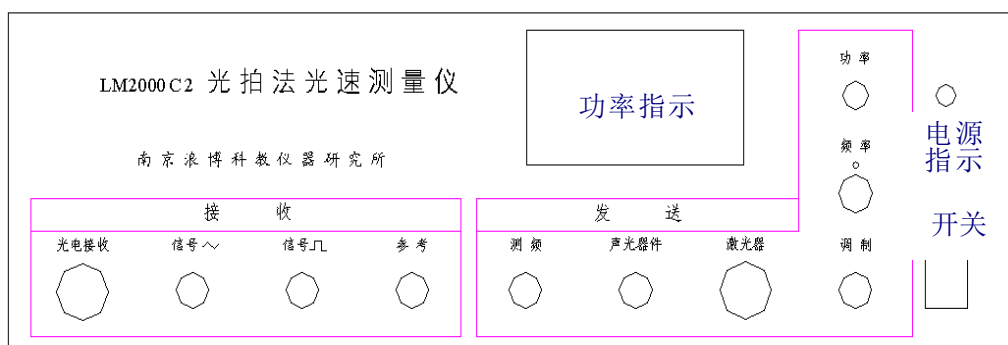
比较以上两式可见，当基准信号、被测信号分别与本振信号混频后，所得到的两个差频信号之间的位相差仍保持为  $\varphi$ 。

本实验就是利用差频检相的方法，将  $f = 149.545\text{MHz}$  的高频基准信号和  $150\text{MHz}$  高频被测信号分别与本机振荡器产生的高频振荡信号混频，得到频率为  $455\text{kHz}$ 、位相差依然为  $\varphi$  低频信号，然后送到位相计中去比相。

## 仪器使用方法

### 1 连线

下图是电路控制箱的面板，请按下表将其与 LM2000C 光学平台或其他仪器连接：



序号	电路控制箱 面板	光学平台 / 频率计 / 示波器	连线类型 (电路控制箱—光学平台/其他测量仪器)
1	光电接收	光学平台上的光电接收盒	4 芯航空插头 —— 由光电接收盒引出
2	信号 ( ~ )	示波器的通道 1	Q9 —— Q9
3	信号 ( π )	示波器的通道 2	Q9 —— Q9
4	参考	示波器的同步触发端	Q9 —— Q9
5	测频	频率计	Q9 —— Q9
6	声光器件	光学平台上的声光器件	莲花插头 —— Q9
7	激光器	光学平台上的激光器	3 芯航空插头 —— 3 芯航空插头

### 2 光路调节

- 1) 调节电路控制箱面板上的“频率”和“功率”旋钮，使示波器上的图形清晰、稳定（频率大约在  $75\text{MHz} \pm 0.02\text{MHz}$  左右，功率指示一般在满量程的 60% - 100%）；
- 2) 调节声光器件平台的手调旋钮 2，使激光器发出的光束垂直射入声光器件晶体，产生 *Raman-Nath* 衍射（可用一白屏置于声光器件的光出射端以观察 *Raman-Nath* 衍射现象），这时应明确观察到 0 级光和左右两个（以上）强度对称的衍射光斑，然后调节手调旋钮 1，使某个 1 级衍射光正好进入斩光器；



- 3) 参考光路调节：调节光路上的平面反射镜，使参考光路的光打在光电接收器入光孔的中心；
- 4) 测量光路调节：在内光路调节完成的前提下，调节测量光路上的平面反射镜，使棱镜小车 A/B 在整个导轨上来回移动时，测量光路的光也始终保持在光电接收器入光孔的中心；
- 5) 反复进行步骤(3)和(4)，直至示波器上的两条曲线清晰、稳定、幅值相等。注意调节斩光器的转速要适中。过快，则示波器上两路波形会左右晃动；过慢，则示波器上两路波形会闪烁，引起眼睛观看的不适；另外各光学器件的光轴设定在平台表面上方 62.5mm 的高度，调节时注意保持才不致调节困难。

### 3 测量

- 1) 记下频率计上的读数  $f$ ，在调节光路时应随时注意  $f$ ，如发生变化，应立即调节声光功率源面板上的“频率”旋钮，保持  $f$  在整个实验过程中的稳定；
- 2) 利用直尺将棱镜小车 A 定位于导轨 A 最左端某处（比如 5mm 处），这个起始值记为  $x_a(0)$ ；同样，从导轨 B 最左端开始运动棱镜小车 B，当示波器上的两条正弦波完全重合时，记下棱镜小车 B 在导轨 B 上的读数，反复重合 5 次，取这 5 次的平均值，记为  $x_b(0)$ ；
- 3) 将棱镜小车 A 定位于导轨 A 右端某处（比如 535mm 处，这是为了计算方便），这个值记为  $x_a(2\pi)$ ；将棱镜小车 B 向右移动，当示波器上的两条正弦波再次完全重合时，记下棱镜小车 B 在导轨 B 上的读数，反复重合 5 次，取这 5 次的平均值，记为  $x_b(2\pi)$ ；
- 4) 将上述各值填入下表，计算出光速  $c = 2f \times \{2[x_a(2\pi) - x_a(0)] + 2[x_b(2\pi) - x_b(0)]\}$ ：

次数	$x_a(0)$	$x_a(2\pi)$	$x_b(0)$	$x_b(2\pi)$	$f$	$c$	误差 (%)
1							
2							
3							

\*光在真空中的传播速度为  $c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$

### 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。

### 思考题

- 1 分析本实验的各种误差来源，并讨论提高测量精确度的方法。
- 2 光拍是怎样形成的，它有什么特点？