

實驗九 光速量測

目的：

由移動距離及時間變化來測定光速，進而由光速求介質之折射率。

原理：

第一個嘗試測光速的是伽利略。他和他的助手在夜間相隔數公里遠面對面的站著，每人拿一盞燈，當伽利略在某個時候打開燈，一束光向助手射去，助手看到燈後馬上打開燈。伽利略試圖測出從他開燈到他看到助手開燈之間的時差，從而算出光速。但這個實驗失敗了，因為光的傳播速度太快了，現在知道，想要通過這種方法測出光速，必須能測出 10^{-5} 的時差，這在當時是完全不可能的。

第一個比較正確的光速值，是用天體測量得到的。1675年，丹麥天文學家羅麥注意到，木星的衛星消失在木星陰影裡的時間間隔逐次不同，他隨著各次衛星掩蝕時，木星和地球之間的距離的不同而變長或變短。他知道這是由於在長短不同的路程上，光線傳播需要不同的時間，根據這種想法，羅麥推算出光速，直到1849年，地面實驗室中才有較好的光速測量。當時，法國物理學家斐索利用高速齒輪進行這項工作。1862年，傅科成功地發展了另一種測定光速的方法，他用一個高速轉鏡來測量微小的時間間隔。轉鏡是一個正八面的鋼質稜鏡，從光源S發出的光反射到轉面鏡R上，經R反射後又射到35公里以外的一塊反射鏡C上，光線再經反射又回到轉鏡。所用時間是 $t=2D/c$ 。在 t 時間裡正好轉過 $1/8$ 圈。返回的光線恰恰落在稜鏡的下一個面上，通過半透鏡M可從望遠鏡裡看到返回光線所成的像。用這種方法得到 $c=299796.4$ 公里/秒。

近代測量光速的方法，是先準確的測量一束光的頻率 ν 和波長 λ ，然後再用 $c=\nu\lambda$ 來計算。1973年以來，採用以下的光速值 $c=299792458.12$ 公尺/秒。

在以上三個測量光速的實驗中，都需要非常大的量測距離，但在實驗室裡，因實驗室的空間有限，所以這個實驗告訴我們如何利用一短距離的路徑去求取光速的值。

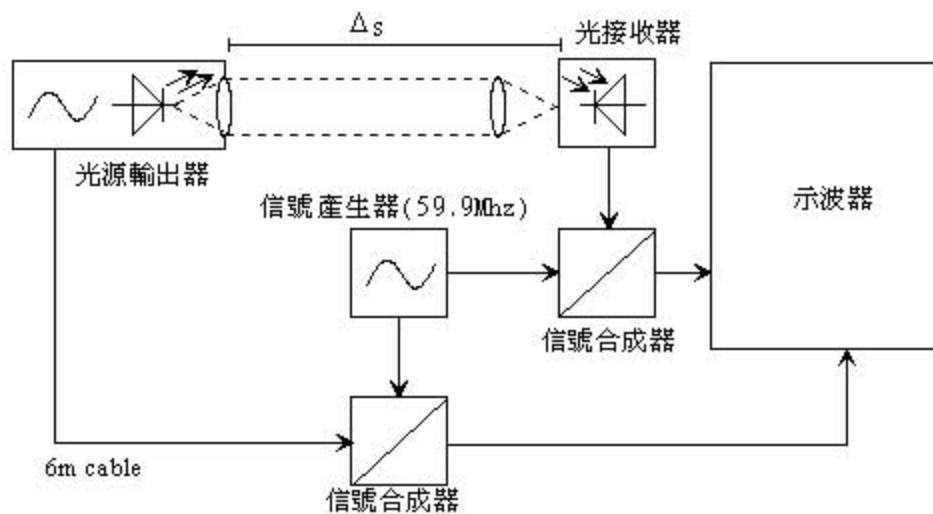
光在真空中的速度 c 最大，在其他介質的速率都比 c 還小，如表一所列的速率。而且光介質中的速率，也因不同的波長而有所不同。

介質	速率($10^8 m/s$)
真空	2.99792
空氣	2.9970
水	2.25
乙醇	2.20
茶	2.00
光學玻璃	1.97
聚苯乙烯	1.89
火石玻璃	1.81
鑽石	1.24

表一 光波長 589nm 的速率

在本實驗中，利用電子調制的方法來測量光速，如圖一所示。我們以二極體(LED)取代一般的光源作為光源輸出器(Light Transmitter)。光源輸出器與光源接收器(Light Receiver)被安置在實驗空間之兩端，並以一 6m 之同軸電纜線連接。經由此電纜線 LED 訊號被加上一 60MHz 的訊號。當光源輸出器經由 ΔS 到達光源接收器，兩個訊號同時出現在示波器上，其相位差 Φ 即光經 ΔS 所產生之時間差(即 x 軸的位移 ΔT)而光速可由下列式子求出：

$$c = \frac{\Delta S}{\Delta T}$$



圖一

為了在短距離內決定光經過的時間，我們將光源輸出器與光源接收器的訊號另外加上一 59.9MHz 的訊號，以使時間擴大約為原來的 600 倍。假如我們選定光二極體的發射頻率為 $f_1 = 60MHz$ ，其調制電壓 U_1 可寫為

$$U_1 = \cos \omega_1 t, \quad \omega_1 = 2\pi f_1 \text{ (參考訊號)}$$

若接收器所接收到的訊號 U_2 落後 U_1 的時間是 ΔT ，則相位差 $\Phi = \omega_1 \Delta T$

$$U_2 = \cos(\omega_1 t - \Phi) \text{ (工作訊號)}$$

若電壓 U_1 及 U_2 分別加上一頻率為 $f_2 = 59.9MHz$ 的訊號，利用疊加原理

$$2(\cos \alpha \times \cos \beta) = \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)$$

則原來的電壓值變為

$$U'_1 = \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

$$U'_2 = \cos[(\omega_1 + \omega_2)t - \Phi] + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \Phi]$$

由於 U'_1 及 U'_2 分別包含兩種頻率的訊號，我們可用適當的濾波器分離高頻訊號

($f_1 + f_2 = 119.9MHz$)，使 U'_1 及 U'_2 之低頻訊號 ($f_1 - f_2 = 100KHz$) 在示波器上出現，即

$$U''_1 = \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

$$U''_2 = \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \Phi]$$

原來的相位差 Φ 經疊加後並無改變，但是時間差 ΔT 則與原來的不同。設疊加後的時間差是 Δt ，因此

$$\omega_1 \Delta T = (\omega_1 - \omega_2) \Delta t$$

$$\Delta t = \left(\frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega_2} \right) \Delta T = \left(\frac{60}{60 - 59.9} \right) \Delta T = 600 \Delta T$$

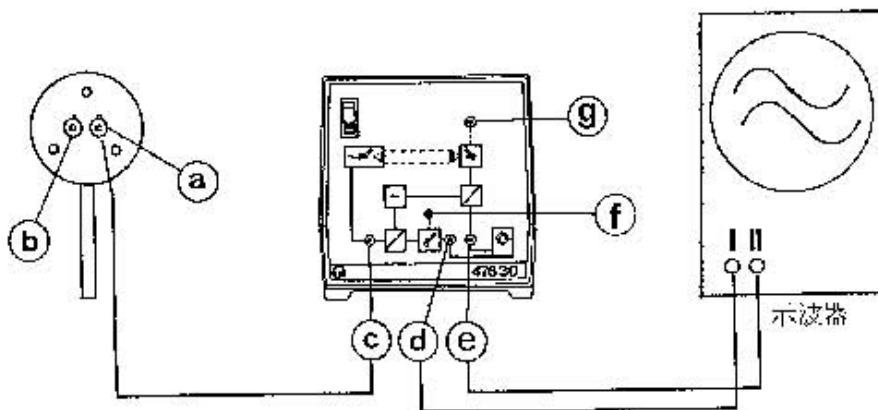
所以利用訊號調制的方法，我們可以將 ΔT 放大 600 倍，於是示波器上所得之時間差 (Δt)，須再除以 600 才是實際的時間差值。

在本實驗中先選擇一適當的 Δs ，使 U_1'' 及 U_2'' 在示波器上的波形重合，表示 U_1'' 及 U_2'' 同相。此時再將光源移動一小段距離 ds ，使示波器上的圖形產生一段時間差 dt 。這表示光再多走 ds 的距離到達光源接收器時，會產生一個相對於 U_1'' 的相位差 $(\omega_1 - \omega_2) \left(\frac{dt}{600} \right)$ ，所以

$$c \cdot \left(\frac{dt}{600} \right) = ds \quad , \quad c = 600 \cdot \frac{ds}{dt}$$

儀器：

儀器名稱	器材編號	數量
光發射器與接收器	476 30	1 組
示波器		1 部
透鏡($f=+150\text{mm}$)	460 08	2 個
固定底座	300 02	2 個
1m 之水管		1 個
塑膠體(厚度:5cm)		1 個

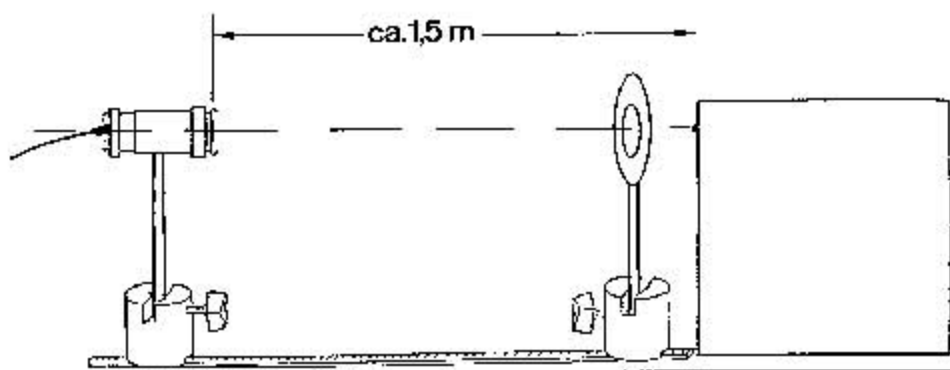


圖二 實驗儀器說明圖

- (1) 60M Hz 訊號(以 6m 同軸電纜線接至 c)
- (2) 100K Hz 參考訊號(本實驗用不到)
- (3) 光二極體控制電壓
- (4) 參考訊號:控制電壓與 59.9M Hz 訊號合成(以同軸纜線接至示波器 channel1)
- (5) 工作訊號:接收器接收之訊號與 59.9M Hz 訊號合成(以同軸電纜線接至示波器 chanel2)
- (6) 相位差調整鈕
- (7) 接收光訊號之接收孔

儀器裝置：

1. 將 BNC 導線連接 a 與 c。
2. d、e 分別與示波器相接。
3. 光發射器、透鏡與接收器須成一直線(如圖三)。
4. 調整示波器之“sec/cm”約 5ms 的位置，再調整兩波形的大小，使之相當。

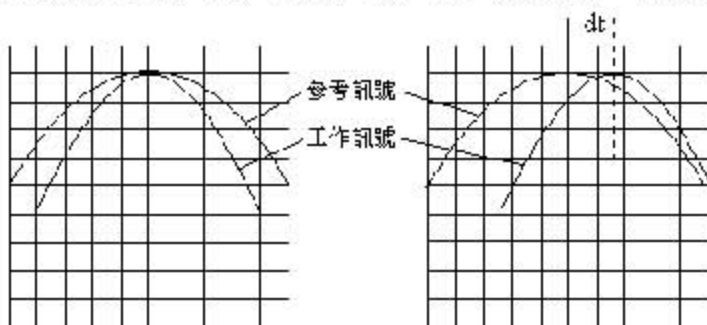


圖三 實驗裝置圖

步驟：

測量光速

1. 將實驗裝置如圖三所示。
2. 先將光發射器放置在光接收孔的位置，調整相位差鈕(f)，使示波器產生如圖四的圖像(調整示波器使圖像之波峰位於中線；參考訊號與工作訊號波峰處重合)。



圖四

圖五

3. 移動光發射器一段距離(ds)，使示波器產生如圖五的圖像。(工作訊號之波峰若不明顯，請調整透鏡位置使焦點直射光接收器內，或可於光發射器前加一透鏡。)
4. 由示波器讀取 U_1'' 及 U_2'' 之時間差 dt，而實際之時間差值為 $dT = dt/600$ 。
5. 測量光發射器移動之距離 ds。
6. 由 $c = \frac{ds}{dT} = 600 \cdot \frac{ds}{dt}$ 求得光速。

測量塑膠體之折射率

1. 將光發射器放置適當位置，調整相位差鈕(13)使 U_1'' 及 U_2'' 的圖形在示波器上重合，如圖四所示。
2. 放置塑膠體於光發射器與透鏡之間則 U_1'' 及 U_2'' 會產生一個時間差，同前步驟 4 求得實際時間之差值 dT 。
3. 利用公式計算塑膠體的折射率

$$n \equiv \frac{c}{c_m} = 1 + \frac{cdT}{d}$$

d ：為塑膠厚度

c_m ：為光在塑膠體中的速率

c ：為光在真空中的速率

測量水之折射率

1. 將光發射器與透鏡間分開 110cm。
2. 調整相位差鈕(13)使 U_1'' 及 U_2'' 的圖形在示波器上重合，如圖四所示。
3. 放置裝水的管子於光發射器與接收器間，由示波器求得實際之時間差值 dT 。
4. 由前述公式，求水之折射率。

備註：

- a、此實驗若效果不好，可一開始在光發射器前加放一透鏡，重複 1~4 步驟。
- b、裝水管子之玻璃所造成之誤差低於 0.2%，可忽略不管。
- c、塑膠體之折射率約為 1.5。
- d、水之折射率約為 1.34。

問題與討論：

- (1) 為什麼調制訊號要用 60MHz 這麼高的頻率？為什麼還要另外加一 59.9MHz 的調制訊號？若用低頻訊號來作實驗會遇到什麼困難？

$$n \equiv \frac{c}{c_m} = 1 + \frac{cdT}{d}$$

- (2) 導出折射率

參考文獻：

Leybold-Heraeus, Physics Experiments Vol. 3, 5.2.2.1 Velocity of light at small distances.

