



广西师范大学
GUANGXI NORMAL UNIVERSITY

光拍频法测量光速实验



实验背景

光在真空中的传播速度是一个极其重要的基本物理量，许多物理概念和物理量都与它有密切的联系，例如基本物理量长度的单位就是通过光速定义的，因此光速的测量是物理学中的一个十分重要的课题。

光速测量实验已经历了300多年的历史！许多科学家采用不同手段对光速进行了测量。

木卫蚀法（1676罗迈）

光行差法（1727布拉德雷）

旋转齿轮法（1849菲索）

旋转平面镜法（1851傅科）

旋转棱镜法（1879迈克尔逊）



实验背景

◆ 旋转棱镜法（1879迈克尔逊）

最有名的是迈克尔逊，他以光速测量为终生目标，自己设计了旋转镜和干涉仪，用来测量光速和波长、折射率和微小长度量。1879年，他测得光速为 $299910 \pm 5 \text{ Km/s}$; 1882年测得光速 $299853 \pm 6 \text{ Km/s}$, 这个结果被公认为国际标准并沿用了40年。他因此在1907年获得诺贝尔物理学奖。

◆ 自19世纪50年代以后，所有精确的光速测量都同时直接测量光波波长 λ 和频率 f ，从而得到光速 $c = \lambda \cdot f$ 。目前公认的光速值为
(299792458 $\pm$ 1.2) m/sec

◆ 本实验用声光调制形成光拍的新方法测量光速！



实验背景

光速 $c = s / \Delta t$ ， s 是光传播的距离， Δt 是光传播 s 所需的时间。例如 $c = f\lambda$ 中， λ 相当上式的 s ，可以方便地测得，但光频 f 大约 10^{14} Hz ，我们没有那样的频率计，同样传播 λ 距离所需的时间 $\Delta t = 1 / f$ 也没有比较方便的测量方法。如果使 f 变得很低，例如 30 MHz ，那么波长约为 10 m 。这种测量对我们说来是十分方便的。这种使光频“变低”的方法就是所谓“光拍频法”。



一、实验目的

1. 掌握光拍频法测量光速的原理和实验方法,并掌握声光效应的基本原理。
2. 通过测量光拍的波长和频率来确定光速。



二、原理

1. 光拍的产生及特征

根据振动叠加原理，两列速度相同、振面相同、频差较小而同向传播的简谐波叠加即形成**拍**。

若有振幅相同为 E_0 、圆频率分别为 ω_1 、 ω_2 (频差较小) 的两列沿x轴方向传播的平面光波

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

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

若这两列光波的偏振方向相同，则叠加后的总场为：

$$E = E_1 + E_2$$

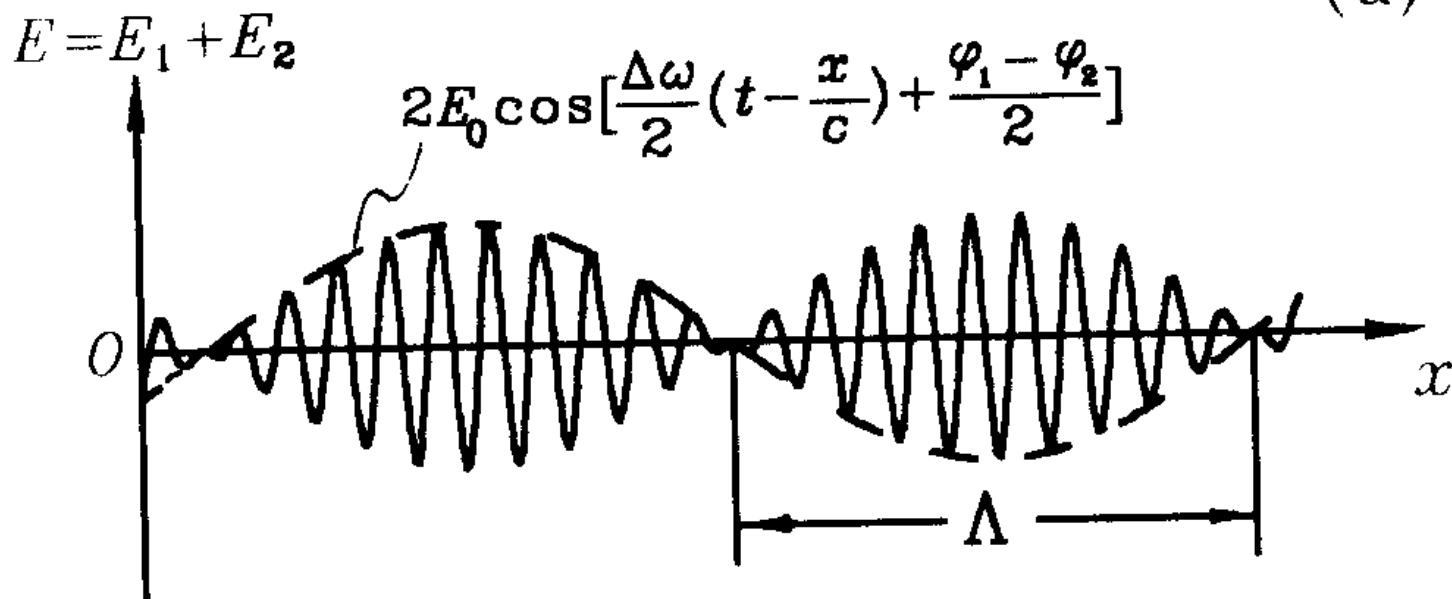
$$= 2E_0 \cos\left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{c}\right) + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right] \times \cos\left[\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\left(t - \frac{x}{c}\right) + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right]$$

E 的振幅是时间和空间的函数，以频率 Δf 周期性地变化，称这种低频的行波为**光拍频波**，简称**拍频**。



拍频波在某一时刻的波形图

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



上图拍频波频率为: $\Delta f = \left(\frac{\Delta \omega}{2} / 2\pi \right) = \frac{\Delta \omega}{4\pi}$



2. 相拍二光波的获得——声光调制器

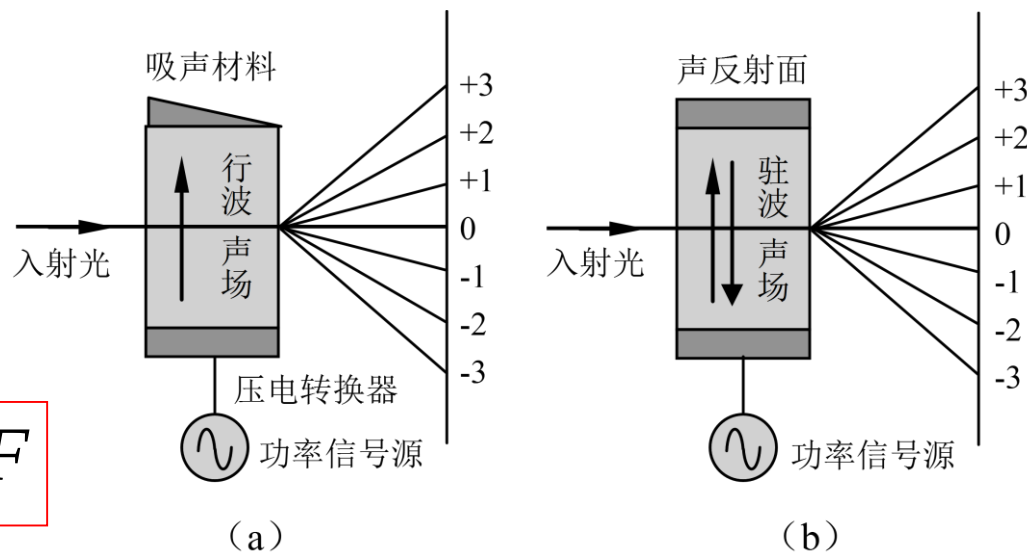
通过超声与光波的相互作用来获得产生拍频波的二光波。超声(弹性波)在介质中传播,引起介质折射率的周期性变化,就使介质成为一个位相光栅。当入射光通过该介质时发生衍射,其衍射光的频率与声频有关。

(1) 行波法:

$$f_L = f_0 + LF$$

(2) 驻波法:

$$f_{L,m} = f_0 + (L + 2m)F$$



式中 $L, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。 f_0 为入射光的频率, F 超声波的频率, 为可见, 即使在同一级衍射光内也含有不同频率的光波。因此, 用同一级衍射光就可获得不同的拍频波。



3. 光拍的接收与光电流

用**光电探测器**接收光的拍频波，探测器光敏面上光照反应所产生的**光电流与光强(即电场强度的平方)成正比**

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

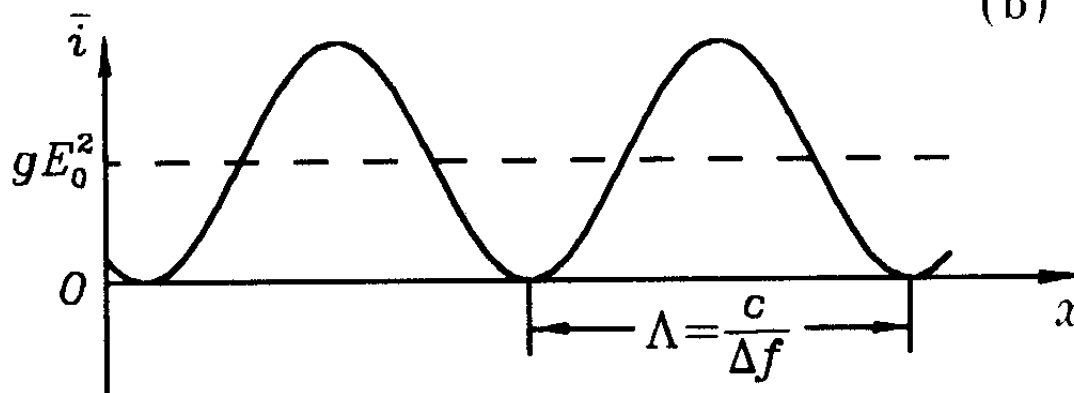


图 3-6-1 拍频波场在某一时刻 t 的空间分布

将直流成分滤掉，即得频率为拍频 Δf 的光拍信号。



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

4. 光速公式的导出

光拍信号的位相与空间位置有关。如果将光拍信号一分为二，分为近程光和远程光两部分，设近程光光程为 x_1 ，远程光光程为 x_2 ，光程差为 ΔL ，位相差为 $\Delta\psi$ ，根据上式应有

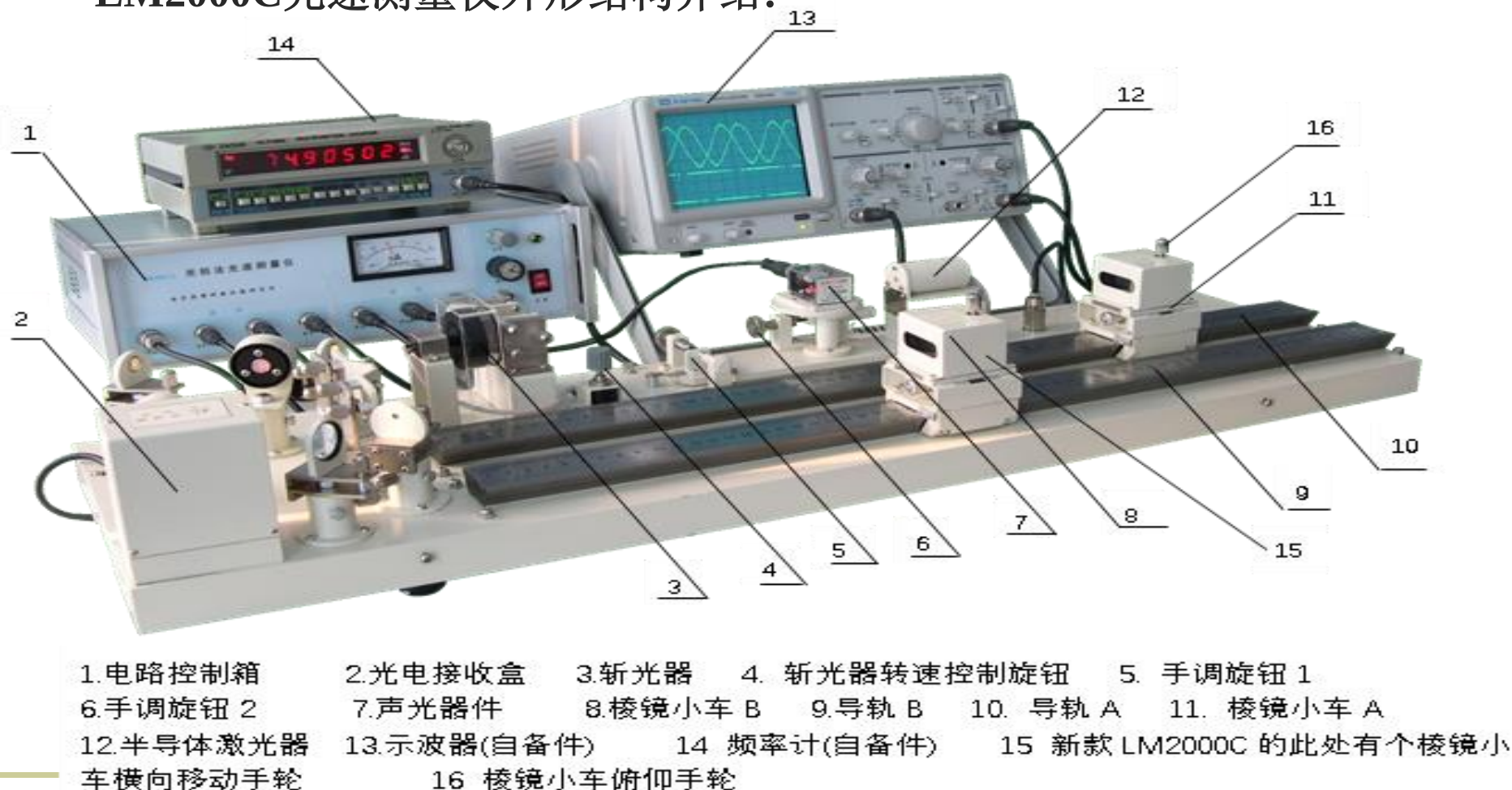
$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \Delta\omega \left(t - \frac{x_1}{c} \right) - \Delta\omega \left(t - \frac{x_2}{c} \right) \\ &= \Delta\omega \frac{x_2 - x_1}{c} = \frac{\Delta\omega \cdot \Delta L}{c} = \frac{2\pi\Delta f \cdot \Delta L}{c} \end{aligned}$$

光拍频波通过不同的光程后入射同一光电探测器，则该探测器所输出的两个光拍信号的位相差与两路光的光程差之间的关系仍由上式确定。当 $\Delta\psi = 2\pi$ 时， $\Delta L = \lambda$ ，即光程差恰为光拍波长，此时上式简化为



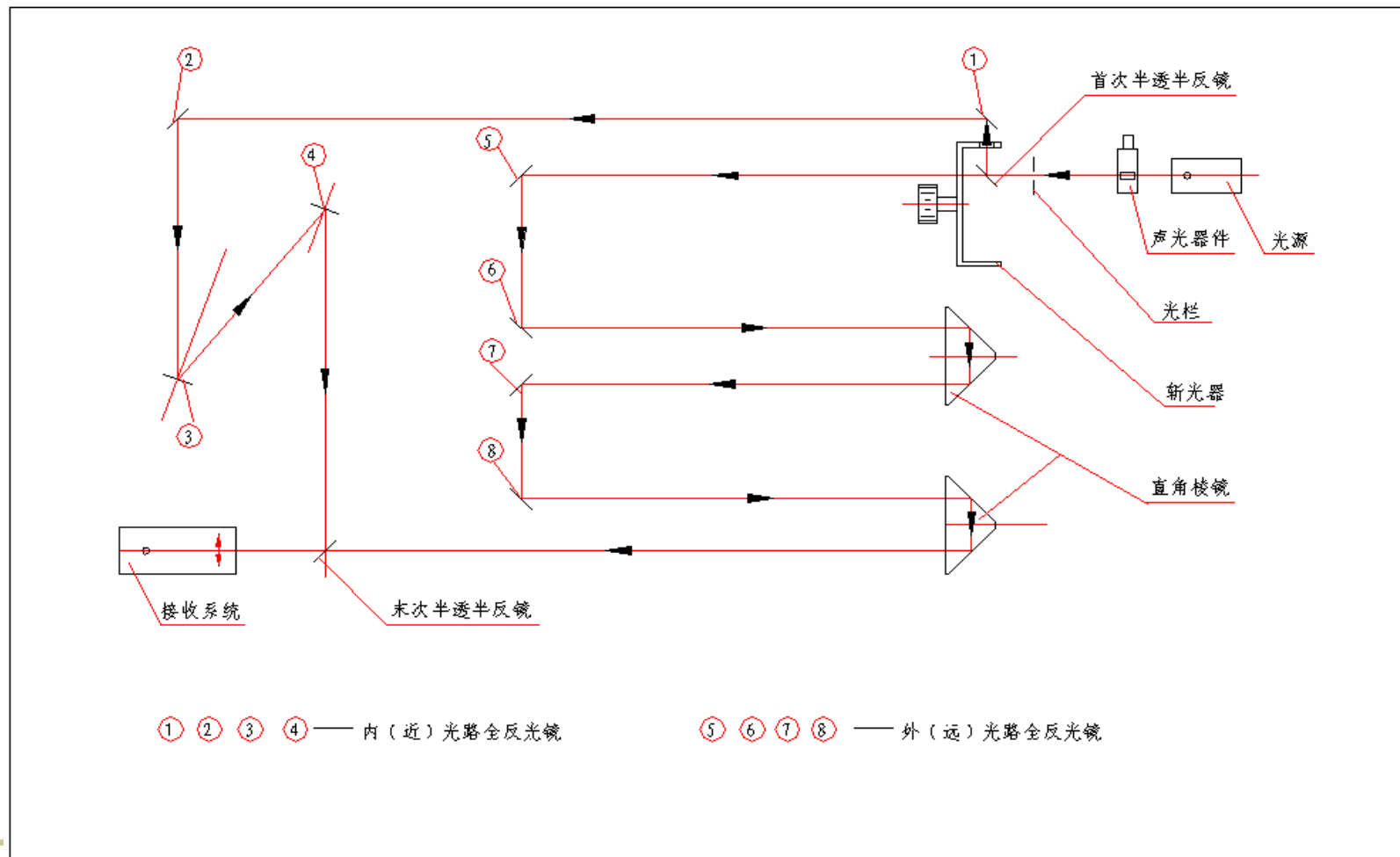
三、实验装置图

LM2000C光速测量仪外形结构介绍:





LM2000C光速测量仪光学系统示意图:

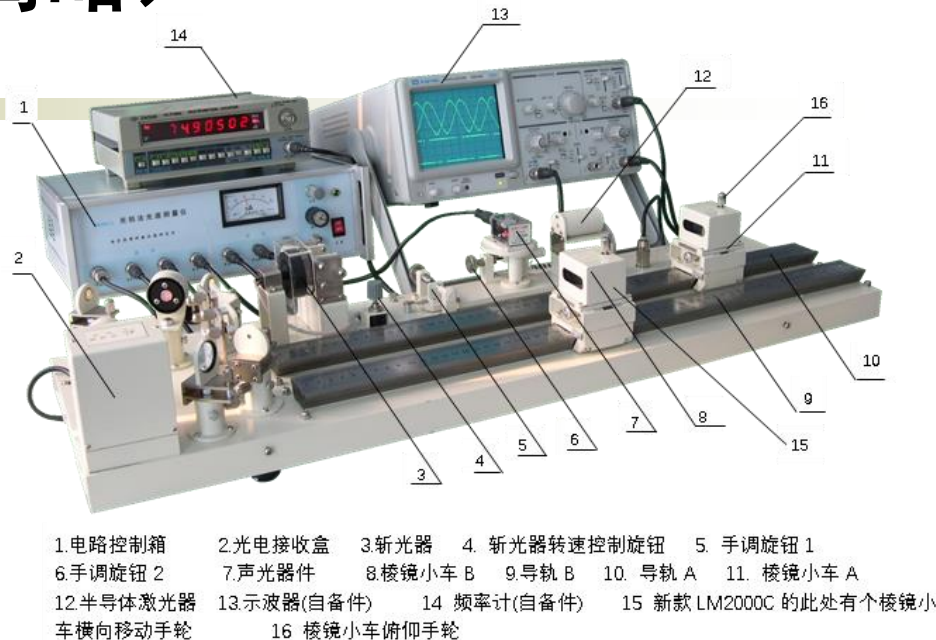




四. 实验步骤（简略）

实验中，用斩光器依次切断近程光和远程光，则在示波器屏上同时显示近程光和远程光拍频信号的正弦波形。调节两路光的光程差，当程差恰等于一个拍频波长 λ 时，两正弦波的位相差恰为 2π ，波形第一次完全重合，这时有：

$$c = \Delta f \cdot \lambda$$



图五 机械结构图

从导轨上测得 λ ，用数字频率计测得功率信号源的输出频率 F ，根据上式可得出空气中的光速 c 。

重复上述步骤进行多次测量，求其平均值及平均值的标准偏差：

$$S_{\bar{c}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum (c_i - \bar{c})^2}$$



五. 注意事项

1. 声光频移器引线及冷却铜块不得拆卸。
2. 切勿用手或其它污物接触光学表面；切勿带电触摸激光管电极等高压部位。
3. 注意光电接收和显示系统**任一时刻**都只接收和显示**二光路之一的拍频波信号**。我们用一小电机驱动旋转式斩光器，它任何时刻只让一束光通过它达到光电接收器，截断另一束。斩光器的旋转，使两路光交替达到接收器并显示出波形。利用示波器的余辉，单通道示波器上可“同时”看到两路拍频光波的波形，以达到比较两路光拍频波位相的目的。应当指出，为了正确比较位相，必须用**统一的时基**，示波器工作**切不可用内触发同步**，要用**功率信号作示波器的外触发同步信号**，否则将会引起较大测量误差。



六、思考题

1. 什么是光拍频波？斩光器的作用是什么？
2. 为什么采用光拍频法测光速？获得光拍频波的两种方法是什么？本实验采取哪一种？
3. 写出光速的计算公式；并说出各量的物理意义？
4. 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。



作业

- 根据实验要求完成相应的实验报告撰写。