

## 光電實驗（五） 光纖的基本特性

### （一）實驗目的：

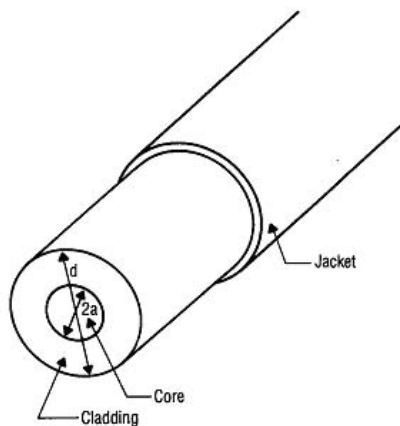
將雷射光耦合進入光纖時，除了要將光纖端面處理平整避免散射外，還要配合光纖的 NA(Numerical Aperture)值與模態分佈。學習如何有效率地將 He-Ne 雷射光耦合入光纖(由耦合損耗判斷)、計算出此光纖的 NA 值、彎曲損耗並觀察單模光纖與多模光纖的橫模態分佈。

### （二）實驗原理：

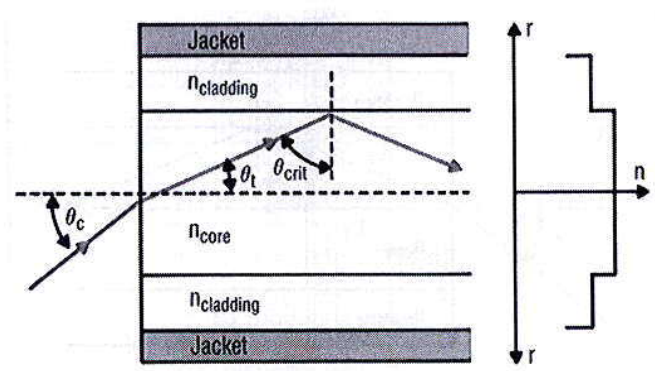
**光纖** 在光纖通訊系統中所扮演的角色為傳輸介質，能將光訊號由光源處傳遞到遠方的目的地，以達到通訊的功能。以 ray-optics 來講，為達到傳遞訊息的目的，可視同光在纖衣裡以全反射的方式行進。其基本結構，如圖一所示，是由 SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub> 形成折射率(refractive index)較高的纖心(Core)、純 SiO<sub>2</sub> 或摻雜比例較低的混合物形成折射率(refractive index)較低的纖衣(Cladding)以及最外層的塑膠保護層(jacket)所組成；有一物理量(fractional refractive index difference)，常用以表示光纖折射率差值比例的定義：

$$\Delta \equiv \frac{(n_{core} - n_{cladding})}{n_{core}}$$

一般而言，單模光纖的纖心直徑約為 4-8  $\mu\text{m}$ 、纖衣直徑約為 125-140  $\mu\text{m}$  左右，而多模光纖直徑便已經大約為 50-100  $\mu\text{m}$  了，最外層的保護層直徑則約為 500-1000  $\mu\text{m}$  左右。



圖一 光纖剖面



圖二 步階式光纖

光纖其實是圓柱型電介質波導管的一種，在此，為簡化起見，則以一電介質平板的波導模型來說明光纖的導光作用，如圖二所示。

由 Snell's 定律可知：

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_c &= n_{core} \sin \theta_t = n_{core} \sin(90 - \theta_{crit}) \\ &= n_{core} \cos \theta_{crit} = n_{core} \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{crit})} \end{aligned}$$

又

$$n_{core} \sin \theta_{crit} = n_{cl} \sin 90 = n_{cl}$$

$$\therefore n_0 \sin \theta_c = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} \equiv N.A.$$

式中 N.A. 定義為光纖的數值孔徑(Numerical Aperture)， $\theta_c$  稱為光纖的接受角(fiber acceptance angle)，意即只有當入射角小於 $\theta_c$ 時，光才有可能藉由全反射效應而被侷限在光纖的核心中傳播不致散射至核心之外而造成訊號衰減。另外，

$$N.A. = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} = \sqrt{(n_{core} + n_{cl})(n_{core} - n_{cl})} \approx n_{core} \sqrt{2\Delta} \quad \text{if } \Delta \ll 1.$$

但除了滿足以上條件之外，經波導理論推算，光波若要穩定存在於光纖中，必須滿足相位匹配(phase match)的條件；就是在  $r$  方向上也必須產生駐波：

$$\begin{aligned} 2\pi \left[ \frac{2a}{\lambda_0 / (n_{core} \cos \theta)} \right] - 2\phi &= 2m\pi, \quad \text{where } m = \text{integral} \\ \text{or } \frac{2\pi a n_{core} \cos \theta}{\lambda_0} - \phi &= m\pi \end{aligned}$$

其中  $a$  為核心半徑

$\lambda_0$  為光波於真空中的波長

$\phi$  為界面全反射引進之相位差

只有在滿足  $m$  為一整數的情況下，光才能在核心內穩定傳播，此稱之為光纖的傳播模態(modes)。最大的傳播模態數可以從最大接受角來估計：

$$\begin{aligned} m &\leq \frac{2an_{core}}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_{cl}}{n_{core}}\right)^2} - \frac{\phi}{\pi} \equiv \frac{V}{\pi} - \frac{\phi}{\pi} \\ \text{where } V &\equiv \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} \end{aligned}$$

$V$  稱為歸一化頻率(normalized frequency)，所以若纖心半徑已知，則估計總傳播模態數。對纖心直徑約為 2~10um 時，只傳播單一模態， $V < 2.405$ ，此時為單模光纖，而直徑若約為 50~300um 時， $V$  遠大於 2.405，故而允許許多模態同時在光纖中傳播，故稱之為多模光纖。

**橫模** 光在光纖內傳播的光場分佈可利用 Maxwell's equation 來分析。對於一般的光纖而言，可能會有 TE、TM、HE、EH 或 LP 等不同的模態。對於單模光纖而言，只會有  $HE_{11}$ (或  $LP_{01}$ ) 模態，如圖 3 所示。但對於多模光纖而言，存在的模態數不只一個，因此多模光纖的光場分佈就不會只向單模光纖一樣，不會是一個看似圓型的光場分佈。

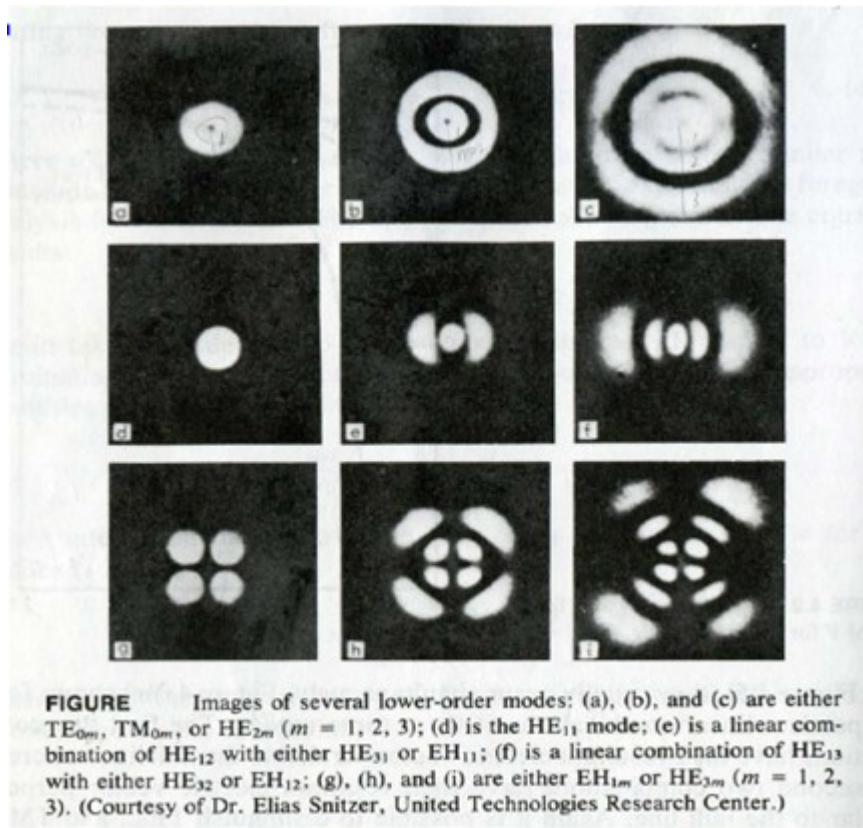


圖 3 光纖低階模態

光纖通訊系統中，光訊號強度衰減主要來自：耦合損耗(雷射光入射至光纖之損耗以及光纖連接不當之損耗)、光纖本身的吸收或散射衰減以及光纖本身受到彎曲或其它應力所產生的散射損耗。

端面耦合損耗：

光纖的  $N.A.$  值能決定入射光能夠耦合進入光纖的比例，因為只有發散角小於光纖接受角以及光束貫徑小於光纖纖心口徑的入射光方能進入光纖中傳播，所以耦合損耗主要發生在光源的發散角大於光纖的  $N.A.$  或光源不能有效地對準光纖纖心。

光纖連接損耗：

當通訊系統中的光纖需因為其它原因而做接駁的動作時，常常會因為兩條對接的光纖連接不當而造成大量的損耗，損耗來源有端面不平、對位不準、兩端面距離過大或完全接觸造成彎曲...等，都會造成難以想像的損耗，有時更會使訊號完全無法傳遞到下一條光纖。由於光纖通訊的訊雜比或訊息量遠比傳統方式來得大，所以通常以  $dB$  值來表示損耗：

$$dB \equiv -10 \log_{10} \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

$P_{in}$  為入射光纖之能量

$P_{out}$  為出射光纖之能量

### 光纖內部吸收或散射：

光纖內部損耗主要來自於材質中 OH-離子鍵的吸收以及雜質粒子的散射。而其損耗大小的表示：

$$\frac{dB}{km} \equiv \frac{-1}{L} \log_{10} \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

其中  $L$  為光纖長度

以及彎曲或其它應力造成的損耗。

### (三) 實驗儀器與光電元件：

單模光纖、多模光纖、光纖裁剪器、He-Ne 雷射、光纖耦合器(座、物鏡)、銅製光纖固定棒、光偵測器、光纖連接器。

### (四) 實驗步驟：

(耦合損耗)

1. 用光纖裁剪器裁剪單模光纖兩端面。
2. 將平滑切口之光纖端頭分別置於兩個銅製之光纖固定棒內，端頭突出約 1~1.5cm。
3. 取一置入光纖之銅棒當成耦合入射端，置入光纖耦合座中，另一端置入光纖的銅棒置入銅棒固定座當成耦合輸出端。並利用耦合座中之物鏡將 He-Ne 雷射聚焦耦合至光纖，並調整後方銅棒置座的 XYZ 三軸，使雷射光輸出最大。測量輸入光強度及輸出光強度，如圖 4 所示。

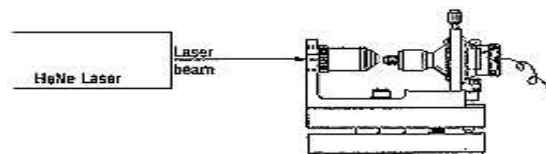


圖 4 光纖對光耦合

(發散角或接收角、N.A.值)

4. 取一光屏置於耦合輸出端後  $L$  處，量測光屏上的光斑直徑  $D$ ，如圖 5。改變五次  $L$  的距離，量測相對應的光斑直徑  $D$ ，以  $L$  為橫軸、 $D$  為縱軸，找出以上 5 次實驗數據的斜率算出光纖發散角  $\theta$ ，並由  $\theta$  算出此光纖的 N.A. 值。

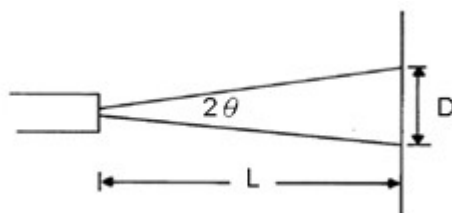


圖 5

(彎曲損耗)

5. 將後方光纖圈成一個圓型，圓直徑由 5cm—1cm，間隔 1cm 漸漸使圓直徑縮小(勿使直徑小於 1cm)，逐一記錄輸出光的強度。

(單、多模光纖模態觀察)

6. 觀察單模光纖及多模光纖的模態分佈。

(連接耦合損耗)

7. ※取出所附之光纖連接器，小心將已有雷射輸出之光纖以及另一段端面準備好的光纖放入，扣上連接器的扣環，量測光輸出強度。

8. ※同步驟 6.，但連接器另一端置入未處理端面的光纖，量測光輸出強度。

※ 為量測光纖連接器的連接損耗，非本實驗必要步驟，可視實驗時間增減。

### (五) 問題與討論：

1. 計算雷射光耦合入光纖的損耗(以 dB 值計算之)。
2. 將一偏極板放在雷射出口使其成為線性偏振光，然後經光纖傳導後再放入另一檢偏板，輸出光是否仍為線性偏極？
3. 對於那些光纖，小心微調可調出不一樣的橫模態？